

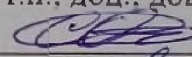
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

ПОБУДОВА МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ LORA WAN

Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-23мс
спеціальності 172 – Електронні комунікації та
радіотехніка

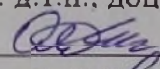

Скрипка А.В.

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ


Стальченко О.В.

« 12 » червня 2025 р.

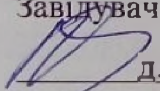
Рецензент: д.т.н., доцент каф. ІРТС


Осадчук Я.О.

« 12 » червня 2025 р.

Допущено до захисту

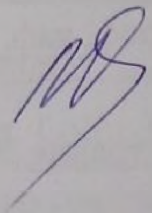
Завідувач кафедри ІКСТ


д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

 Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
«5» 05 2025 року

ЗАВДАННЯ **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Скрипці Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Побудова мережі на основі LORA WAN

керівник роботи Стальченко Олександр Володимирович, канд. техн. наук

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «20» березня 2025 року № 97

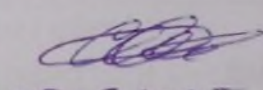
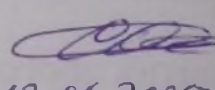
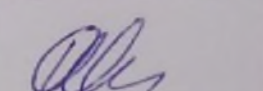
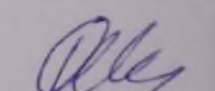
2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: робоча частота – 868 МГц, потужність передачі – 14дБширина смуги частот – 125-500 кГц; кількість біт на символ – 7-12; смуга радіоканалу – 128 МГц; відносна тривалість захисного інтервалу 1/4;

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібні розробити): вступ, аналіз виникнення і розвитку енергоефективних мереж та mesh мереж, аналіз методів маршрутизації в бездротових mesh-мережах LoRa WAN створення моделей і методів маршрутизації в LoRa WAN мережах, моделювання результатів, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Гібридні мережі в системі розумного міста; структура мережі LoRaWAN; ієрархічна архітектура енергоефективної мережі дальнього радіусу дії; структура імітаційної моделі мережі; модель мережі; комп'ютерне моделювання

6. Консультанти розділів роботи

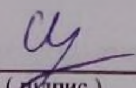
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ	 05.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В. проф. каф. БЖДПБ	 05.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

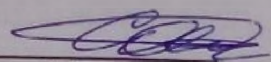
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент


(підпис)

Скрипка А.В.

Керівник роботи


(підпис)

Стальченко О.В.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	2
ВСТУП.....	3
1. АНАЛІЗ ВИНИКНЕННЯ І РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МЕРЕЖ ТА MESH-МЕРЕЖ	6
1.1. Технології бездротової передачі даних для застосунків IoT	6
1.2. Перспективні енергоефективні мережі дальнього радіусу дії.....	10
1.3. Цілі енергоефективних магістральних мереж	11
1.4. Аналіз енергоефективних технологій мереж дальнього радіусу дії	13
1.5. Аналіз існуючих технологій mesh-мереж	22
1.6. Обґрунтування необхідності використання mesh топології в енергоефективних магістральних мережах	25
1.7. Постановка задачі дослідження	28
1.8. Висновки по розділу.....	28
2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗДРотовИХ MESH- МЕРЕЖАХ LoRaWAN.....	29
2.1. Аналіз міжнародних досліджень маршрутизації в бездротових mesh- мережах.....	29
2.2. Протоколи реактивної маршрутизації.....	30
2.3. Проактивні протоколи маршрутизації	32
2.4. Гібридні протоколи маршрутизації	33
2.5. Висновки по розділу.....	34
3. СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В LoRaWAN МЕРЕЖАХ	36
3.1. Гібридні mesh-мережі як елемент мережевої інфраструктури IoT- пристроїв у розумних містах	36
3.2. LoRa, як технологія передавання даних.....	39
3.3. Структура mesh мережі LoRaWAN в рамках системи розумного міста ...	42
3.4. Аналітичні та імітаційні моделі	49
3.5. Метод маршрутизації на основі зведеного показника якості посилань ...	55
3.6. Метод пошуку маршруту.....	63
3.7. Висновки по розділу.....	66
4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ	67
4.1. Розробка моделі в OMNET++.	67
4.2. Аналіз результатів імітаційного моделювання.	77
4.3. Результати порівняння AODV	78
4.4. Висновки	81
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	82
5.1. Технічні рішення з безпечного виконання роботи	83
5.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	85
5.3. Пожежна безпека	90
ВИСНОВОК	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	99
Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	107

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

LPWAN – Low-Power Wide-Area Network

RSSI – Received Signal Strength Indicator

SNR – Signal-Noise Ratio

PRR – Packet Reception Rate

LoRa – Long-Range

BW – Bandwidth

SF – Spreading Factor CR – Coding Rate

UNB – Ultra Narrow Band

RPMA – Random Phase Multiple Access

AODV – Ad hoc On-Demand Distance

DSR – Dynamic Source Routing

DSDV – Destination-Sequenced Distance Vector

OLSR – Optimized Link State Routing

CSS – Chirp Spread Spectrum

HWMP – Hybrid Wireless Mesh Protocol

GSM – Global System for Mobile Communications

LTE – Long Term Evolution

RFID – Radio-frequency identification

UWB – Ultra-Wide Band

WMN – Wireless Mesh Network

WMSN – Wireless Mesh Sensor Network

WPAN – Wireless Personal Area Network

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

ГШ – Гетерогенний шлюз

IP – Інтернет Речей

КП – Кінцевий пристрій

РМ – Розумне місто

СМО – Система масового обслуговування

ВСТУП

Актуальність теми дослідження В даний час розвиток концепції Інтернету речей (IoT) призвів до появи різних додатків, починаючи від розумних носимих пристроїв і закінчуючи додатками для розумного дому та розумного міста. Збір і передача даних відбувається через інтернет і передбачає можливість віддаленого моніторингу і управління пристроями на базі того чи іншого сервісу. При цьому інформаційно-комунікаційна інфраструктура відіграє важливу роль у забезпеченні підключення пристроїв до мереж зв'язку загального користування.

Базовою основою концепції Інтернету речей є бездротові сенсорні мережі, які представляють собою велику кількість пристроїв, що живляться від батарейок, розподілених на даній території. Подібно до бездротових сенсорних мереж, пристрої IoT здебільшого є мініатюрними пристроями на батарейках, які підключаються до Інтернету безпосередньо або за допомогою шлюзів. Поява цих технологій актуальна в розумних містах з щільною забудовою для забезпечення гарантованої доставки даних. З кожним роком кількість пристроїв, які необхідно підключати до інтернету, значно збільшується. Це тягне за собою необхідність установки додаткових базових станцій, шлюзів або проміжних вузлів для забезпечення підключення кінцевих пристроїв.

Переважна більшість сучасних бездротових сенсорних мереж характеризується обмеженим радіусом дії, що обмежує ефективність передачі даних на великі відстані. З іншого боку, для подолання цієї проблеми були розроблені енергоефективні системи з розширеним покриттям, які забезпечують стабільний зв'язок на значних відстанях, що суттєво підвищує загальну ефективність телекомунікаційної інфраструктури в умовах обмежених енергетичних ресурсів.

У зв'язку з цим вкрай важливо розробити моделі та методи маршрутизації, які можуть збільшити покриття мережі та швидкість доставки пакетів в енергоефективних mesh-мережах великої дальності використовуючи технологію LoRaWan.

Дана робота присвячена аналізу проблем маршрутизації в енергоефективних бездротових мережах з великим радіусом дії. Основна увага приділяється використанню гратчастої (mesh) топології як засобу оптимізації маршрутизації та розширення зони покриття мережі. З огляду на зростаючу потребу в побудові масштабованих та енергоефективних телекомунікаційних систем, результати проведеного дослідження є актуальними та мають практичну значущість для подальшого розвитку технологій бездротового зв'язку.

Аналіз останніх досліджень. Системи передачі даних, а також моделі та методи маршрутизації традиційно залишаються ключовими об'єктами дослідження в галузі телекомунікацій, оскільки від їх ефективності залежить надійність, масштабованість та продуктивність мереж зв'язку. Прикладним дослідженням бездротових сенсорних мереж або мереж, що самоорганізуються, приділяється особлива увага в різних областях. За останнє десятиліття було досягнуто значного прогресу в розвитку технології Інтернету речей, включаючи дослідження бездротових сенсорних мереж та енергоефективних мереж дальнього радіусу дії. Зокрема, вийшла велика кількість праць на цю тему. Серед робіт авторів роботи В.В. Бутенко, В. М. Вишневського, Б.С. Гольдштейна, В.Г. Карташевського, А.Є. Кучеряви, А.І. Ю.В. Гайдамаки, Р.В. Кирика, Є.А. Кучеряви, А.Атея, Дж. Ендрюса, Дж. Араніті, М. Долера, Н. Хімаята, Ф. Бакчеллі, С. Рангана, Т. Раппопорта, С. Сінгх та ін. Їх робота дозволила оцінити можливості енергоефективних мереж дальнього радіусу дії для розумних міст, знайти нові підходи до побудови інфраструктури бездротових мереж Інтернету речей, а також забезпечити якість обслуговування мереж зв'язку IoT.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є енергоефективна сітчаста мережа дальнього радіусу дії.

Предмет дослідження. Предметом даного дослідження є методи маршрутизації.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є збільшення охоплення зони покриття мережі і показника доставки пакетів застосувавши запропоновані моделі та методи маршрутизації.

Для досягнення поставленої мети в роботі послідовно вирішуються такі задачі:

аналізувати енергоефективні магістральні мережі на основі LoRaWAN;
проаналізувати бездротові mesh-мережі і ті протоколи маршрутизації, що в них застосовуються.

синтезувати модель фрагмента дальньої mesh-мережі з високою енергоефективністю та урахуванням особливостей інфраструктури розумних міст;

розробити методику оцінки якості лінії зв'язку взявши за основу комплексний показник підключення, застосувавши машинне навчання;

розробити методику маршрутизації взявши за основу комплексний показник якості з'єднання;

Для розв'язання поставлених у дослідженні задач було застосовано апарат теорії ймовірностей, математичної статистики, теорії графів, теорії масового обслуговування, а також сучасні методи машинного навчання. Застосування зазначених підходів дозволило забезпечити комплексний аналіз процесів маршрутизації та ефективності функціонування бездротових мереж з великою зоною покриття.

1. АНАЛІЗ ВИНИКНЕННЯ І РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МЕРЕЖ ТА MESH-МЕРЕЖ

1.1. Технології бездротової передачі даних для застосунків IoT

Одним із ключових компонентів Інтернету речей (IoT) є технології передачі даних, які забезпечують можливість взаємодії між пристроями, базовими станціями та шлюзами [1–3]. У контексті мереж п'ятого покоління (5G/IMT-2020) більшість IoT-додатків орієнтовані на забезпечення високої швидкості передавання інформації та мінімальних затримок, що критично важливо для задач моніторингу в режимі реального часу та реалізації систем дистанційного керування [4].

Водночас слід враховувати існування широкого спектра IoT-додатків, орієнтованих на довготривалу автономну роботу — зокрема, з терміном експлуатації до 10 років від одного комплекту елементів живлення. У таких випадках пріоритет надається технологіям, які забезпечують низьке енергоспоживання при помірних вимогах до затримки передавання даних та без необхідності постійної взаємодії з кінцевими пристроями в режимі реального часу [5].

Існує низка критеріїв, за якими класифікуються технології передачі даних, що застосовуються в IoT-системах, зокрема дальність дії, мережна топологія, енергоспоживання тощо. Одним із поширених підходів є класифікація за двома основними параметрами: енергоефективність пристроїв (висока або низька) та відстань передавання даних (великий або малий радіус дії). Відповідно до цього підходу, технології можна умовно поділити на чотири основні категорії, що дозволяє адекватно оцінювати їх придатність для конкретних сценаріїв застосування в телекомунікаційних системах IoT.

У період з 2000 по 2010 рік було розроблено безліч технологій бездротової передачі даних, які не були орієнтовані на низьке енергоспоживання. Це наклало відбиток на необхідність частої заміни акумулятора. Крім того, паралельно

розроблялися бездротові сенсорні мережі, що мало на увазі низьке енергоспоживання за рахунок невеликих сеансів зв'язку і переходу в «сплячий» режим. Дальній і малий радіус дії являють собою технології, що дозволяють передавати дані на великі і короткі відстані, забезпечуючи при цьому заданий рівень якості обслуговування (QoS).

Група: Високе енергоспоживання і короткі відстані.

У цю групу входять найбільш відомі технології Wi-Fi і Bluetooth (1.0-4.0). Бездротова мережа Wi-Fi дозволяє пристроям підключатися та обмінюватися інформацією на відстані до 100 метрів. У мережі Wi-Fi використовуються два вільних частотних діапазони: 2,4 ГГц і 5 ГГц. Технологія Wi-Fi забезпечує високу швидкість передачі даних, тому має можливість транслювати відео в режимі реального часу. Технологія Bluetooth дозволяє передавати дані між двома пристроями або між одним і декількома пристроями на невеликій відстані до 15 метрів. Технологія Bluetooth також використовує частотний діапазон 2,4 ГГц.

Обидві технології мають високу пропускну здатність, високу швидкість передачі даних, низьку затримку, але мають невеликий радіус дії. Високі швидкості передачі даних для цих технологій вимагають підвищеного енергоспоживання, тому вони не підходять для додатків, що вимагають економії енергії.

Група: Високе енергоспоживання і великі відстані.

Ця група представлена стільниковими мережами GSM і LTE, які забезпечують міжміський зв'язок. Ці стандарти зв'язку є найбільш поширеними у всьому світі. Спочатку GSM і LTE розроблялися як елементи мереж зв'язку загального користування для надання послуг мобільного зв'язку і не враховували специфіку різних IoT-додатків і, як наслідок, не були адаптовані під трафік, що генерується IoT-пристроями. З появою IoT і різних додатків IoT почалася робота з удосконалення стандартів зв'язку LTE з урахуванням специфіки IoT-трафіку і енергоспоживання. Розробка стандартів LTE для IoT здійснюється на базі консорціуму, який розробляє специфікації для мобільної телефонії 3GPP [4].

Попри активні зусилля, спрямовані на модернізацію стандартів LTE,

технології цього класу й надалі характеризуються підвищеним енергоспоживанням. Це зумовлено наявністю складних процедур сигналізації, автентифікації та захисту даних, які були розроблені з урахуванням вимог традиційних мобільних пристроїв. Однак більшість таких функцій є надмірними для значної частини IoT-додатків, що орієнтовані на обмін невеликими обсягами даних між великою кількістю пристроїв.

Крім того, традиційна стільникова інфраструктура (зокрема LTE) оптимізована для роботи зі смартфонами, планшетами та іншими пристроями з відносно високим енергобюджетом. Це створює суттєві труднощі при адаптації таких мереж до потреб IoT-середовищ, які характеризуються високою щільністю розміщення пристроїв (до кількох тисяч на квадратний кілометр) та обмеженими енергетичними ресурсами кінцевих вузлів.

Група: Низьке енергоспоживання і короткі відстані.

У цю групу входять багато технологій PAN-Personal Area Network, такі як Z-Wave, IEEE 802.15.4, Bluetooth Low Energy (BLE), а також технології RFID, Near Field Communication (NFC) і Ultrawide bandwidth (UWB) [7–9].

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) активно займається стандартизацією технологій бездротового зв'язку, зокрема в контексті Інтернету речей. Одним із ключових стандартів у цій сфері є IEEE 802.15.4, який орієнтований на забезпечення енергоефективної передачі даних у бездротових сенсорних мережах, що становлять основу багатьох IoT-рішень. Стандарт визначає специфікації для фізичного та канального рівнів згідно з еталонною моделлю OSI, акцентуючи увагу на пристроях із наднизьким енергоспоживанням.

Технології, що базуються на IEEE 802.15.4, використовують метод спектрального розширення прямою псевдовипадковою послідовністю (DSSS) у поєднанні з модуляцією за фазовим зсувом у квадратурі (O-QPSK), що дозволяє досягати швидкості передачі даних до 250 кбіт/с. Такий підхід забезпечує компроміс між енергетичною ефективністю, надійністю зв'язку та пропускну здатністю, що робить цей стандарт придатним для широкого спектра IoT-

застосувань.

Серед технологій ближнього радіусу дії, орієнтованих на пристрої з низьким енергоспоживанням, особливе місце займає модернізований стандарт Bluetooth, зокрема версія Bluetooth Low Energy (BLE), що з'явилася починаючи з версії 4.0. Ця технологія спеціально розроблена для IoT-середовищ, де критичними є тривалість автономної роботи пристроїв і зменшення енергетичних витрат. BLE активно використовується для підключення носимої електроніки (wearables) до шлюзів, а також у задачах моніторингу та керування побутовими пристроями. Завдяки широкій підтримці з боку сучасних смартфонів, BLE стала стандартом де-факто для реалізації багатьох мобільних додатків. Технологія базується на модуляції з частотною маніпуляцією за Гауссовим законом (GFSK), забезпечуючи швидкість передачі даних до 3 Мбіт/с та дальність зв'язку до 100 метрів.

Ще одним прикладом технології ближнього поля є Near Field Communication (NFC), яка забезпечує двосторонній обмін даними між пристроями на відстані до 10 см. Вона функціонує в неліцензованому частотному діапазоні 13,56 МГц та забезпечує швидкість передачі від 106 до 424 кбіт/с. Основними сферами застосування NFC є мобільні платежі, ідентифікація та доступ до захищених сервісів.

Іншою перспективною технологією є Ultra-Wideband (UWB), яка функціонує у надширокопasmовому діапазоні з шириною смуги понад 500 МГц. Це дозволяє досягати надвисокої швидкості передачі даних — до 1 Гбіт/с. Проте основним обмеженням UWB є дуже мала дальність дії, яка зазвичай не перевищує 60 см. Через це технологія знаходить застосування переважно в задачах точного позиціонування та ідентифікації об'єктів у безпосередній близькості.

Загалом, проаналізовані технології забезпечують високу енергоефективність, що робить їх придатними для IoT-пристроїв, однак обмежена дальність дії значно звужує сферу їх застосування.

Група мереж такого типу називається LPWAN (Low-Power Wide-Area

Network). Такі мережі з'явилися в останнє десятиліття для задоволення вимог до підключення IoT-пристроїв до мережі. У цю групу входять такі технології, як LoRa, Sigfox, Ingenu, Wiegthless-P, NB-Fi, XNB Open UNB, SNB, NB-IoT та ін. При розробці LPWAN очікується, що дальність покриття мережі може досягати від декількох до десятків кілометрів, а термін служби батареї складе до десяти років [14, 15].

Відповідно до вимог розробки різних додатків IoT, перераховані групи мереж зв'язку розглядалися при розробці і впровадженні сервісів IoT. У наш час фактична кількість пристроїв, які необхідно підключити до мережі, постійно збільшується. Однак існують обмеження, які створюють різні наукові проблеми для дослідників щодо розробки нових протоколів передачі даних на основі існуючої інфраструктури з метою підключення великої кількості пристроїв. Групі енергоефективних мереж дальнього радіусу дії приділяється велика увага, так як вони розглядаються для забезпечення взаємодії низькоорбітального космічного угруповання з наземним сегментом для забезпечення повсюдного покриття. Щоб задовольнити ці вимоги, в цій групі активно розробляються вузькосмугові бездротові технології для IoT. У наступному пункті ми розглянемо передумови виникнення і розвитку таких мереж при розробці додатків і сервісів IoT.

1.2. Перспективні енергоефективні мережі дальнього радіусу дії

Згідно з даними аналітичної компанії IoT Analytics, технологія LPWAN (Low Power Wide Area Network) є найбільш динамічно зростаючим напрямом у сфері IoT-підключень у середньостроковій перспективі. Прогнозується, що середньорічне зростання кількості підключень на основі LPWAN становитиме близько 109%, а до 2023 року їхня загальна кількість перевищить 1 мільярд пристроїв. На поточному етапі розвитку ринку дана технологія все ще перебуває в початковій фазі, що характеризується високим рівнем технологічної фрагментації.

У своєму аналітичному звіті компанія IoT Analytics дослідила 16 LPWAN-технологій і дійшла висновку, що наразі обсяг трафіку, який генерують пристрої, підключені до таких мереж, є недостатнім для суттєвого впливу на загальну структуру трафіку в мережах зв'язку загального користування [7].

1.3. Цілі енергоефективних магістральних мереж

Технології LPWAN (Low Power Wide Area Network) виникли у відповідь на нагальну потребу створення IoT-рішень з низьким енергоспоживанням, здатних передавати дані з датчиків на значні відстані [14]. У 2013 році була запропонована концепція створення глобальної мережі, що охоплює території до кількох десятків кілометрів, зокрема у сільській місцевості. Основною метою розробки таких мереж було забезпечення масштабованого підключення великої кількості сенсорних пристроїв і виконавчих механізмів, розміщених на територіях сільськогосподарського призначення. Згідно з початковими технічними припущеннями, такі мережі є доцільнішими саме у сільських районах завдяки відсутності щільної забудови та наявності умов для передачі даних у межах прямої видимості [9].

Функціонування LPWAN передбачає наявність інфраструктури мережі доступу, яка забезпечується за рахунок встановлення шлюзів або базових станцій, що здійснюють підключення до Інтернету. З метою зниження операційних витрат важливо забезпечити здатність одного шлюзу обслуговувати значну кількість вузлів, розміщених на великій площі. При цьому варто зазначити, що збільшення радіусу покриття не може здійснюватися за рахунок підвищення потужності передавачів, оскільки збереження низького рівня енергоспоживання є критичним для автономної роботи IoT-пристроїв.

Ще однією важливою особливістю LPWAN є використання, здебільшого, неліцензованих частотних діапазонів, що значно знижує вартість розгортання мережі, оскільки використання ліцензованих частот передбачає суттєві фінансові витрати. Очікується, що LPWAN орієнтовані на передавання

невеликих обсягів даних, що робить їх доцільними для впровадження у нових прикладних сферах [8–10], зокрема: «розумні» міста, автоматизовані системи обліку (smart metering), логістика, екологічний моніторинг, системи домашньої автоматизації, безпека тощо.

Від моменту появи перших вузькосмугових бездротових технологій LPWAN стабільно демонструє стрімке зростання, стаючи провідним рішенням для забезпечення широкомасштабного IoT-покриття як у міських, так і в сільських умовах. Широкий спектр застосування цих технологій сприяє відкриттю нових ринкових ніш і розвитку бізнес-рішень у різних галузях. Завдяки порівняно низькій вартості інфраструктури, ринок LPWAN постійно поповнюється новими, більш ефективними технологіями, які впроваджуються у багатьох містах і країнах. До найвідоміших і найбільш поширених рішень у цій сфері належать: LoRa (розроблена компанією Semtech), UNB (Ultra Narrow Band, компанія Sigfox) та RPMA (Random Phase Multiple Access, компанія Ingenu), які знайшли широке застосування як у комерційному, так і в науково-дослідному середовищі.

У контексті еволюції LPWAN була сформульована нова задача, яка змінилася від розширення швидкостей передачі даних до очікуваного зростання числа підключених пристроїв, розташованих з високою щільністю. Дослідження і розробка вузькосмугових бездротових мереж передбачає реалізацію наступних вимог:

- низьке енергоспоживання: дані повинні надсилатися з мінімальною потужністю через короткі проміжки часу;
- низькі витрати на обладнання та інфраструктуру. Однією з ключових переваг технологій LPWAN є мінімізація витрат як на кінцеві пристрої, так і на інфраструктуру мережі. Для забезпечення економічної ефективності кількість базових станцій повинна бути максимально знижена за рахунок великої зони покриття кожної з них. У свою чергу, кінцеві пристрої мають характеризуватися простотою конструкції, низькою вартістю, компактними габаритами та обмеженими обчислювальними можливостями, що забезпечує довготривалу

автономну роботу при мінімальному енергоспоживанні.

- можливість обробки передачі невеликих пакетів;
- масштабованість та можливість взаємодії з дуже великою кількістю вузлів;
- великий радіус покриття мережі.

1.4. Аналіз енергоефективних технологій мереж дальнього радіусу дії

Для вирішення проблеми обмеженого радіуса покриття мереж LPWAN передбачена можливість адаптації параметрів базових станцій з метою забезпечення непрямого зв'язку з кінцевими пристроями [7]. Збільшення радіусу дії базової станції може бути досягнуто за рахунок наступних заходів:

- Оптимізація налаштувань фізичного рівня: застосування схем модуляції та кодування, які підвищують чутливість приймача та забезпечують стійкість до завад.
- Використання антен з високим коефіцієнтом підсилення: дозволяє посилити приймання/передавання сигналу без збільшення енергоспоживання кінцевих пристроїв.
- Покращення розміщення базових станцій: встановлення на підвищених або відкритих місцевостях, що забезпечує покращення умов прямої видимості.
- Використання ретрансляторів або багатоетапної передачі (де це допускається архітектурою мережі): для подолання перешкод або розширення покриття без прямого підключення.

У першому напрямку – розширенні спектру – відомі технології LoRa та Ingenu. Дані надсилаються в набагато більшому діапазоні частот, ніж традиційно. Метод модуляції дозволяє відновити сигнал навіть у тому випадку, якщо його приймальна потужність нижча за мінімальний рівень шуму, адже є можливість забезпечити корекцію помилок за рахунок впровадження механізмів кодування. Крім того, кожен сеанс даних може бути спрямований на різні методи розподілу спектру, які задаються залежно від заданих параметрів. Це дозволяє

контролювати одночасну передачу даних по сусідніх каналах. У напрямку зменшення спектра доцільно розглянути технології Sigfox UNB і NB-IoT. У цих технологіях дані передаються з дуже низькою швидкістю за допомогою простої схеми модуляції, що забезпечує мінімальне використання спектру. Перевага цього методу полягає в тому, що сприйманий шум (після фільтрації сигналу) зменшується, так як він знаходиться в лінійній залежності від заповнюваності спектра сигналу.

Обидва напрямки по-різному вирішують питання збільшення дальності передачі. Sigfox UNB досягає цього завдяки дуже вузькій пропускній здатності, яка спричиняє дуже низький рівень шуму, тоді як LoRa досягає своєї ефективності завдяки застосуванню кодування.

В даний час технології комунікаційних мереж LPWAN включають широкий спектр альтернатив, таких як вузькосмугові технології IoT (NB-IoT), довгострокова еволюція для сумісності машин LTE-M, LoRa з CSS, Sigfox з UNB, Inguenu і Weighless з RPMA. Нижче ми розглянемо технології, які є типовими представниками мереж LPWAN.

Технологія LoRa

LoRa – це технологія бездротового зв'язку, розроблена французькою компанією Cyleo, а потім придбана корпорацією Semtech у 2012 році. LoRa використовує неліцензований діапазон частот ISM 868 МГц у Європі, 912 МГц у Північній та Південній Америці та 433 МГц в Азії [9].

У 2015 році був створений альянс LoRa Alliance, що спеціалізується на розробці протоколу канального рівня LoRaWAN, в основі якого лежить технологія модуляції LoRa на фізичному рівні [6]. Існуючі специфікації для цього протоколу і пов'язаних з ним мереж описують підтримку топології «зірка», що створює ряд недоліків в щільному міському середовищі.

Технологія LTE-M/NB-IoT

Технологія NB-IoT (Narrowband Internet of Things) була стандартизована в межах випуску 13 специфікації 3GPP, оприлюдненого в середині 2016 року. Вона є одним із ключових рішень для підтримки масових IoT-підключень у

стільникових мережах. Однією з важливих переваг NB-IoT є можливість її впровадження поверх існуючої інфраструктури LTE шляхом оновлення програмного забезпечення без необхідності значних капіталовкладень у обладнання.

Розгортання мережі NB-IoT можливе в межах:

одного GSM-носія шириною 200 кГц;

одного фізичного ресурсного блоку LTE (180 кГц);

або в межах захисної смуги LTE [6].

Це обумовлює порівняно вузьку пропускну здатність, що значно менша за відповідні показники для традиційних GSM- і LTE-мереж. У висхідному каналі NB-IoT використовує технологію множинного доступу з поділом по частоті (FDMA), а в низхідному — ортогональний FDMA, що дозволяє мінімізувати завади між каналами. Максимальна швидкість передачі даних становить 250 кбіт/с у низхідному каналі та 20 кбіт/с у висхідному [12].

Історично стільникові мережі працювали в ліцензованому спектрі і були орієнтовані передусім на якісну передачу голосових викликів та мобільного трафіку. Проте для IoT-пристроїв пріоритетними є низьке енергоспоживання та дешева реалізація радіомодуля. З огляду на ці особливості, наявні стандарти LTE виявилися малопридатними для широкомасштабного впровадження IoT. У зв'язку з цим організація 3GPP, яка займається стандартизацією мобільного зв'язку, розробила нові категорії стандарту LTE, адаптовані для IoT [14].

Першим кроком у цьому напрямі став стандарт Cat-0, представлений у випуску 12 як проміжне рішення. Згодом у випуску 13 були затверджені два нові стандарти: Cat-M1 (також позначається як LTE-M або eMTC) і NB-IoT (іноді також згадується як Cat-M2). У Cat-M1 головним нововведенням стало звуження смуги пропускання з 20 МГц до 1,4 МГц, що дозволило зменшити енергоспоживання пристроїв. Крім того, передавальна потужність була знижена до 20 дБм, що усунуло необхідність у використанні зовнішніх підсилювачів потужності. Це дозволило реалізовувати однокристальні рішення, у яких радіомодуль і контролер інтегровані в єдину мікросхему, що позитивно впливає

на вартість виробництва.

Однією з найбільш суттєвих переваг впровадження LTE-M та NB-IoT є можливість їх інтеграції в уже наявну LTE-інфраструктуру без необхідності встановлення додаткових шлюзів. За даними Глобальної асоціації постачальників мобільного обладнання (GSA), станом на сьогодні у світі функціонує понад 480 LTE-мереж, що забезпечує сприятливі умови для швидкого та масштабного розгортання IoT-рішень. Технології LTE-M і NB-IoT розроблені таким чином, щоб бути максимально сумісними з уже розгорнутими стільниковими мережами, забезпечуючи оператору мобільного зв'язку мінімальні витрати на модернізацію — здебільшого достатньо оновлення програмного забезпечення в існуючих LTE- або GSM-мережах..

NB-IoT є відносно новим напрямком у розвитку IoT-рішень в рамках 3GPP, хоча він передбачає тісну сумісність та інтеграцію з LTE. При цьому пропонується використовувати новий тип радіодоступу, характеристики якого істотно відрізняються від характеристик існуючих систем. Кількість пристроїв, що обслуговуються однією базовою станцією, теоретично може досягати 50 тисяч. На думку ряду експертів, редизайн протоколів канального рівня в NB-IoT дозволить значно (до 90%) знизити вартість відповідних пристроїв NB-IoT в порівнянні з пристроями, що використовують LTE категорії M.

Недоліки цих мереж полягають у тому, що для їх роботи потрібен ліцензований спектр частот, тарифи на передачу даних можуть бути високими для низькошвидкісного обладнання, вартість пристроїв, що працюють у стандарті LTE, залишається вищою, ніж у мережах LPWAN тощо. які повинні функціонувати в режимі реального часу.

Технологія Sigfox

SigFox — це вузькосмугова бездротова технологія зв'язку, розроблена французькою компанією SIGFOX з метою забезпечення зв'язку для додатків Інтернету речей (IoT). Найбільше поширення ця технологія отримала на території Європи. SigFox працює на основі ультравузькосмугової (UNB) модуляції з використанням бінарного фазового зсуву (BPSK), який забезпечує

зміну фази несучої хвилі для кодування інформації. Завдяки цьому знижується рівень шуму на приймальному боці, що дозволяє здешевити апаратне забезпечення приймачів [14, 16].

Архітектура мережі SigFox включає три основні компоненти:

IoT-пристрої (сенсори, виконавчі механізми тощо);

базові станції (шлюзи);

хмарний сервер (відповідає за обробку, зберігання та маршрутизацію даних).

Основна концепція технології полягає у централізованій обробці інформації: усі IoT-пристрої підключаються виключно до хмарної платформи SigFox. Альтернативні методи маршрутизації або підключення не передбачені через політику централізованого управління мережею. Передача даних у SigFox виконується за наступною схемою:

IoT-пристрій надсилає повідомлення на найближчу базову станцію за допомогою радіосигналу.

Базова станція здійснює перевірку цілісності пакета, виконує демодуляцію та передає дані до хмари.

Хмарна інфраструктура аутентифікує джерело передачі, визначає одержувача та маршрутизує повідомлення до відповідного клієнтського серверу або IoT-додатку.

Наявна версія стандарту SigFox передбачає такі технічні характеристики:

пропускна здатність — 100 Гц на канал;

швидкість передачі даних — менше ніж 0,1 кбіт/с;

максимальна кількість повідомлень від пристрою — 4 на добу (по 8 байт корисного навантаження);

максимальна кількість повідомлень до пристрою — 140 на добу, кожне розміром до 12 байт (без службової інформації);

робоча смуга пропускання — 200 кГц [96].

Мережа SigFox підтримує два режими функціонування пристроїв:

P2P-режим (peer-to-peer) — пряме підключення між вузлами в межах

локальної мережі (LAN) без залучення базових станцій і транзитного каналу;

гібридний режим (SigFox + P2P) — частина повідомлень передається через базову станцію та хмару, тоді як інші — локально між вузлами.

Завдяки такому підходу гібридний режим дозволяє оптимізувати обсяг переданого трафіку та зменшити вартість експлуатації.

SigFox є доцільним рішенням для односторонніх IoT-додатків, де потрібно періодично передавати малі обсяги даних, зокрема:

- системи сигналізації;

- моніторинг місцезнаходження;

- екологічні сенсори тощо.

Основними недоліками технології є:

- обмеження на кількість повідомлень;

- відсутність гарантованої доставки повідомлень;

обмежена двостороння комунікація, яка на момент написання не є повноцінно реалізованою, хоча активно розробляється виробниками.

Технологія Weightless

Weightless — це відкритий стандарт вузькосмугового зв'язку LPWAN, розроблений спеціалізованою групою Weightless SIG (Special Interest Group) [10]. Стандарт підтримує декілька модифікацій, кожна з яких орієнтована на специфічні сценарії використання:

Weightless-P — двонаправлений зв'язок із частковою підтримкою низхідної лінії;

Weightless-W — призначений для використання в телевізійному діапазоні частот (TV white spaces);

Weightless-N — забезпечує лише висхідну передачу даних, однак характеризується значно ширшою зоною покриття та мінімальним енергоспоживанням.

Особливої уваги заслуговує Weightless-N, який оптимізований для роботи з сенсорними мережами у сфері:

- віддаленого моніторингу температури;

вимірювання рівня заповнення резервуарів;

контролю змін динамічних параметрів навколишнього середовища.

Технологія Weightless-N забезпечує високу енергоефективність, що дає змогу використовувати батарейне живлення впродовж тривалого часу без обслуговування. Як і SigFox, Weightless використовує вузькосмугову передачу даних, однак є відкритим стандартом, що дозволяє виробникам реалізовувати власні рішення без прив'язки до централізованого провайдера послуг.

Weightless-P — це вузькосмугова технологія LPWAN для рішень IoT, яка забезпечує високу щільність кінцевих результатів, тривалий час автономної роботи та двонаправлений зв'язок. Особливостями цієї технології є масштабованість, оптимізація висхідного та низхідного каналів, широке покриття, тривалий час автономної роботи та підвищена безпека. Weightless-P використовує вузький спектр груп модуляції, пропонуючи реалізацію двонаправленої лінії зв'язку з метою забезпечення високої якості обслуговування (QoS).

Weightless-P — це найбільш масштабована субгігагерцова технологія LPWAN. Одна базова станція Weightless-P підтримує більше пристроїв, ніж будь-яка інша технологія LPWAN в діапазоні субгігагерц. Висока пропускна здатність базової станції мінімізує витрати на розгортання.

Можна виділити десять основних характеристик Weightless-P:

- вузькосмугова технологія (12,5 кГц для ширини каналу);
- спектрально ефективна модуляція;
- працює у всьому діапазоні ліцензованих діапазонів частот (без урахування субгігагерцового ISM);
- підтримка роумінгу;
- адаптивна швидкість від 200 до 100 кбіт/с.

Ресурси в субгігагерцовому неліцензованому спектрі обмежені, а трафік з інших технологій неухильно зростає. Тому Weightless-P використовує вузькосмугові канали 12,5 кГц, що дозволяє передавати більше даних, ніж здатні передати інші технології, що працюють в цьому спектрі.

Крім того, Weightless-P підтримує TDMA (Time Division Multiple Access, TDMA) і FDMA (Frequency Division Multiple Access), тобто це синхронна технологія (кожен пристрій і базова станція точно знають, коли передавати і коли отримувати дані). Множинний доступ з часовим поділом – це метод доступу до доступу для локальних мереж середнього розміру. Це дозволяє кільком користувачам використовувати один і той же частотний канал, використовуючи різні часові проміжки для передачі своїх даних. Доступ із множинним поділом каналів — це ще один спосіб доступу до каналу, коли користувачам надається індивідуальний діапазон частот, а кілька користувачів координують доступ. Як тільки кінцевий вузол відправляє дані, базова станція Weightless-P повідомляє кожному пристрою точний час і канал, який потрібно використовувати, щоб уникнути зіткнень і забезпечити успішну доставку важливих даних.

Метод адаптивної швидкості передачі даних забезпечує оптимальну продуктивність мережі та продовжує час автономної роботи кінцевих пристроїв, оскільки регулює фактичну швидкість передачі даних залежно від відстані від кожного вузла до базової станції. Чим ближче кінцеві вузли до базової станції, тим вища швидкість передачі даних. Це призводить до скорочення ефірного часу та зниження вихідної потужності. З іншого боку, вузли, які знаходяться найдалі від базової станції, використовують найнижчу швидкість передачі даних і найвищу вихідну потужність.

Weightless-P підтримує шифрування AES-128/256 і аутентифікацію як терміналу, так і мережі. Він забезпечує пряму корекцію помилок (FEC), запит автоматичної повторної передачі (ARQ), адаптивне кодування схем (ACC), роумінг і повторний вибір стільників. У разі двонаправленого каналу зв'язку підтримується оновлення прошивки та ключа безпеки.

Технологія активно використовується в інтелектуальних вимірюваннях, системах відстеження, діагностиці та модернізації транспортних засобів, моніторингу стану здоров'я, зчитуванні показань датчиків та розумних пристроїв, розумній інфраструктурі для електронних платежів тощо.

Порівняння мереж

Розглянувши існуючі та нові радіотехнології для додатків IoT, неможливо вибрати одну або навіть дві найкращі. Кожна технологія має право на використання в різних сферах застосування, і вибір тієї чи іншої технології безпосередньо залежить від вимог конкретного застосування. Для порівняння цих технологій необхідно враховувати такі параметри:

- обсяг даних: Вам потрібно розуміти, як часто будуть передаватися дані і який обсяг пропускну здатності буде потрібно для їх передачі.
- енергоефективність: необхідно визначити, чи можлива робота від стаціонарного блоку живлення або необхідно зберегти повну автономність пристроїв, яким потрібно буде працювати тривалий час;
- масштабованість: мільйони різних пристроїв повинні працювати паралельно в мережі, масштабування мережі не повинно викликати додаткових труднощів;
- глобальність: потрібне широке територіальне охоплення і, як наслідок, передача інформації на великі відстані;
- проникнення: пристрої, розташовані в підвалах, шахтах, повинні мати можливість передавати сигнал назовні з урахуванням залізобетонних конструкцій;
- вартість пристроїв: пристрої мають бути дешевими та доступними для пересічного споживача, а готові рішення – економічно вигідними для бізнесу;
- простота: принцип «встановив і забув» - користувач завжди вибирає найпростіші і зрозумілі у використанні, а також надійні пристрої;
- безпека: необхідно враховувати можливість підключення пристроїв, задіяних у критично важливих додатках.

Вузькосмугові бездротові мережі зв'язку SigFox, NB-IoT, LTE-M, Weightless-P можуть використовуватися для будь-якого практичного застосування Інтернету речей. Технологія SigFox є чудовим рішенням для більшості додатків IoT, яким не потрібно ділитися великою кількістю даних. Однак істотним мінусом SigFox є відсутність мережевої інфраструктури в різних містах Росії. Найбільшою перевагою Weightless-P є те, що він будується на

інфраструктурі існуючих стільникових мереж; Синхронна мережа забезпечує високу ймовірність успішної першої поставки. Технології, побудовані на основі існуючих стільникових мереж, є майбутнім для всіх додатків, які вимагають високої швидкості передачі даних, але не є критичними для часу автономної роботи. Такими технологіями є NB-IoT, LTE-M. Однак мережі 5G/IMT-2020 передбачають додаткову побудову мережевої інфраструктури, що впливає з особливостей нової технології. Саме завдяки цим особливостям мережі 5G/IMT-2020 є найбільш перспективними на сьогоднішній день. Перевага LTE-M і NB-IoT перед цими рішеннями полягає в тому, що вони можуть використовувати існуючу мережеву інфраструктуру. Дійсно, виробники базових станцій запевняють, що впровадження технологій LTE-M і NB-IoT вимагатиме лише оновлення програмного забезпечення для підтримки останніх випусків стандартів. Як наслідок, вартість розгортання мережі вкрай низька.

Більшість існуючих мереж, про які йшлося вище, використовують топологію «зірка» для зв'язку пристроїв з базовою станцією або шлюзом. У зв'язку з цим постає питання про можливість побудови самоорганізованих вузькосмугових мереж бездротового зв'язку для IoT, що дозволить розширити радіус покриття мережі без підключення додаткових базових станцій. Саме в цьому напрямі досліджень висвітлена дана дисертація.

1.5. Аналіз існуючих технологій mesh-мереж

В даний час широко використовується кілька технологій mesh-мереж для різних сфер застосування. Нижче представлені найпопулярніші конкуруючі технології та протоколи (Wi-Fi, Bluetooth, Thread, ZigBee та Z-Wave) для мереж різного розміру, таких як PAN, WLAN та інші. Розглянемо особливості кожного з них.

Стандарт IEEE 802.11s. Цей стандарт був розроблений як розширення mesh-мережі для традиційних мереж Wi-Fi, що працюють за стандартом IEEE 802.11 [1]. Початкова ідея використання таких мереж полягала в розширенні

покриття мережі Wi-Fi. Хоча специфікація допускає участь будь-якого типу mesh-станції (Mesh STA) в мережі, специфікація не передбачає жодних специфічних умов для додатків IoT з низьким енергоспоживанням. реалізація протоколу маршрутизації HWMP. Крім того, вузол може бути членом або традиційної мережі Wi-Fi, або сітчастої мережі, але не обох одночасно. Це типово, коли mesh-мережі IEEE 802.11 використовуються як ретрансляційні пристрої для передачі трафіку на основі Wi-Fi, а не з'єднують кінцевих користувачів на рівні доступу. Тому mesh-мережі IEEE 802.11s більш актуальні як транспортні мережі і не підходять для підключення IoT-пристроїв.

Bluetooth. Як зазначалося раніше, це один з основних мережевих протоколів IoT і вважається протоколом бездротового зв'язку на короткій відстані, який підтримує режим низького енергоспоживання. В даний час технічні характеристики Bluetooth активно оновлюються. Найбільш останніми версіями BLE є версії 5.x, які підтримують сітчасту топологію побудови мережі [11]. Mesh-мережа BLE має досить низьку пропускну здатність і відносно високу затримку для пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Запропонована мережа використовується для додатків IoT для передачі невеликої кількості даних з датчиків або переносної електроніки (годинників, браслетів і т.д.) [14, 16]. Хоча пропускну здатність між двома вузлами теоретично може досягати 3 Мбіт/с, топологія сітки та базова специфікація значно обмежують пропускну здатність, доступну для одного вузла. Крім того, відстань зв'язку між вузлами становить до 100 м, тому BLE Mesh підходить для IoT-додатків з невеликою площею покриття. Маршрутизація в мережі BLE Mesh заснована на алгоритмі ширококомовної трансляції (затоплення). Таким чином, всі ретрансльовані вузли будуть передавати повідомлення іншим вузлам в межах радіусу дії. Потім приймальні вузли знову ретранслюють повідомлення, якщо вони не отримали його раніше або термін дії повідомлення (TTL) не минув. Це призводить до ширококомовних бур при розсилці службової інформації по мережі, що призводить до деградації самої мережі при великій кількості підключених пристроїв.

Thread. Один з найбільш широко підтримуваних мережесих протоколів. Протокол Thread був розроблений компанією Nest, яка пізніше була придбана Google. Крім Google, зараз в розробці протоколу Thread активно беруть участь кілька великих компаній. Протокол є відкритим мережесим протоколом, він заснований на специфікації IPv6 і широко використовує інші стандартні протоколи IEEE 802.15.4 для підключення на фізичному і каналному рівнях моделі ISO/OSI і 6LoWPAN для маршрутизації по IP мережі.

ZigBee. Спочатку цей протокол був розроблений разом зі стандартом IEEE 802.15.4. Специфікація ZigBee 2004 була вперше опублікована в 2005 році. Поточна специфікація Zigbee 3.0 ґрунтується на всіх попередніх специфікаціях і включає підтримку IP-адресації. Протокол Zigbee використовує стандарт IEEE 802.15.4 для фізичного та каналного рівнів моделі ISO/OSI та профілі Zigbee PRO для верхніх рівнів моделі ISO/OSI для маршрутизації та управління мережею. Метод маршрутизації заснований на відомому протоколі AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [9].

Z-Wave. Один з найпоширеніших протоколів бездротової mesh-мережі, що належить Silicon Labs. Розробкою протоколу займається альянс Z-Wave, який керує сертифікацією та ліцензіями. Мережесий стек Z-Wave схожий на інші аналогічні протоколи, однак є відмінності в окремих рівнях. Фізичний і каналний рівні моделі ISO/OSI Z-Wave використовують канал зв'язку відповідно до Рекомендації ITU-T G.9959. Різниця полягає в тому, що мережі Z-Wave використовують діапазони ISM нижче ГГц, тому діапазон PD може бути довшим у порівнянні з іншими протоколами. Для мереж на основі Z-Wave швидкість PD становить 100/40 кбіт/с у Сполучених Штатах і 100/20 кбіт/с у Європі та інших країнах. Цей протокол використовує маршрутизацію повідомлень від джерела для встановлення топології сітчастої мережі. У мережі є як мінімум один первинний контролер або додаткові вторинні контролери, які мають функціональність маршрутизації та управління безпекою [15].

Порівняння деяких характеристик для розглянутих технологій і протоколів представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння існуючих технологій та протоколів mesh-мереж

Характеристики	Стандарт IEEE 802.11s	BLE Mesh	Z-Wave	ZigBee, Thread (IEEE 802.15.4)
Діапазон	< 100 м	< 50 м	< 50 м	< 100 м
Пропускна здатність	54 Мбіт/с – 1,3 Гбіт/с	125 Кбіт/с – 2 Мбіт/сек	10–100 Кбіт/с	20-250 кбіт/сек
Енергоспоживання	Високий	Низький	Низький	Низький

Як видно з таблиці, за допомогою Zigbee, BLE або Z-Wave два пристрої можуть обмінюватися даними на невеликій відстані. На відміну від цих технологій, інші технології, розглянуті раніше, такі як LoRa або Sigfox, дозволяють здійснювати зв'язок на великі відстані для пристроїв IoT. Крім того, існує різниця в перерахованих технологіях побудови топології мережі: «зірка», «багатострибкова» або «гратчаста». Mesh або multihop топології є альтернативними рішеннями в бездротових сенсорних мережах для розширення покриття мережі без необхідності використання додаткових шлюзів, тому доцільно розглянути підходи до адаптації цієї топології для енергоефективних мереж дальнього радіусу дії.

1.6. Обґрунтування необхідності використання mesh топології в енергоефективних магістральних мережах

За останні 10 років з'явилися нові далекобійні технології з низьким енергоспоживанням, що призвело до швидкого розвитку додатків IoT. Наприклад, дані з датчиків можуть передаватися на великі відстані з енергоефективністю за допомогою технології LoRa. Однак при такому великому діапазоні передачі даних досягти широкого покриття за допомогою зіркоподібної топології все ще складно, якщо шлюз або базова станція встановлені в щільному міському середовищі. Цю проблему можна вирішити за

допомогою установки великої кількості шлюзів. З іншого боку, для забезпечення надійного зв'язку все ще потрібна ретрансляційна мережа з безліччю ретрансляторів, що може забезпечити топологія сітчастої мережі.

У книзі «Wireless Mesh Networks» [14] автори описують бездротову mesh-мережу (WMN), що складається з декількох вузлів з повітряним інтерфейсом, організованих відповідно до топології сітки. У бездротовій mesh-мережі вузли можуть спілкуватися один з одним через інші вузли, на відміну від топології зоряної мережі, де пристрої обмінюються даними через центральний концентратор. Будь-яка бездротова технологія, яка підтримує multicast, може бути використана для створення бездротової mesh-мережі.

Більшість технологій mesh-мереж були розроблені на основі технології PD (personal area networks) малого радіусу дії. З іншого боку, існують програми IoT, які вимагають передачі даних на великі відстані. Комунікаційна мережа на основі технології LoRa з підтримкою сітчастої топології дозволяє реалізувати пересилання даних між вузлами на вузол-одержувач. Використовуючи технологію LoRa в якості фізичного рівня, можна реалізувати енергоефективну сітчасту мережу дальнього радіусу дії.

При впровадженні технологій розумного міста (МС) виникає ряд проблем, пов'язаних із забезпеченням зв'язку кінцевих вузлів цієї системи. Одним з основних завдань є забезпечення високих дальностей передачі даних в міських умовах. Сучасні мобільні мережі погано підходять для завдань передачі невеликих обсягів даних з малопродуктивних обчислювальних пристроїв з підключеними до них датчиками / виконавчими пристроями через високий рівень споживання модулів мобільного зв'язку і великого обсягу сервісного трафіку, що передається по цих мережах. Для підключення пристроїв даного типу до мережевої інфраструктури РМ використовуються енергоефективні мережі дальнього радіусу дії. Дальність передачі даних в мережах LPWAN варіюється від 1 до 10 км в міських умовах, в залежності від потужності приймача-передавача і типу живлення кінцевого вузла. За характеристиками типової базової станції LPWAN в кожній підмережі може працювати до 50 тисяч

кінцевих пристроїв, які одночасно передають дані на контролер зі швидкістю від 0,3 до 37,5 Кбіт/с. Перераховані вище технічні характеристики дозволяють реалізувати на базі цих систем мережу з високою щільністю розміщення КП.

Як зазначалося раніше, в більшості випадків системи LPWAN реалізуються на основі топології зірки [6]. Тим не менш, у тих випадках, коли неможливо забезпечити гарантовано якісне з'єднання між КП та базовою станцією, доцільно використовувати іншу поширену топологію мережі – сітчасту топологію. Така топологія дозволяє організувати мережеве з'єднання не тільки між КП і базовою станцією, але і між КП. Дане рішення теоретично дозволяє збільшити кількість пристроїв в мережі на одну базову станцію і підвищує надійність передачі даних в мережі за рахунок наявності множини маршрутів для доставки даних в пункт призначення.

У більшості випадків КП передають дані пристроям за межами локальної мережі LPWAN. Для вирішення цих завдань використовуються пристрої, звані шлюзами LPWAN, які необхідні для забезпечення взаємодії КП і пристроїв, розташованих у зовнішній мережі. У більшості існуючих систем функції шлюзу і концентратора об'єднані в один пристрій – базову станцію, а обробка даних здійснюється на віддалених серверах. Така конструкція мережі прийнятна, якщо в системі немає жорстких вимог до часу відгуку системи, які досягаються за рахунок скорочення часу доставки та обробки даних. Ця проблема найчастіше вирішується застосуванням двох підходів: організацією локального периферійного або туманного сервера в локальній мережі, або розширенням функціональності мережевого шлюзу LPWAN. Шлюз з розширеною функціональністю називається гетерогенним шлюзом (GS)]. Цей шлюз дозволяє динамічно, в залежності від вимог, додавати нове програмне забезпечення для обробки даних з КП в межах локальної мережі.

Отже, при правильній організації енергоефективної сітчастої мережі дальнього радіусу дії зона покриття мережі може бути розширена. Додавання вузлів можна розглядати як приєднання нової мережі до існуючої мережі, де сполучні вузли стають транзитними вузлами.

1.7. Постановка задачі дослідження

Таким чином, відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати енергоефективні магістральні мережі;
- проаналізувати бездротові mesh-мережі та їх протоколи маршрутизації.
- розробити модель фрагмента енергоефективної дальньої mesh-мережі з урахуванням особливостей інфраструктури розумних міст;
- розробляти методи маршрутизації в LoRaWAN мережах дальнього радіусу дії на основі оцінки комплексного показника якості зв'язку та машинного навчання підсилення.

1.8. Висновки по розділу

1. У цьому розділі ми проаналізували технології бездротових даних для додатків IoT. Зокрема, були розглянуті перспективи розвитку енергоефективних мереж таких як LoRaWAN, які використовуються для забезпечення передачі даних з пристроїв Інтернету речей на великі відстані та з низьким енергоспоживанням.

2. В рамках розділу проведено аналіз розвитку бездротових сенсорних мереж та обмежень LoRaWAN. Зроблено висновок про необхідність реалізації сітчастої топології для ефективної передачі даних у розумних містах у щільній міській забудові. Таке впровадження дозволить збільшити радіус зони обслуговування вузлів в мережі і надійність обміну даними для пристроїв Інтернету речей.

2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗДРОТОВИХ MESH-МЕРЕЖАХ LoRaWAN

2.1. Аналіз міжнародних досліджень маршрутизації в бездротових mesh-мережах

Проектування та розробка протоколів маршрутизації в бездротових mesh-мережах LoRaWAN є важливим завданням при передачі даних між вузлами мережі. Як правило, маршрутизація ґрунтується на певних параметрах, які в загальному випадку пов'язані з продуктивністю мережі, наприклад, мінімальна кількість переходів, наявність помилок у каналі передачі даних, мережеві затримки в каналах зв'язку та інші. У мережах з топологією сітки маршрутизація є однією з ключових функцій для організації ефективної передачі даних між вузлами мережі. Ефективна маршрутизація в mesh-мережах дозволяє кільком десяткам тисяч пристроїв обмінюватися даними без колізій.

Як правило, протоколи маршрутизації поділяються на три типи залежно від інформації топології мережі, яка використовується для побудови маршрутів: проактивні, реактивні та гібридні.

Існує велика кількість досліджень, присвячених розробці ефективної маршрутизації в бездротових сенсорних мережах з топологією сітки. У [4] автори констатують, що протокол AODV показав кращу продуктивність, ніж інші протоколи маршрутизації (DSR, DSDV) зі збільшенням числа вузлів за всіма показниками продуктивності (наскрізна затримка, резервування маршрутизації, кількість прийнятих пакетів, коефіцієнт доставки пакетів, кількість скинутих пакетів). У [9] автори відзначили, що протокол DSR показує хорошу продуктивність при швидкій передачі, але має високу швидкість втрати пакетів. У [6] автори довели, що протокол AODV є більш ефективним з точки зору джиттеру і наскрізної затримки в порівнянні з DYMO (Dynamic Demand-Based Routing Protocol MANET), DSR, OSLR, ZRP.

У [8] Makodia та ін. прийшов до висновку, що AODV рекомендується для

захищеного зв'язку. Крім того, відзначено, що AODV також забезпечує стабільне середнє значення пропускної здатності [10].

На додаток до цих оцінок, протокол OSLR добре підходить для великих мереж з високою щільністю та випадковим трафіком. Однак для розгортання таких мереж потрібно кілька шлюзів для забезпечення великої площі в мережі LoRa. Також варто відзначити, що при аналізі протоколів маршрутизації акцент не буде робитися на підбір ретрансляційних вузлів і оновлення топологічної інформації по [6]. Хоча DSDV менш вимоглива до ресурсів управління, ніж OLSR [7], статичні вузли не вимагають постійних оновлень, як у типових сценаріях розгортання LoRa, завдяки тому, що розташування вузлів залишається незмінним.

Оскільки реактивні протоколи вимагають, щоб інформація про накладні витрати топології надсилалася лише тоді, коли маршрути змінюються або потрібно створити новий маршрут, вони дозволяють знизити витрати на управління і, отже, споживання енергії порівняно з проактивними протоколами.

2.2. Протоколи реактивної маршрутизації

Протоколи реактивної маршрутизації характеризуються тим, що будують маршрути на інші вузли тільки тоді, коли вони потрібні. Процес пошуку та побудова маршруту виконується, коли вузол хоче встановити з'єднання з іншим вузлом, про який у нього немає інформації про можливі маршрути в таблиці маршрутизації [4, 6]. Такі протоколи відрізняються від проактивних протоколів тим, що маршрут між двома вузлами визначається тільки за запитами на передачу даних. Крім того, час зберігання інформації про маршрут в пам'яті обмежений, тому виникає додаткова необхідність чекати маршруту, якщо цей час минув раніше. Прикладами таких протоколів є AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) і DSR (Dynamic Source Routing).

Dynamic Vector Remote Routing on Demand (AODV) – це протокол маршрутизації за запитом, оскільки маршрут до пункту призначення

визначається лише тоді, коли вузол хоче надіслати дані цьому пункту призначення [3, 6]. У цьому випадку вузол-відправник відправляє своїм сусідам запит Route Request (RREQ) для отримання інформації про маршрут. Сусіди відправляють запит сусідам до тих пір, поки запит не дійде до проміжного вузла, який має необхідну інформацію про маршрут до пункту призначення, або поки запит не дійде до вузла призначення.

Якщо сусідні вузли отримують пакет із запитом, то подальші вхідні пакети відкидаються. Крім того, номер послідовності фіксується в полі пакета запитів, щоб гарантувати, що маршрути не зациклюються, а відповіді проміжного вузла на запити маршрутів є найновішими. Для побудови зворотного шляху для відповіді на запити до вузла відправника записується вузол, від якого запит надійшов першим. Коли пакет відповіді з маршрутом повертається до вузла-відправника, вузли вздовж шляху записують маршрут у свої таблиці маршрутизації. У випадку, якщо вузли переміщуються, вузли-відправники можуть повторно ініціювати запит маршруту до вузла призначення. Якщо один з проміжних вузлів переміщається, то сусідні вузли, які знаходяться поблизу, генерують повідомлення про відмову каналу і відправляють повідомлення своїм сусідам у напрямку вгору, і так до тих пір, поки воно не дійде до вузла призначення. У тому випадку, якщо мобільність вузлів збільшується, збільшуються і запити на генерацію таблиць маршрутизації.

DSR Dynamic Routing Protocol – це протокол маршрутизації, запропонований спеціально для використання в багаторівневих мобільних однорангових мережах. Для цього протоколу є дві фази для виявлення та обслуговування маршруту, тобто ці дві фази допомагають вузлам знаходити та зберігати найкращі початкові маршрути до місця призначення. Оригінальна маршрутизація – це безпетльова маршрутизація, при якій проміжним вузлам не потрібна будь-яка актуальна інформація про маршрутизацію, що дозволяє вузлам кешувати інформацію маршрутизації для подальшого використання [4]. Кожен вузол відстежує вміст пакетів, щоб отримати інформацію про маршрут від джерела та пересилає її на основі цієї інформації. Якщо інформація про

маршрут не знайдена в пакеті, він надасть оригінальний маршрут. Коли пункт призначення невідомий, вузол кешує пакет і знаходить інформацію про маршрут до пункту призначення, відправляючи запити на маршрут всім сусіднім вузлам. Потім він надсилає Route-Replies назад до джерела [7].

2.3. Проактивні протоколи маршрутизації

Для протоколів проактивної маршрутизації характерно, що інформація про зміну топології періодично надсилається між усіма вузлами мережі [4]. На основі цієї накладної інформації формується попередня таблиця маршрутизації для кожного вузла. Таким чином, протокол проактивної маршрутизації не дозволяє виявити маршрут, оскільки маршрут призначення зберігається та підтримується в таблиці. Таблиці маршрутизації потрібно періодично оновлювати. Проактивні протоколи використовуються там, де поширені вимоги до маршруту. Однак недоліком цих протоколів є те, що вони забезпечують тривалий час конвергенції для різних додатків [7]. Приклади проактивних протоколів включають деякі протоколи, такі як DSDV (вектор послідовності відстаней призначення), OLSR (оптимізована маршрутизація станів з'єднання).

В основу протоколу векторної маршрутизації послідовних відстаней DSDV лежав розподілений алгоритм Беллмана-Форда [9]. Згідно з цим протоколом, кожен маршрут маркується порядковим номером, який надходить з пункту призначення, який вказує на так званий вік маршруту [13]. Порядковий номер використовується для того, щоб відрізнити застарілі маршрути від нових і таким чином уникнути циклів. Вузли періодично передають свої таблиці маршрутизації найближчим сусідам. Вузли також проходять у своїй таблиці маршрутизації, якщо вона зазнала значних змін у порівнянні з останнім надісланим оновленням. Таким чином, оновлення відбувається як за часом, так і за подіями. Щоб уникнути коливань в оновленнях маршруту, DSDV використовує дані "settle-time", які використовуються для прогнозування, коли маршрут стане стабільним. Інформація про збій того чи іншого маршруту може

бути виявлена, якщо протягом деякого часу від колишнього сусіда не надходило розсилальних пакетів. Усі вузли намагаються знайти можливі шляхи до вузлів призначення та підрахувати кількість переходів до кожного пункту призначення, а потім зберегти їх у своїх таблицях маршрутизації. Трансляції нових маршрутів містять адресу пункту призначення, кількість переходів для досягнення пункту призначення, порядковий номер отриманої інформації про пункт призначення та новий унікальний порядковий номер для трансляції нового маршруту.

2.4. Гібридні протоколи маршрутизації

Гібридна маршрутизація виникла на стику проактивної та реактивної з метою зменшення накладних витрат на процес маршрутизації і, як наслідок, зменшення затримки передачі даних. Перевагами цих протоколів є більш висока ефективність і масштабованість. Однак явним недоліком є висока затримка у виявленні нових маршрутів [8]. Прикладом може служити протокол зональної маршрутизації (ZRP).

Протокол ZRP поєднує в собі переваги як проактивних, так і реактивних протоколів. Для виявлення маршруту протоколи реактивної маршрутизації мають тривалу затримку запиту маршруту та неефективний розподіл пакетів, тоді як протоколи проактивної маршрутизації використовують надлишкову пропускну здатність для передачі інформації про маршрут. Протокол ZRP використовується для вирішення цих проблем шляхом поєднання переваг проактивного та реактивного протоколів. За допомогою ZRP мережа фактично розділена на кілька локальних зон вузлів, де в межах зони використовується протокол проактивної маршрутизації, а між зонами використовується протокол реактивної маршрутизації.

2.5. Висновки по розділу

Маршрутизація в бездротових мережах IoT: особливості та виклики. Однією з ключових задач у бездротових mesh-мережах є ефективна організація процесу маршрутизації. Це завдання має фундаментальне значення для забезпечення гарантованої доставки даних від вузла-джерела до вузла-призначення з мінімальним часом відновлення маршруту у разі його порушення. Особливо це важливо для систем, які працюють у реальному часі або в умовах обмежених ресурсів, зокрема в середовищах з частими змінами топології.

Маршрутизація в таких мережах може здійснюватися за двома основними підходами, які визначають тип використовуваного маршрутизуючого протоколу:

проактивна (table-driven) маршрутизація — передбачає постійне оновлення таблиць маршрутів у кожному вузлі, незалежно від потреби у передачі даних. Це забезпечує швидкий доступ до інформації про шляхи, але призводить до збільшеного трафіку службових повідомлень і витрат енергії;

реактивна (on-demand) маршрутизація — ініціює пошук маршруту лише у разі потреби передачі даних, що знижує енергоспоживання та навантаження на мережу, проте викликає затримки на етапі встановлення з'єднання.

Вибір оптимального маршруту здійснюється з урахуванням метрики мінімальної кількості проміжних вузлів (repeaters), яка дозволяє зменшити загальну затримку та споживання енергії в мережі.

Разом з тим, для забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS) у системах Інтернету речей, необхідно враховувати також такі критично важливі параметри, як:

затримка передавання (latency);

втрати пакетів (packet loss);

навантаження на мережу;

надійність каналів зв'язку.

Ці чинники мають особливе значення в контексті енергоефективних LPWAN-рішень, таких як LoRaWAN, які дедалі частіше впроваджуються в

умовах щільної міської забудови, де можливі значні перешкоди поширенню радіосигналу.

З огляду на описані обмеження, постає актуальна задача адаптації методів маршрутизації до особливостей далекомагістральних LPWAN-мереж, які зазвичай мають топологію типу «зірка». У таких мережах традиційні протоколи маршрутизації є неефективними або надмірно складними. Тому доцільно розглядати використання альтернативних методів маршрутизації або гібридних схем, що дозволяють забезпечити заданий рівень QoS при мінімальному енергоспоживанні та з урахуванням фізичних характеристик середовища.

3. СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В LoRaWAN МЕРЕЖАХ

3.1. Гібридні mesh-мережі як елемент мережевої інфраструктури IoT-пристроїв у розумних містах

У сучасних умовах активне впровадження концепції Інтернету речей (IoT), а також цифрових технологій у промисловість сприяє розвитку четвертої промислової революції (Industry 4.0) [8, 11]. IoT-додатки впроваджуються в різних сферах діяльності, забезпечуючи не лише можливість віддаленого моніторингу, а й дистанційного керування технічними об'єктами [16]. Обробка даних, отриманих від численних пристроїв, формує великі масиви даних, які можна використовувати для створення додаткових сервісів і підвищення ефективності обслуговування.

Однією з ключових сфер застосування IoT є розвиток інфраструктури розумних міст, для яких висувуються особливі вимоги до технологій передачі даних: широке покриття, безперервність зв'язку між зонами, а також зручне та надійне підключення пристроїв [15]. Аналіз сучасних технологій (див. главу 1) засвідчує, що серед найпоширеніших засобів бездротової передачі даних у середовищі розумного міста є такі протоколи та технології, як ZigBee, Bluetooth Low Energy (BLE), LoRa, Sigfox і Z-Wave. Їхніми спільними рисами є низьке енергоспоживання та обмежена швидкість передачі даних.

Інтеграція технологій передачі даних в інфраструктуру міста супроводжується проблемами забезпечення гарантованого зв'язку між кінцевими пристроями. У цьому контексті доцільним є використання гібридної бездротової mesh-мережі, яка дозволяє побудувати енергоефективні системи великого радіусу дії, що здійснюють ретрансляцію даних між мережами малого радіусу за допомогою сітчастих або багатозіркових топологій.

Згідно з рекомендацією ITU-T Y.4903/L.1603, інфраструктура розумного міста повинна включати мережу доступу з повним покриттям, здатну

забезпечити надання широкого спектра послуг для підвищення якості життя громадян [2]. При цьому конкретні технології широкосмугового або вузькосмугового доступу в документі не визначено. Усі існуючі технології мають власні переваги та обмеження, а отже, не можуть вважатися універсальними рішеннями для всіх сценаріїв використання IoT. Більшість IoT-пристроїв є автономними модулями з живленням від батарей, що актуалізує необхідність розробки технологій та архітектур мереж, орієнтованих на енергоощадність.

У зв'язку з цим актуальним є підхід до організації mesh- або multi-hop-з'єднання між IoT-пристроями, які функціонують в умовах міського середовища. Як правило, термінальні пристрої (датчики, виконавчі механізми) підключаються до інтернету через шлюз. Це малопотужні пристрої на базі мікроконтролерів, які безпосередньо працюють із сенсорами або виконавчими елементами [7, 8].

Запропонована гібридна мережева архітектура для системи розумного міста (рис. 3.1) складається з двох рівнів. Перший рівень – це бездротова сенсорна мережа, яка забезпечує багатоканальний зв'язок між вузлами та може функціонувати як автономна підмережа. Зібрані дані передаються через шлюзи до системи обробки або користувача. Для побудови першого рівня доцільно використовувати LoRa-меш-мережу, що забезпечує високу енергоефективність. Також передбачається можливість використання інших технологій зв'язку (Wi-Fi, BLE), реалізованих на одному апаратному модулі, що підвищує універсальність системи. Наприклад, плата TTGO LoRa32 дозволяє реалізувати одночасно інтерфейси LoRa, Wi-Fi та BLE 4.1.

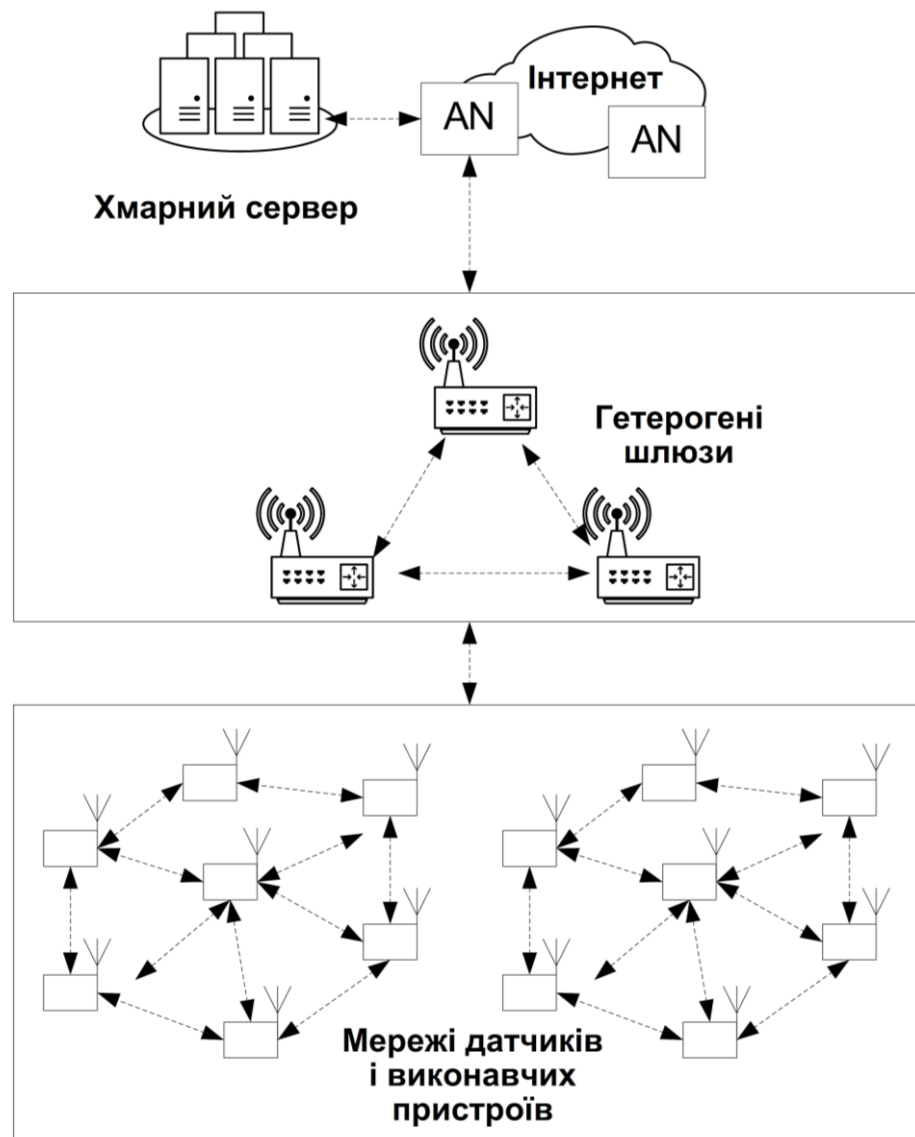


Рисунок 3.1 – Гібридні мережі в системі розумного міста

Другий рівень являє собою мережу різнорідних шлюзів. Організація мережевої ієрархії може бути спрощена за рахунок використання спеціальних модулів, що поєднують в собі функції комутатора, шлюзу і периферійної платформи розумного міста, які називаються гетерогенними шлюзами (GS), визначеними в рекомендаціях ITU-T Q.4060 «Test Framework for Heterogeneous IoT gateways in a Laboratory Environment» [4] і Q.3055 «Signaling Protocol for Heterogeneous IoT Gateways» [3]. GS можна використовувати в гібридній мережі лише за наявності мережевого інтерфейсу, який підтримує технології зв'язку для цієї мережі та реалізує всі функції, характерні для концентратора, шлюзу та периферійної платформи. Всі описані можливості можуть бути реалізовані за

допомогою спеціального програмного забезпечення, яке працює на рівні сервісу і додатків операційної системи. На рис. 3.2 показано, що традиційна ієрархічна структура мережі використовує шлюзи та/або базові станції та служби периферії/туману між кінцевою мережею та хмарними службами]. Таким чином, периферійні служби можуть бути інтегровані за допомогою гетерогенних шлюзів.



Рисунок 3.2 – Ієрархічна структура мережі

З цих рисунків можна побачити, що існує два основних рівні для управління мережами датчиків і виконавчих механізмів, розгорнутих в розумних містах. Хмарні сервіси та периферійні/туманні послуги надаються для збору та аналізу даних з пристроїв IoT.

3.2. LoRa, як технологія передавання даних

Як правило для додатків Інтернету речей (IoT) можна виокремити дві

основні бізнес-моделі:

продаж апаратного забезпечення та комплектуючих для створення IoT-пристроїв;

надання послуг за моделлю підписки в рамках концепції IoT [11].

Одним із провідних виробників апаратних компонентів є компанія Semtech, яка спеціалізується, зокрема, на виробництві чіпсетів з підтримкою технології LoRa [7]. Використовуючи радіомодулі LoRa, можна розгорнути власну бездротову мережу у неліцензійному діапазоні частот, що є особливо доцільним для локальних або експериментальних застосувань [9].

Проте у випадку побудови мереж із великою кількістю підключених пристроїв доцільно розглядати варіанти глобальних комп'ютерних мереж, які охоплюють великі території та включають велику кількість вузлів.

У 2015 році з метою стандартизації протоколів та сприяння розвитку екосистеми LoRa було створено LoRa Alliance — міжнародне об'єднання, яке займається розробкою специфікацій для протоколу канального рівня LoRaWAN. Цей протокол використовує фізичний рівень модуляції LoRa та передбачає використання топології типу «зірка», що, попри простоту, має низку обмежень, зокрема в масштабованості та відмовостійкості.

Нижче розглядаються ключові технічні характеристики технології LoRa, які впливають як на функціонування мережі, так і на параметри захисту та ефективності передавання даних.

Основні параметри налаштування LoRa:

1. Модуляція.

На фізичному рівні LoRa застосовує метод модуляції із широким спектром сигналу типу Chirp (CSS – Chirp Spread Spectrum). Такий підхід забезпечує високу стійкість до завад, збільшений бюджет каналу, а також стійкість до доплерівських зсувів і багатопроменевого загасання.

2. Частотний діапазон.

LoRa працює в неліцензійних частотних діапазонах, зокрема в смугах ISM (наприклад, 868 МГц в Європі та 915 МГц у США).

3. Ширина смуги пропускання (BW).

Технологія підтримує ширину смуги 125, 250 або 500 кГц. Вона безпосередньо впливає на швидкість передачі даних: зі зростанням BW збільшується швидкість, але зменшується дальність дії.

4. Коефіцієнт розширення спектру (SF, Spreading Factor).

SF визначає кількість бітів, які можуть бути закодовані в одному символі. Доступні значення SF — від 7 до 12. Зі збільшенням SF зростає дальність зв'язку та чутливість, проте зменшується швидкість передачі даних.

Для передавання одного символу потрібно 2^{SF} чіпів, тобто чим більший SF, тим повільніше передається інформація.

5. Швидкість кодування (CR, Coding Rate).

Для підвищення надійності передачі використовується механізм прямої корекції помилок (FEC – Forward Error Correction). CR задається як відношення k/n , де k — кількість інформаційних бітів, а n — загальна кількість бітів після кодування. У LoRa підтримуються такі значення CR: 4/5, 4/6, 4/7 і 4/8. Чим менше значення k/n , тим більше надлишкових бітів додається для корекції, що знижує швидкість передачі, але підвищує стійкість до помилок.

Таким чином, параметри SF, BW і CR повинні бути підібрані з урахуванням специфіки застосування: вимог до дальності зв'язку, пропускну здатності, енергоефективності та завадостійкості. Відповідна конфігурація дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю та надійністю мережі LoRaWAN.

Співвідношення між SF, BW, CR визначає DR (швидкість передачі даних):

$$DR = SF \frac{BW}{2^{SF}} CR, \text{ где } \begin{cases} SF = \{7, 8, 9, 10\}; \\ BW = \{125, 250, 500\}, \text{ кГц}; \\ CR = \{4/5, 4/6, 4/7, 4/8\}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Велике значення BW збільшує DR, але знижує чутливість до декодування. Високий SF збільшує чутливість декодування, але знижує DR. Тому при низькому BW і високому SF чутливість декодування і дальність передачі збільшуються, а DR зменшується. Залежно від вимог до ПД конкретного IoT-додатку, ця комбінація параметрів може бути змінена.

У контексті розумних сталих міст існують додатки на основі цієї технології, наприклад, для моніторингу наповнення сміттєвих баків, якості питної води, а також контролю вуличного освітлення. Крім того, [7] пропонує додатки для відстеження та позиціонування міської інфраструктури на базі мереж LoRaWAN. Серед додатків можна виділити ті, для яких затримка в доставці даних є дуже критичним параметром, а також додатки, які добре переносять затримку мережі (наприклад, показання лічильників, які потрібно доставляти на сервер раз на місяць).

3.3. Структура mesh мережі LoRaWAN в рамках системи розумного міста

Мережі LoRaWAN складаються з наступних елементів [61]:

- Кінцеві вузли (KB) — це низькопродуктивні обчислювальні пристрої, які використовуються для взаємодії з датчиками та/або підключеними до них виконавчими елементами;
- Концентратори або роутери – пристрої, які виконують роль роутера в цих мережах;
- шлюз – пристрої, які приймають і витягують корисні дані з пакетів у форматі мережі LoRaWAN з подальшою їх інкапсуляцією і відправкою в цільову мережу (найчастіше інтернет).

У своєму класичному вигляді ця мережа підтримує топологію «зірка», де багато КП підключені до одного центрального пристрою (ЦП), який діє як шлюз і концентратор. Група ЦП може бути об'єднана за допомогою зовнішніх мережевих технологій, таких як IP, в єдину мережу, що дозволяє їм

обмінюватися даними один з одним. Структура цієї мережі показана на рисунку 3.6.

Тим не менш, вже існують рішення, які підтримують топологію сітчастої мережі, в якій КП можуть взаємодіяти не тільки з концентратором/шлюзом, але й один з одним. Також в рамках даного рішення одна мережа LoRaWAN може включати в себе кілька хабів, які виконують завдання маршрутизації даних від найближчих вузлів і зв'язуються один з одним за допомогою протоколу, що використовується в цій LoRaWAN локальній мережі. Однак функція динамічної сітчастої маршрутизації в LoRaWAN є експериментальною через високі вимоги до пропускної здатності через великий обсяг накладного трафіку. Більш поширеними є системи LoRaWAN з попередньо налаштованими таблицями маршрутизації для кожного з КП. Ці таблиці можуть генеруватися як вручну розробниками або адміністратором мережі, так і одним хабом у локальній мережі. Така структура мережі показана на рисунку 3.3а.

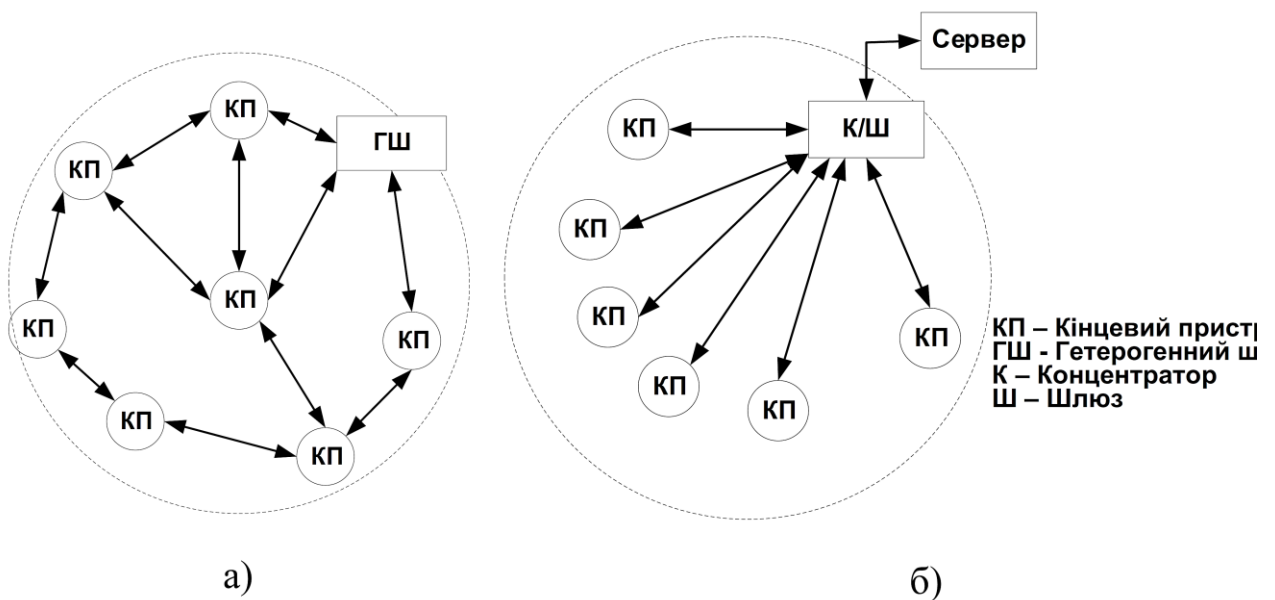


Рисунок 3.3 – Структура мережі LoRaWAN для: а) топології «зірка»; б) комірчата топологія

На підставі проведеного аналізу ПАК або самостійно приймає рішення про подальшу експлуатацію системи РМ, або, якщо ситуація є достатньо критичною,

передає інформацію та рекомендації щодо вирішення цієї проблеми оператору системи РМ. Для передачі даних по мережах оператора зв'язку (ОЗ), що забезпечує інфраструктуру для системи, використовуються спеціальні пристрої, які виступають в якості точки приєднання до мережі оператора зв'язку. Структура мережі LoRaWAN в рамках системи UG показана на рисунку 3.4.

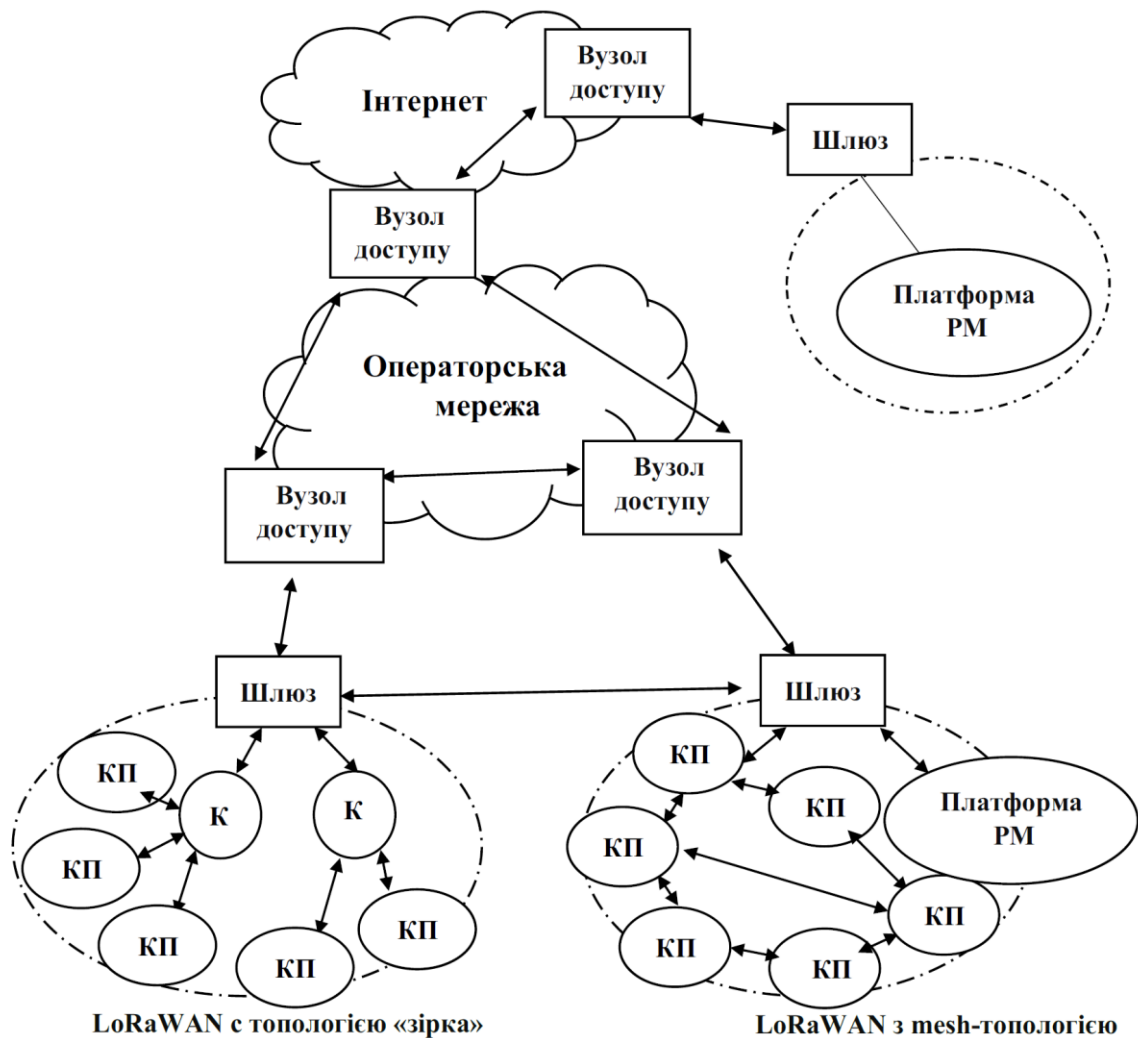


Рисунок 3.4 – Структура функціонування мережі в рамках системи розумного міста

Крім того, структура мережі може бути представлена як ієрархічно, так і відповідно до моделі мережі OSI, як показано на рисунку 3.5.

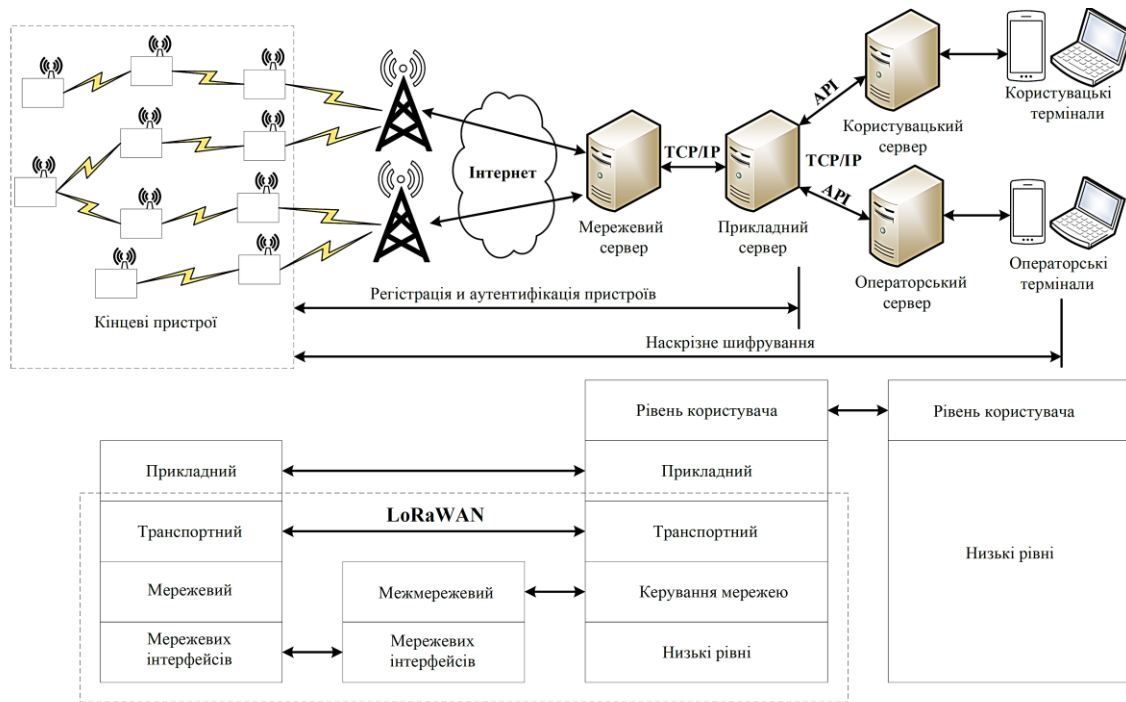


Рисунок 3.5 – Ієрархічна архітектура енергоефективної мережі дальнього радіусу дії

Для спрощення структури мережі LoRaWAN і зниження витрат на реалізацію ряду пристроїв пропонується реалізувати пристрій, що поєднує в собі функції концентратора, шлюзу і периферійної платформи за допомогою гетерогенних шлюзів IoT, визначених в Рекомендації ITU-T Q.4060[4] і Q.3055 [3]. Гетерогенний шлюз IoT (GS) – це апаратно-програмний комплекс, який перетворює як фізичні, каналні та мережеві протоколи рівня, використовуючи існуючі мережеві інтерфейси, так і протоколи прикладного рівня та формати корисного навантаження за допомогою семантичного шлюзу IoT. Семантичний шлюз (СШ) — це програмне забезпечення, яке працює в гетерогенному шлюзі та перетворює протоколи додатків IoT і формати корисного навантаження один в одного. GS включає в себе багатозадачну ОС, яка має достатньо обчислювальних ресурсів для запуску систем віртуалізації/емуляції для робочого простору користувача (наприклад, контейнери в операційних системах на базі Linux). Хоча продуктивність програмного забезпечення, що використовується в середовищах віртуалізації/емуляції, дещо знизилася в порівнянні з роботою на основній ОС, така структура дозволяє динамічно додавати та оновлювати нові програми та

служби на даному пристрої.

GS може використовуватися в мережах LoRaWAN тільки за наявності мережевого інтерфейсу, який підтримує технологію обміну мережевою інформацією та реалізує всі функції, характерні для концентратора, шлюзу та периферійної платформи. Всі описані функції можуть бути реалізовані за допомогою програмного забезпечення, що функціонує у віртуальному робочому просторі користувача. На рис. 3.6 показана структура мережі LoRaWAN, яка включає гетерогенний шлюз для маршрутизації, обробки країв і подальшої відправки мережевих пакетів з пристроїв LoRaWAN в цільову мережу.

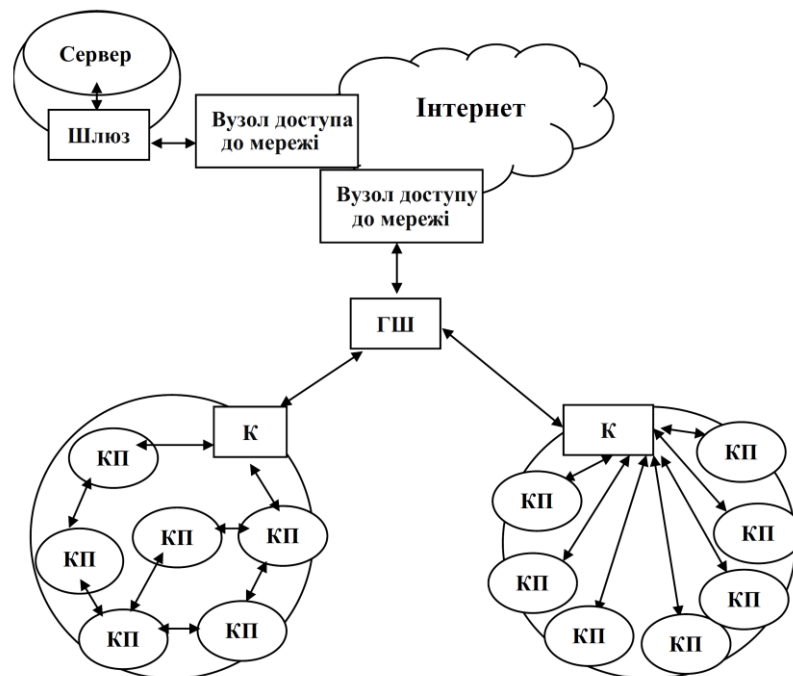


Рисунок 3.6 – Структура мережі LoRaWAN з використанням GS

Таким чином, для енергоефективних mesh-мереж дальнього радіусу дії можна виокремити кілька типів мережевих топологій, які здатні забезпечити різні рівні масштабованості, надійності та ефективності обміну даними.

Топологія «зірка» (Star Topology).

У цій конфігурації центральну роль виконує шлюз або базова станція, яка здійснює управління всією мережею та забезпечує прямий зв'язок з усіма кінцевими пристроями. Як зображено на рис. 3.7, усі вузли надсилають свої дані

безпосередньо до шлюзу, що концентрує трафік.

Ця модель характерна для класичної архітектури LoRaWAN, оскільки вона спрощує розгортання та зменшує затрати на маршрутизацію. Однак у контексті розумних міст, де присутня складна забудова, велика кількість пристроїв і високі вимоги до надійності зв'язку, топологія типу «зірка» є малоефективною. Обмеження цієї архітектури включають погану масштабованість, високу залежність від центрального вузла та потенційну втрату зв'язку в умовах перешкод або перевантаження каналу.

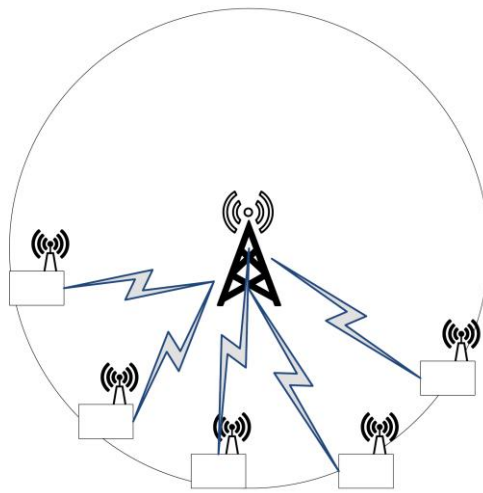


Рисунок 3.7 – Топологія зірки

Топологія комірок між шлюзами (Gateway-to-Gateway Mesh Topology).

Цей тип топології, представлений на рис. 3.8, передбачає ґратчасту (mesh) структуру з'єднання між шлюзами, що дозволяє істотно розширити зону покриття мережі. Шлюзи розміщуються в різних географічних точках із урахуванням низки параметрів, таких як щільність розміщення кінцевих пристроїв, особливості місцевого рельєфу, наявність перешкод, а також характеристики середовища передачі сигналу.

Для забезпечення ефективної маршрутизації принаймні один зі шлюзів повинен мати пряме з'єднання з глобальною мережею Інтернет. Решта шлюзів у мережі функціонують як ретранслятори, формуючи декілька маршрутів для передавання даних від кінцевих пристроїв до центрального вузла. Це підвищує

надійність, гнучкість та масштабованість мережі, а також дозволяє забезпечити зв'язок у випадку відмови окремих елементів інфраструктури.

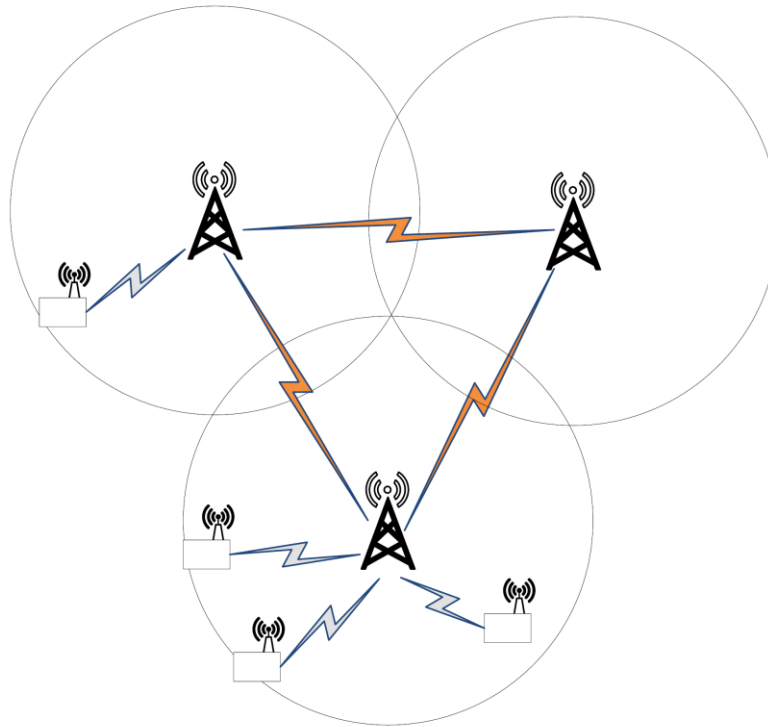


Рисунок 3.8 – Гратчаста мережа між шлюзами

Топологія ґратки між кінцевими вузлами. Ця топологія може використовуватися, коли кінцеві пристрої знаходяться поза зоною досяжності шлюзу. Вузли можуть стати ретрансляторами для перенаправлення даних між вузлами (рис. 9).

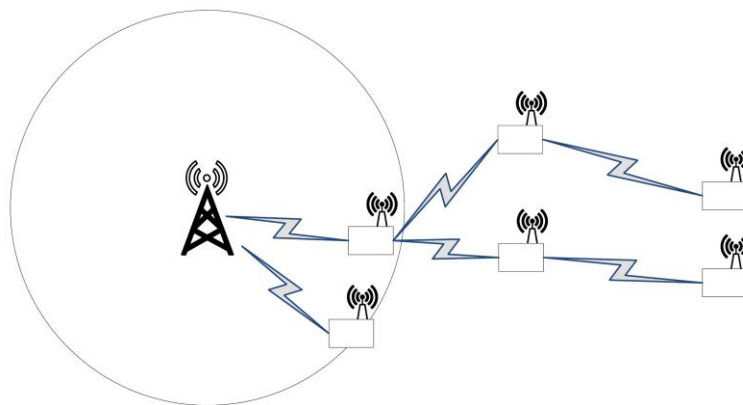


Рисунок 3.9 – Сітчаста мережа між кінцевими вузлами

Комбінована топологія ґратки між шлюзами та кінцевими вузлами. Ця топологія використовується для організації одночасної взаємодії між шлюзовими мережами, а також кінцевими вузлами (рис. 3.10).

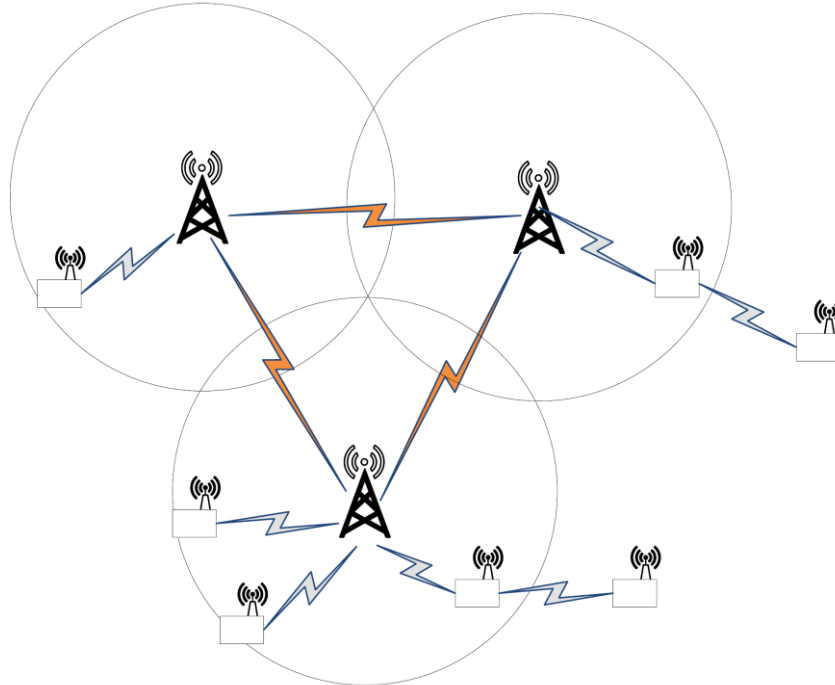


Рисунок 3.10 – Сітчасті мережі між шлюзами та кінцевими вузлами

3.4. Аналітичні та імітаційні моделі

На основі запропонованої структури можна описати роботу імітаційної моделі, яка може бути використана для вивчення властивостей запропонованої мережі за різними параметрами (наприклад, час обслуговування повідомлень, об'єм переданих корисних даних за одиницю часу, енергоспоживання пристроїв в мережі тощо) і моделі, з якою буде порівнюватися модель, що включає в себе гетерогенний шлюз. На рис. 3.11а показана багатоланкова передача між кінцевими вузлами до гетерогенного шлюзу. Кожен вузол розглядається як система масового обслуговування. У цьому випадку ГШ використовується для обслуговування mesh/багатоланкових мереж. Крім того, на рисунку 3.11б показана модель зв'язку між кінцевими вузлами через концентратор/шлюз до прикордонного сервера. Ця модель являє собою пряме з'єднання між кінцевими

вузлами та концентратором/шлюзом у моделі топології «зірка». У цій традиційній конструкції для обробки даних на периферії використовується додатковий сервер.

При розробці даної моделі необхідно враховувати особливості функціонування пристроїв LPWAN. Для цього була розроблена модельна мережа, що складається з кінцевого вузла LoRaWAN – плати розробника CubeCell (рисунок 3.12а) та шлюзу Dragino LG02 (рисунок 3.12б). За допомогою цих пристроїв вимірювалася інтенсивність прийому повідомлень без використання програмної затримки для кінцевого пристрою і інтенсивність обслуговування повідомлень на шлюзі. Кінцеві вузли безперервно надсилають 30-байтовий пакет даних.

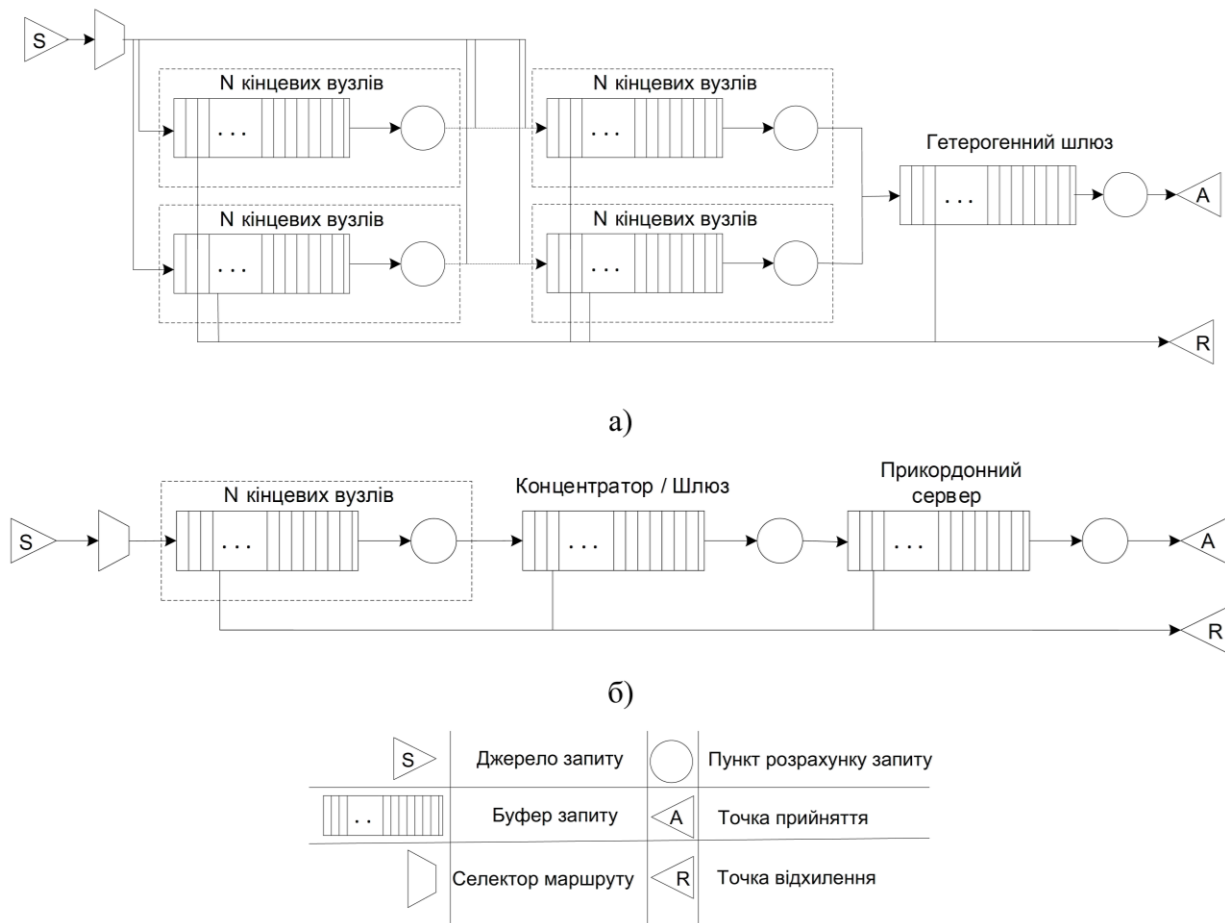


Рисунок 3.11 – Структура імітаційної моделі мережі: а) з ГШ; б) без ГШ

Для трансиверів LoRa налаштовуються такі параметри:

- робоча частота = 868 МГц;

- потужність передачі $P = 14$ дБм;
- Смуга пропускання $BW = 125$ кГц;
- коефіцієнт розкиду спектру $SF = 10$;
- Швидкість кодування $CR = 4/5$.



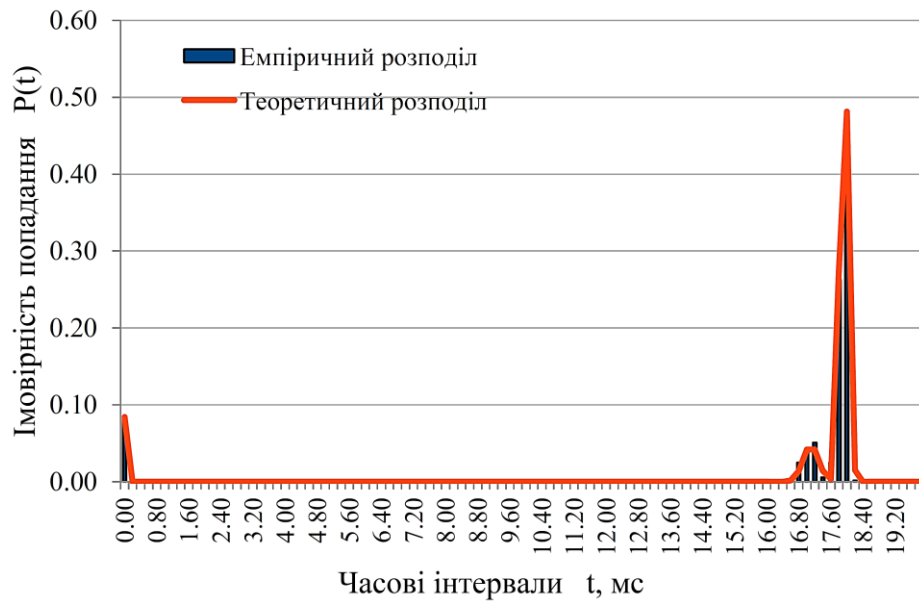
а)



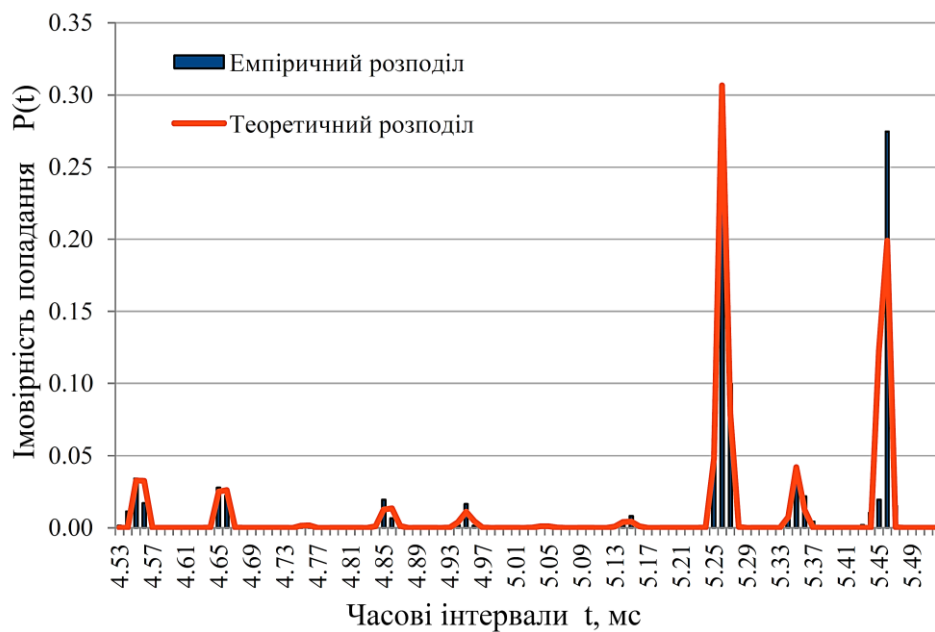
б)

Рисунок 3.12 – Обладнання, що використовується

В результаті на основі методу найменших квадратів, методу узагальнених редукованих градієнтів та критерію умови Колмогорова-Смірнова були отримані аналітичні моделі, що описують інтенсивність прийому повідомлень та обслуговування для пристроїв LoRaWAN. Графіки, що показують відношення отриманих аналітичних моделей до початкових емпіричних розподілів, показані на малюнках 3.13а і 3.13б.



а)



б)

Рисунок 3.13 – Співвідношення емпіричного та теоретичного розподілу для: а) затримки для мережевого інтерфейсу; б) інтенсивності обслуговування повідомлень

Таким чином, інтенсивність обслуговування повідомлень КП (3) і сервером (5), а також показники затримки на мережевому інтерфейсі (2) і каналі зв'язку (4) можуть бути описані за допомогою наступних рівнянь щільності

ймовірності:

$$f_a(x) = p_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 x} + p_2 \frac{\lambda_2^{a_2}}{\Gamma(a_2)} x e^{-\lambda_2 x} + p_3 \frac{\lambda_3^{a_3}}{\Gamma(a_3)} x e^{-\lambda_3 x} \quad (3.2)$$

$$f_c(x) = G_c(x, p_1, a_1, \lambda_1, c_1) + G_c(x, p_2, a_2, \lambda_2, c_2) + \dots + G_c(x, p_{10}, a_{10}, \lambda_{10}, c_{10}) \quad (3.3)$$

$$f_{cd}(x) = p \frac{\lambda}{\Gamma(a)} x e^{-\lambda x} \quad (3.4)$$

$$f_s(x) = p \lambda e^{\lambda x} \quad (3.5)$$

$$G_c(x, p, a, \lambda, c) = p \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} (x - c) e^{-\lambda(x-c)} \quad (3.6)$$

де

- $f_a(x)$ – щільність ймовірності інтенсивності повідомлення,
- $f_c(x)$ – інтенсивність служби повідомлень,
- $G_c(x, p, a, \lambda, c)$ – зміщений розподіл ймовірності гамма-випромінювання
- p_i – ймовірність потрапляння в заданий розподіл,
- a_i – фактор масштабу,
- λ_i – коефіцієнт масштабу,
- c_i – коефіцієнт переміщення.

Ці аналітичні моделі, разом з імовірнісними розподілами, отриманими під час експерименту для проміжків часу між надходженнями повідомлень, показниками затримки інтерфейсу мережі LoRaWAN, часу обслуговування повідомлень на КП, показниками затримки каналу зв'язку та часом обслуговування повідомлень на сервері, були використані для моделювання мережі з 1000 КП LoRaWAN, відповідно до зображень 11а для мережі ГШ та 11б для мережі без ГШ. Розподіли ймовірностей, що використовуються в моделюванні з використанням бібліотеки Ciu Python, представлені нижче:

1. Інтервали часу між надходженнями повідомлень: детерміноване значення, 1 повідомлення кожні 60 секунд.

2. Затримки мережевого інтерфейсу: $f_a(x)$ з наступними параметрами для формули (3.2):

- $p_1 = 0,116, \lambda_1 = 5988,$
- $p_2 = 0,115, a_2 = 8899,84, \lambda_2 = 518135,$
- $p_3 = 0,769, a_3 = 48643,63, \lambda_3 = 2695418.$

3. Час обслуговування повідомлень на об'єкті ОП: $f_c(x)$, з наступними параметрами за формулою (3.4):

- $p_{1..10} = [0,065, 0,052, 0,003, 0,028, 0,002, 0,01, 0,434, 0,062, 0,434],$
- $a_{1..10} = [298, 1288, 2317, 3288, 2041, 5208, 6221, 24551, 27478, 93005],$
- $\lambda_{1..10} = [9900990, 9900990, 1,0e7, 1,0e7, 4761905, 1,0e7, 1,0e7, 33333333, 33333333, 1,0e8,]$
- $c_{1..10} = 4,52e^{-3}.$

4. Затримки каналу зв'язку: $f_{cd}(x)$, з наступними параметрами за формулою (3.4):

- $p = 1,00, a = 22,73, \lambda = 25253.$

5. Час обслуговування повідомлень на сервері: $f_s(x)$, з наступними параметрами за формулою (3.5):

- $p = 1,00, \lambda = 100.47.$

Ці результати ґрунтуються на вивченні кінцевих вузлів і пристроїв обробки для кожного типу мережі, що пояснює деякі відмінності в розподілі ймовірностей між вузлами в цих моделях. Результати моделювання з рівнем достовірності 95% представлені в таблиці 3.1.

Виходячи з результатів моделювання, в моделі з використанням ГШ було скорочено час технічного обслуговування. Крім того, скоротився час обслуговування і сума часу обслуговування шлюзу та сервера стала меншою. Крім того, в надзвичайній ситуації, коли кожен кінцевий вузол надсилає повідомлення, надсилання має бути набагато інтенсивнішим, ніж одне повідомлення в секунду. Передбачається, що в даному випадку топологія мережі з гетерогенним шлюзом не матиме значних переваг, так як в традиційній моделі,

так і в пропонованій моделі (з ГШ) вузол, що забезпечує доступ до зовнішньої мережі, буде мати вузьке місце і найбільш відповідальне місце. Однак це питання може мати неочікувані результати на рівні радіозв'язку та потребує подальшого вивчення.

Таблиця 3.1 – Результати імітаційного моделювання

Досліджуваний параметр	Розподіл	Середнє значення. (МС)
Модель без використання HG		
Інтенсивність надходження повідомлень	Exponential ($a = 16,57$)	61.850 ± 1.690
Час обслуговування повідомлення в моделі	Erlang ($a = 3, \lambda = 44,06$)	84.310 ± 1.690
Час обслуговування повідомлень на шлюзі	Gamma ($a = 600, \lambda = 104\,769,80$)	$5,710 \pm 0,002$
Час обслуговування повідомлення на ES	Exponential ($a = 82$)	10.730 ± 0.060
Модель з використанням HG		
Інтенсивність надходження повідомлень	Exponential ($a = 13,78$)	$61,62 \pm 0,55$
Час обслуговування повідомлення в моделі	Erlang ($a = 7, \lambda = 265,86$)	27.40 ± 0.07
Час обслуговування повідомлення на HG	Erlang ($a = 4, \lambda = 307,61$)	15.52 ± 0.06

3.5. Метод маршрутизації на основі зведеного показника якості посилок

Метод оцінки зведеного показника якості посилок

В енергоефективній мережі дальнього радіусу дії зокрема, і в бездротових сенсорних мережах в цілому вибір оптимальних шляхів маршрутизації завжди є складним завданням через динамічну поведінку каналів. Якість каналів зв'язку повинна бути забезпечена для критично важливих промислових застосувань, оскільки до них пред'являються більш суворі вимоги, ніж до типових додатків IoT.

На поширення радіосигналів впливає множина факторів, таких як властивості середовища передачі, що призводить до виникнення

багатопромених ефектів, шумів і завад від одночасної передачі інших технологій зв'язку або електромагнітних джерел, розташованих у безпосередній близькості. У більшості випадків існує кілька методів оцінки якості показника з'єднання на основі параметра канального шару даних, оцінки з'єднання на основі параметра фізичного рівня і комплексної оцінки якості з'єднання [14].

Метрики, що використовуються для оцінки показника якості з'єднання, мають такі аббревіатури: RSSI, LQI, SNR і PRR. Однак оцінка LQI сильно залежить від апаратного забезпечення, тому рекомендується використовувати RSSI, SNR і PRR для оцінки показника якості з'єднання. Крім того, моделі машинного навчання можуть бути використані для навчання вхідних даних, зібраних під час експериментів в лабораторії, для оцінки та класифікації показника якості зв'язку за різними групами. Виходячи з цього, ви можете вибрати найбільш близький до оптимального доступний маршрут для ваших завдань маршрутизації в кожному сценарії.

А. Апаратні методи оцінки.

Залежно від апаратної реалізації, безпосередньо з бездротового приймача без додаткових розрахунків можна отримати такі параметри, як RSSI, LQI, SNR. Ці параметри зберігаються в регістрах після отримання пакета.

Індикатор рівня прийнятого сигналу. RSSI — це приблизна міра потужності, що отримана одним радіочастотним пристроєм та іншим радіочастотним пристроєм. На великих відстанях передача сигналу стає слабшою, що призводить до збільшення ймовірності втрати пакетів, оскільки приймач не може правильно декодувати сигнал. Вимірюється сигнал показником рівня прийнятого сигналу, який в більшості випадків вказує на те, наскільки добре той чи інший радіоканал може чути віддалений бездротовий вузол. У відкритому космосі потужність прийнятого сигналу можна оцінити за допомогою наступного рівняння:

le

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} + PL \quad (3.7)$$

– P_{rx} – очікуваний показник прийнятої потужності або RSSI прийнятого сигналу;

– P_{tx} – потужність передачі;

– G_{tx} і G_{rx} – коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен;

– PL представляється як втрати на трасі.

Потужність передачі зменшується зі збільшенням відстані між приймачем і передавачем. Тому, якщо результуюче значення RSSI менше чутливості приймача, сигнал може бути декодований неправильно. Крім того, рівень сигналу знижується через завади та навколишнє середовище.

Співвідношення сигнал/шум. SNR означає різницю в рівнях прийнятого сигналу.

$$\text{SNR(дБ)} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{сигнал}}}{P_{\text{шум}}} = P_{\text{сигнал}} \text{ (дБ)} - P_{\text{шум}} \text{ (дБ)} \quad (3.8)$$

Співвідношення сигнал/шум визначає різницю в рівні між сигналом і шумом для даного рівня сигналу. Чим менше шуму генерує ресивер, тим краще співвідношення сигнал/шум.

Показник якості зв'язку. LQI – це значення, яке використовується для швидкого визначення приналежності каналу зв'язку до діапазону надійного прийому. Наприклад, цей показник реалізований в деяких трансиверах (CC2420), що використовуються в багатоканальних мережах, таких як Zigbee для оцінки «вартості» каналу. Показник LQI описаний в стандартах Zigbee і IEEE 802.15.4. Після отримання кожного пакета результат вимірювання LQI виражається у вигляді цілого числа від 0 до 255. Мінімальне та максимальне значення LQI відповідають сигналам найнижчої та найвищої якості IEEE 802.15.4, що реєструються приймачем.

Однак ці значення можуть бути отримані тільки з успішно прийнятих пакетів. У разі втрати пакетів якість зв'язку може бути завищена. Крім того, результати вимірювань нестабільні, тому важко оцінити точну якість зв'язку,

якщо виконується лише одне вимірювання. Незважаючи на швидку і дешеву апаратну реалізацію, ці методи дають обмежену інформацію про якість каналів передачі даних. Таким чином, використання комбінації апаратних і програмних індикаторів дозволить підвищити точність оцінки якості зв'язку.

В. Програмні методи оцінювання.

Програмна реалізація дозволяє оцінити деякі значення, такі як швидкість прийому пакетів (PRR) або коефіцієнт доставки пакетів (PDR), пропускну здатність, очікувану кількість передач.

У заданому періоді передачі PRR може бути отриманий або шляхом прямого обчислення, або апроксимації. PRR – це відношення кількості успішно прийнятих пакетів до загальної кількості переданих пакетів. Таким чином, розміром вікна вважається вибір n часових інтервалів для обчислення PRR. В результаті можна отримати точну оцінку в короткі терміни при високій або низькій якості зв'язку. З іншого боку, для більш точного отримання PRR потрібен більший розмір вікна.

Інший метод розглядає кількість очікуваних передач як показник для оцінки якості зв'язку. Це вказує на те, скільки передач потрібно для успішної передачі пакета, враховуючи кількість втрачених пакетів.

С. Експериментальні вимірювання та попередня обробка.

В експериментальному вимірюванні ми використовували 2 вузли LoRa, включаючи вузол-відправник і приймальний вузол. На обох вузлах були встановлені такі параметри: частота = 868 МГц, смуга пропускання $BW = 250$ кГц, потужність передачі = 5 дБм, коефіцієнт розширення спектру $SF = 7$, швидкість кодування $CR = 4/5$. Інтервал між передачею пакетів встановлювався випадковим чином в діапазоні 500, 2000 мс. Приймач в зборі фіксується і підключається до комп'ютера для зберігання експериментальних даних. З іншого боку, вузол-відправник переміщається далеко від приймального вузла з низькою швидкістю, щоб виміряти потужність сигналу і зміни шуму, пов'язані зі швидкістю прийому пакетів. Після проведеного експерименту було прийнято (захоплено) 2500 пакетів для подальшої попередньої обробки.

По кожному отриманому пакету аналізувалися значення RSSI і SNR з обладнання. Крім того, був записаний порядковий номер, індексований номером пакета, для обчислення PRR в межах певного розміру вікна. Як показано на рис. 3.14, для прикладу попередньої обробки в межах розміру вікна = 10 ми розраховували середні значення RSSI та SNR, а також PRR відповідно до порядкового номера.

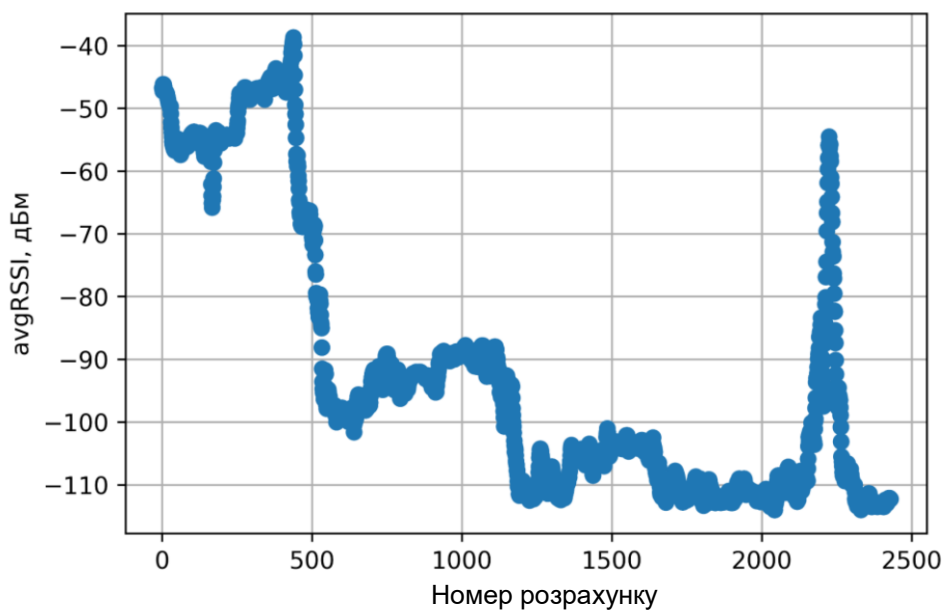
srcAddr	avgRSSI	CHP	PPR
11	-46,75	9.28125	0.8
11	-46,75	9.21875	0.8

srcAddr	seqNum	payload	packetSize	RSSI	SNR
11	1	Hello world	16	-46	9.5
11	2	Hello world	16	-42	9.5
11	3	Hello world	16	-55	9.5
11	4	Hello world	16	-47	8.75
11	5	Hello world	16	-49	9.5
11	8	Hello world	16	-46	9
11	9	Hello world	16	-44	9.25
11	10	Hello world	17	-45	9.25
11	11	Hello world	17	-46	9
11	12	Hello world	17	-46	9.25

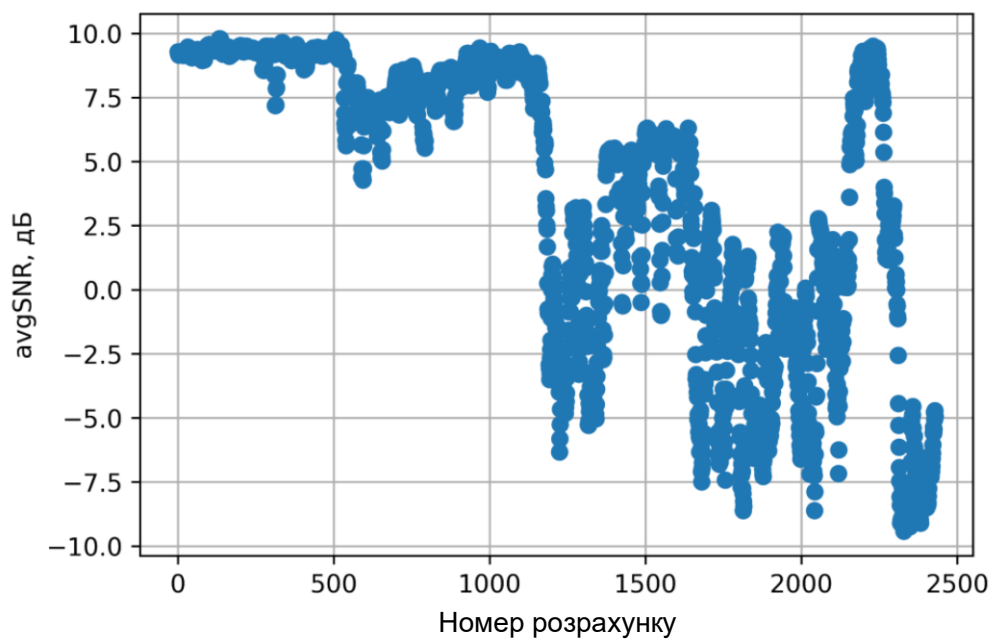
srcAddr	avgRSSI	SNR	PPR
11	-46.75	9.28125	0.8
11	-46.75	9.21875	0.8

Рисунок 3.14 – Попередня обробка даних з розміром вікна = 10

На підставі аналізу даних було прийнято використовувати середні значення RSSI і SNR, що може допомогти оцінити рівень якості з'єднання. Як показано на рис. 3.15а, значення RSSI знаходяться в діапазоні від -120 до -40 дБм і можуть бути розділені на чотири групи. З іншого боку, значення SNR також коливаються від -10 дБ до 10 дБ (рис. 3.15б). Таким чином, приблизно з цього діапазону виділені чотири рівні, які ми будемо розглядати як рівні якості зв'язку.



а) Розрахунок RSSI



б) розрахунок SNR

Рисунок 3.15 – Попередньо оброблені значення RSSI та SNR

Давайте розглянемо чотири рівні оцінки якості каналу, як показано в таблиці 3.2.

Для позначення рівня якості зв'язку використовувалася швидкість прийому пакетів.

Таблиця 3.2 – Діапазон класифікації оцінки якості з'єднання LoRa Link

Оцінка якості з'єднання	PPR
Відмінно	$PPR \geq 0,9$
Добре	$0,75 \leq PPR < 0,9$
Середня	$0,45 \leq PPR < 0,75$
Погана	$PPR < 0,45$

Щоб зменшити вплив діапазону та похибки моделі, $avgRSSI$ та $avgSNR$ нормалізуються таким чином, щоб дані були в межах від 0 до 1. Процес нормалізації відповідає рівнянню (9) наступним чином:

$$\begin{aligned} avgRSSI^* &= \frac{avgRSSI - \min(avgRSSI)}{\max(avgRSSI) - \min(avgRSSI)} \\ avgSMR^* &= \frac{avgSNR - \min(avgSNR)}{\max(avgSNR) - \min(avgSNR)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

де $avgRSSI^*$ та $avgSNR^*$ – нормалізовані дані, які використовуються в моделі машинного навчання.

Після аналізу та попередньої обробки даних з'ясувалося, що отримані дані були розподілені у вигляді нелінійних спільних даних. Так, серед відомих методів машинного навчання для навчання моделі для оцінки складного показника якості з'єднання був обраний метод опорних векторів.

Support Vector Machine (SVM) – це відносно простий алгоритм контрольованого машинного навчання, який використовується для класифікації та/або регресії. Він найбільш краще для завдання класифікації, але іноді буває дуже корисним і для регресії. По суті, метод SVM знаходить гіперплощину, яка створює межу між типами даних.

Нижче наведено метод ядерного вектора підтримки для нелінійних відокремлюваних даних. Набір даних містить деякі нелінійні відокремлювані дані в одному вимірі. Таким чином, можна перетворити ці дані в двовимірні, і

дані стануть лінійно розділеними в двовимірному вимірі.

Модель LQE на основі SVM.

Оцінка якості з'єднання перетворюється в багатоступеневу класифікаційну задачу, яку можна вирішити за допомогою моделей навчання з учителем. Метод опорних векторів (SVM) відомий як одна з найефективніших моделей контрольованого навчання для вирішення багатокласової класифікації. У дослідженні запропоновано використовувати SVM для навчання зібраних даних та прогнозування рівня показника якості з'єднання. На рис. 16 показана структура моделі SVM з використанням трьох параметрів (avgRSSI, avgSNR, PRR) в якості входів і гаусовського ядра для навчання. Для навчання та оцінки запропонованої моделі використовувалися мова програмування Python та бібліотека scikit-learn. Набір даних був розділений на 10% для навчання та 90% для тестування. Було проведено 50 навчальних випробувань для отримання середньої точності запропонованої моделі. Результати представлені в таблиці 3.3.

За результатами навчання модель SVM демонструє високу точність прогнозування із середнім значенням = 95%. Таким чином, використовуючи три параметри, такі як RSSI, SNR, PRR, показник якості з'єднання LoRa може бути точно оцінений після 10 пробних пакетів, навіть якщо розмір нашого набору даних недостатньо великий для навчання, що зазвичай має місце для завдань машинного навчання.

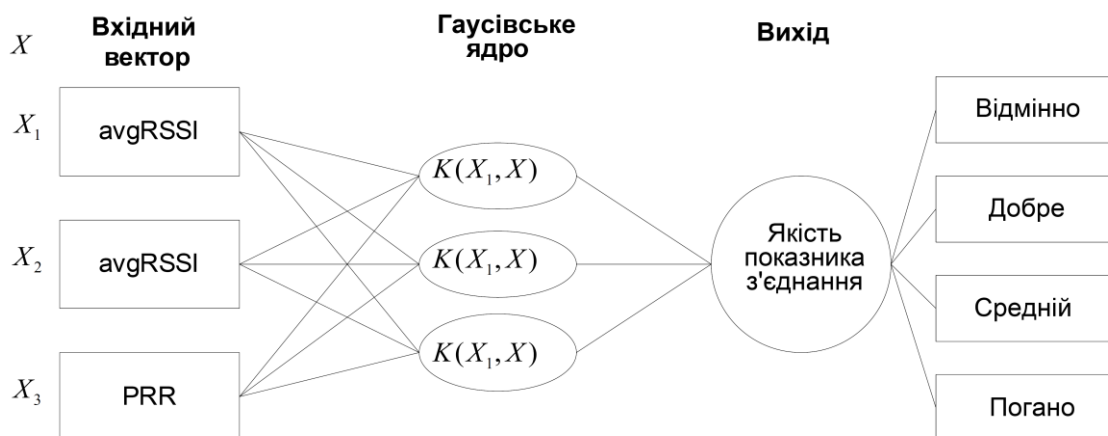


Рисунок 3.16 – Модель LQE на базі SVM

Таблиця 3.3 – Ефективність моделі оцінки якості зв'язку на основі SVM

Оцінки	Точність	Повнота	F-міра
Відмінно	0,96	1,00	0,98
Добре	0,93	0,93	0,93
Середній	0,98	0,92	0,95
Погано	1,00	0,87	0,93
Загальна точність		95%	

Також слід зазначити, що враховувалася тільки передача в одному напрямку (висхідний канал). Таким чином, рівень показника якості каналу може бути використаний для пошуку надійного маршруту висхідного каналу в енергоефективній гратчастій мережі LoRa великої дальності.

3.6. Метод пошуку маршруту

Графічне представлення мережі.

У цій моделі топології мережа може бути представлена у вигляді зв'язаного графа. Наприклад, на рис. 3.17 мережа включає різні типи пристроїв (кінцеві точки, маршрутизатори, шлюзи), зв'язані в графі. Вузол може бути як кінцевим пристроєм, так і транзитним пристроєм (маршрутизатором). Дані, отримані транзитним вузлом, будуть передані наступному вузлу відповідно до оптимального маршруту до пункту призначення.

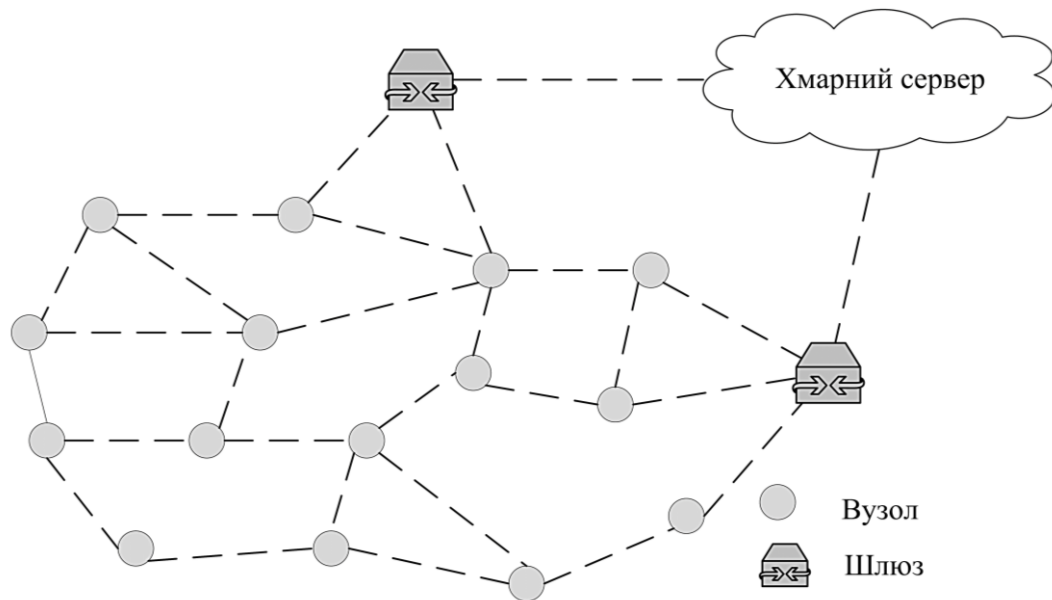


Рисунок 3.17 – Модель мережі

Як показано на рис. 3.17, модель сітчастої мережі можна описати у вигляді графа $G(V, E)$ з наборами вершин V та ребер E . Множина вершин $V = \{v_i\}$, $i = 1 \dots n$ являє собою множину вузлів мережі, множину ребер $E = \{e_{ij}\}$, $i, j = 1 \dots n$, – сукупність каналів зв'язку між вузлами мережі. Кожен вузол має максимальний діапазон R , в межах якого вузли можуть зв'язуватися з іншими вузлами. Якщо координати вузла описуються як (x_i, y_i, z_i) , то відстань між двома вузлами i і j обчислюється за формулою:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3.10)$$

Отже, зв'язок між двома вузлами існує, якщо відстань між ними не перевищує R . Кожне ребро між вершинами зважується набором значень оцінки комплексної якості показника з'єднання $C = \{c_{ij}\}$, де $i, j = 1 \dots n$, які обчислюються за методикою, запропонованою в попередньому розділі. Набір значень $\{c_{ij}\} = \{2, 3, 4, 5\}$ відповідає зведеним оцінкам якості поганого, середнього, доброго та відмінного.

Підбір маршруту здійснюється виходячи з якості з'єднання.

Маршрут розраховується таким чином, щоб знайти оптимальний маршрут

з якісним каналом зв'язку до пункту призначення. Для оцінки якості з'єднання між приймачем і передавачем використовується запропонований метод оцінки якості з'єднання (LQE). Використовуючи оцінки LQE, якість показника зв'язку між двома вузлами можна представити у вигляді залежної функції від LQE:

$$c_{ij} = f(LQE) \quad (3.11)$$

Значення $c_{ij} = 2$ означає, що існує нестійкий прямий зв'язок між вузлами i і j або між ними немає прямого з'єднання, тобто вузли можуть обмінюватися даними тільки через транзитні вузли. Матриця $C = \{c_{ij}\}$, де $i, j = 1, n, s$ містить значення оцінки комплексної якості показника з'єднання між вузлами в мережі (вага ребер графіка):

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,n} & c_{1,s} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,n} & c_{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{n,1} & c_{n,2} & \dots & c_{n,n} & c_{n,s} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Припускають, що на графіку G є багато можливих маршрутів $\Omega = P_{i,s} \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ між вузлом i та вузлом приймача s . Таким чином, сумарна оцінка з'єднання для маршрута від вузла i до вузла приймача (шлюз) визначається як

$$w_{i,s} = \sum_{j=1}^{|P_{i,s}|-1} c_{i,j+1} \quad (3.13)$$

Оптимальний шлях від вузла i до вузла приймача полягає у вирішенні задачі максимізації

$$\text{Route}_{i,s} = \arg \max_{P_{i,s} \in \Omega} (w_{i,s}) \quad (3.14)$$

3.7. Висновки по розділу

1. У зв'язку з розвитком додатків «розумний будинок» і «розумне місто» запропонована модель енергоефективної гратчастої мережі дальнього радіусу дії дає можливість підключати датчики і виконавчі механізми до мережі зв'язку загального користування. Була представлена концепція гібридної бездротової mesh-мережі з урахуванням розгляду технології передачі даних на великі відстані і з низьким енергоспоживанням (LoRa є однією з перспективних технологій ПД для цих цілей). Використання гратчастої топології для енергоефективних мереж дальнього радіусу дії дозволяє забезпечити покриття на великій відстані та зв'язок з іншими технологіями передачі даних малого радіусу дії, такими як Wi-Fi або BLE.

2. Запропонована модель енергоефективної mesh-мережі дальнього радіусу дії враховує структуру мережі з використанням гетерогенних шлюзів, що дозволяє забезпечити сумісність з іншими мережами зв'язку в розумних містах.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

4.1. Розробка моделі в OMNET++.

Для оцінки вивчених характеристик енергоефективної мережі дальнього радіусу дії авторами був розроблений програмний модуль LoRa на основі inet frameworks версії 4.2 у пакеті моделювання OMNET++ версії 5.5.1. Оскільки бібліотека та фреймворк OMNET++ побудовані на модульних та компонентно-орієнтованих принципах, вузол LoRa складається з модульних компонентів. На рис. 4.1 показані основні компоненти інтерфейсу LoRa для програмного модуля LoRa.

В енергоефективній мережі LoRa дальнього радіусу дії параметри конфігурації радіостанції, такі як робоча частота, SF, BW, CR і потужність передачі, впливають на дальність зв'язку та точність прийому. Якщо потужність прийнятого сигналу перевищує чутливість приймача, можна сказати, що передача пройшла успішно. Потужність передачі зменшується, коли вона проходить по повітрю до приймача.

Тому отримана потужність залежить від потужності передачі і втрат через загасання сигналу. Як відомо в області бездротового зв'язку, модель втрат на трасі з логарифмічною відстанню застосовувалась як в приміщенні, так і на вулиці. Втрати на маршруті залежать від логарифмічної відстані за наступним рівнянням:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + X_{\sigma} \quad (4.1)$$

де

- $PL(d_0)$ - середні втрати на трасі при опорній дистанції d_0 ;
- γ – показник втрат на трасі;
- d - відстань між приймачем і передавачем;

X_{σ} – випадкова величина в розподілі Гаусса з нульовим середнім та

стандартним відхиленням σ .

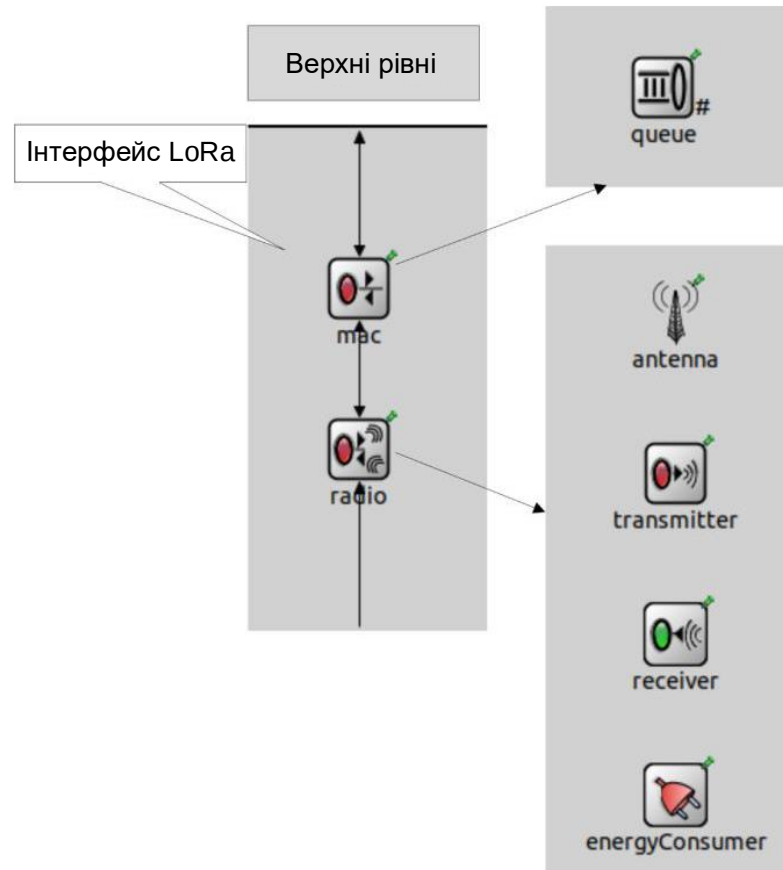


Рисунок 4.1 – Вузол мережі в OMNET++

При цьому розглядається застосування технології LoRa в міському середовищі з щільною міською забудовою, яка є основною завадою для поширення сигналу. Виходячи з досліджень, для імітаційної моделі в міському середовищі розповсюдження з втратами на трасі з $d_0 = 40$, $PL(d_0) = 127,51$, $\gamma = 2,08$, $\sigma = 3,57$.

Вузол LoRa складається з модулів, які імітують радіостанції та протоколи верхнього рівня. У радіомодулі LoRa ви можете налаштувати параметри радіозв'язку, які відповідають нашій моделі обладнання. Інші параметри, такі як коефіцієнт розширення спектру та швидкість кодування, налаштовуються для вузла LoRa на додаток до звичайних конфігурацій. При цьому для імітаційної моделі використовуються радіопараметри, взяті з таблиці даних чіпсету LoRa SX127x.

Приймальний вузол (шлюз) розташовується в центрі мережі.

Розташування кінцевих вузлів генерується випадковим чином у діапазоні розмірів поля моделювання. Довжина корисного навантаження генерується випадковим чином з кінцевих вузлів у діапазоні від 20 до 150 байт. Згідно з експоненціальним розподілом, інтервали між відправленими повідомленнями є випадковими величинами із середнім значенням 120 секунд. У кожному експерименті аналізувалася затримка доставки і швидкість доставки пакетів.

При розробці програмної реалізації інтерфейсу LoRa були враховані такі основні робочі параметри, як SF, BW, CR і модуляція. Інтерфейс LoRa взаємодіє з мережевим рівнем для маршрутизації пакетів, з транспортним рівнем і з прикладним рівнем. Крім того, впроваджено додатковий програмний модуль LoRa Medium для моделювання середовища PD та втрати поширення сигналу LoRa. Параметри моделювання в OMNET++ представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри моделювання

Модуль	Параметр	Значення	Одиниці
LoRa Radio	Ширина смуги пропускання (BW)	{125, 250}	кГц
	Коефіцієнт розширення спектру (SF)	{7, 8, 9, 10}	
LoRa Radio	Швидкість кодування (CR)	4/5	
	Робоча частота	868	МГц
	Потужність передачі	14	дБм
	Коефіцієнт підсилення антени	3	дБі
LoRa Medium	Модель втрати розповсюдження	$PL(d_0) = 127,51$	дБ
		$d_0 = 40,$	м
		$\gamma = 2,08$	
		$\sigma = 3,57$	
	Модель поширення	Постійна швидкість	
Застосовується Повідомлення	Фоновий шум	-96,616	дБм
	Розмір	40	байт
	Проміжок часу між пакетами	Exponential (120)	
Інший	Кількість вузлів у мережі	{10, 20, 40, 100}	
	Розмір поля	2000 x 2000	м ²
	Час моделювання	2000	с

Вузли на площині розташовуються відповідно до рівномірного розподілу. Як показано на рисунку 19, 100 вузлів розташовані в полі розміром 2000 x 2000 м², цільовий вузол знаходиться в центрі поля з координатами (1000, 1000).

Результати моделювання.

Середній час доставки. Відповідно до затримки ПД між двома вузлами, затримка 80-байтного кадру даних обчислюється при зміні інтенсивності навантаження системи. Результати розрахунку конфігурації вузла з параметрами $SF=\{7, 8, 9, 10\}$, $BW=\{125, 250\}$ кГц та впливу інтенсивності навантаження системи на затримку доставки кадру даних наведені на рисунку 4.2.

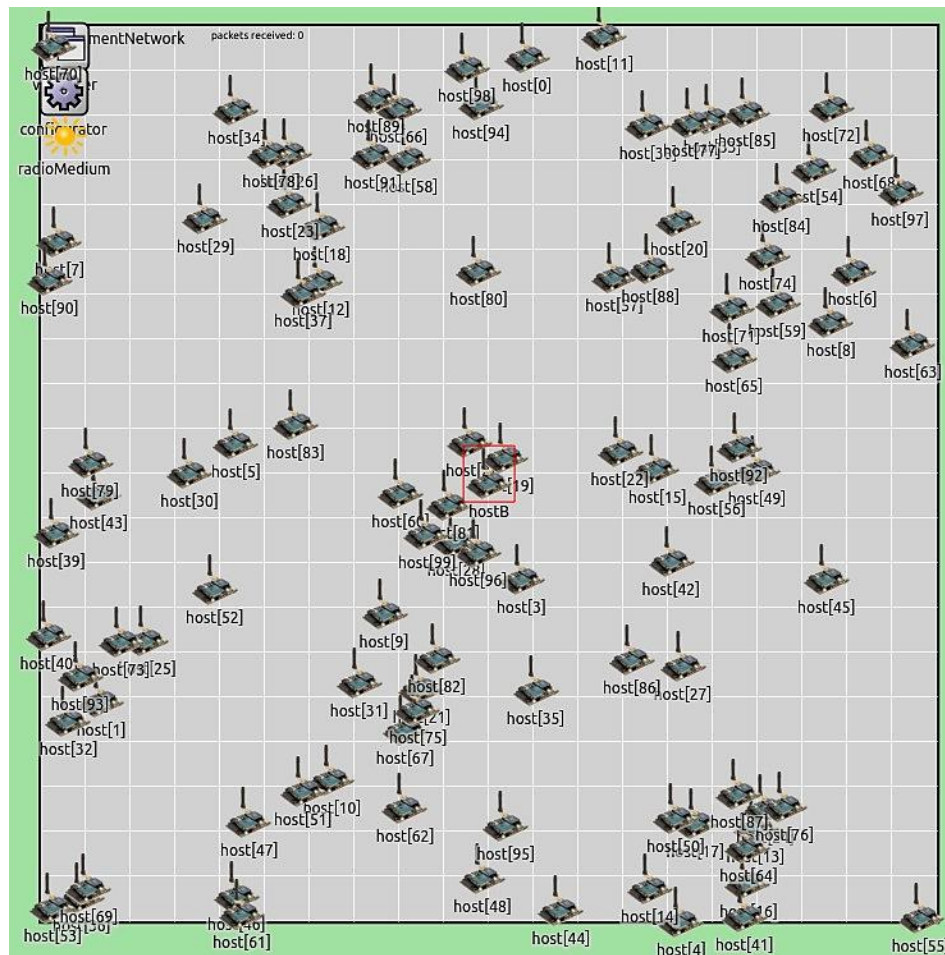


Рисунок 4.2 – Представлення моделі мережі в OMNET++

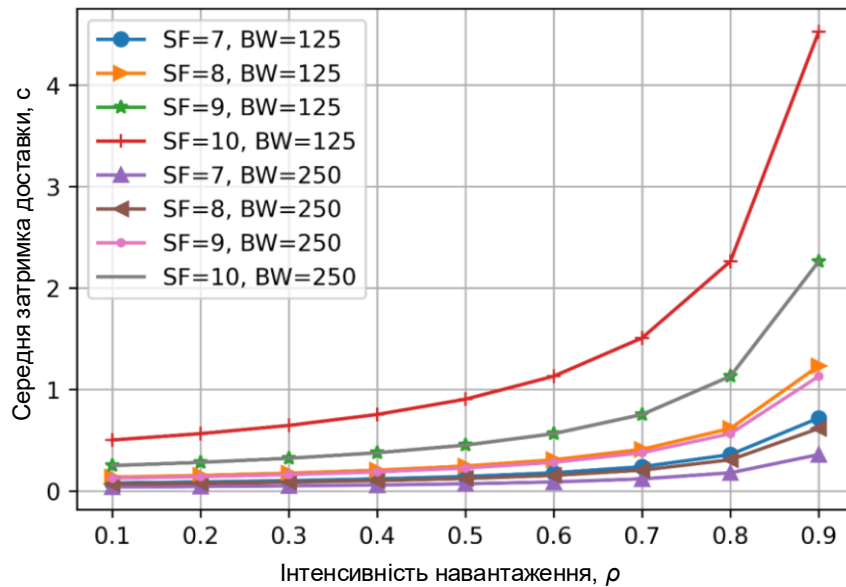


Рисунок 4.3 – Вплив системного навантаження на затримку доставки кадрів даних

У моделі топології вузол отримує пакети та пересилає пакети наступному вузлу. Таким чином, кількість транзитних вузлів, через які проходять пакети, впливає на час доставки до цільового вузла. На рис. 4.4 показана залежність затримки доставки від числа транзитних вузлів при інтенсивності системного навантаження 0,4 і розмірі фрейму даних 80 байт.

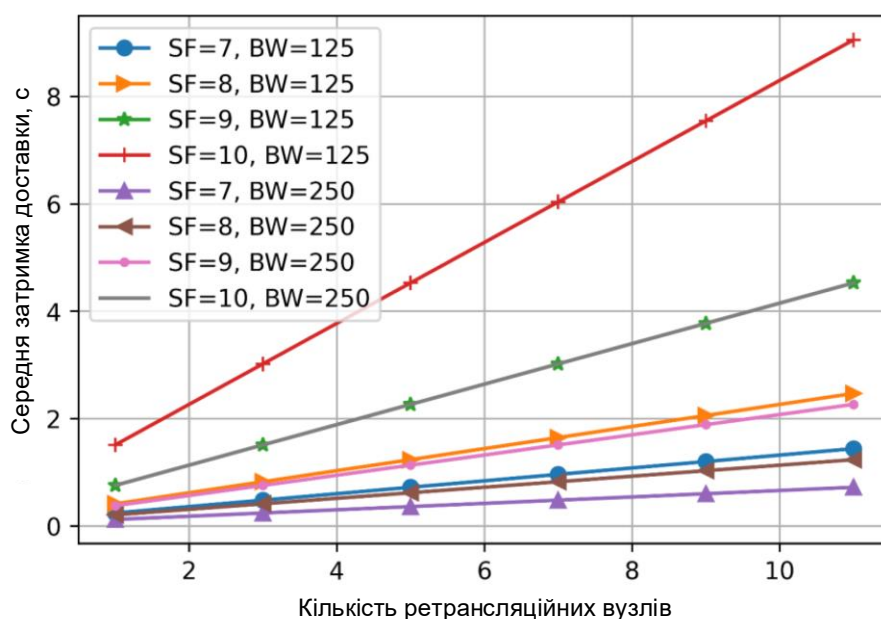
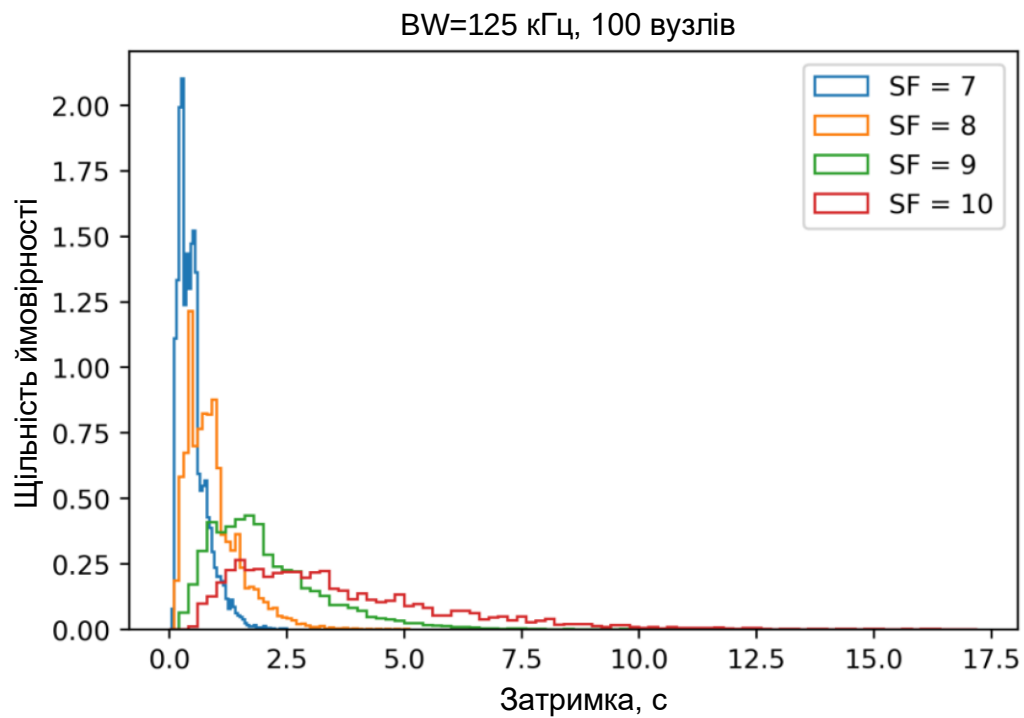
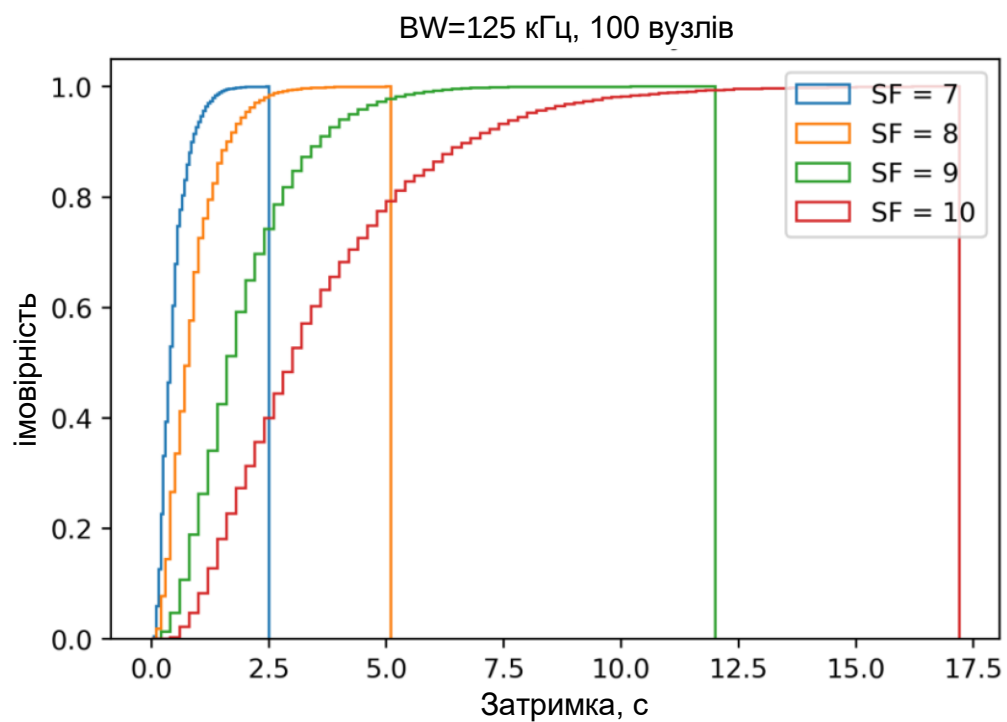


Рисунок 4.4 – Затримка доставки в порівнянні з кількістю стрибків

При порівнянні параметрів коефіцієнта розповсюдження SF і ширини смуги пропускання в мережі зі 100 вузлами спостерігається різний розподіл затримок доставки від вузлів датчика до цільового вузла. На рисунках 4.5 і 4.6 показаний розподіл часу доставки в мережі зі 100 вузлами, встановленими на $SF=\{7, 8, 9, 10\}$ і $BW=\{125, 250\}$ кГц. Розподіл часу доставки також спостерігається на різних масштабах мережі з різною кількістю вузлів. На рис. 24 показаний розподіл затримок для 100 і 40 вузлів в мережі з однаковими параметрами конфігурації.

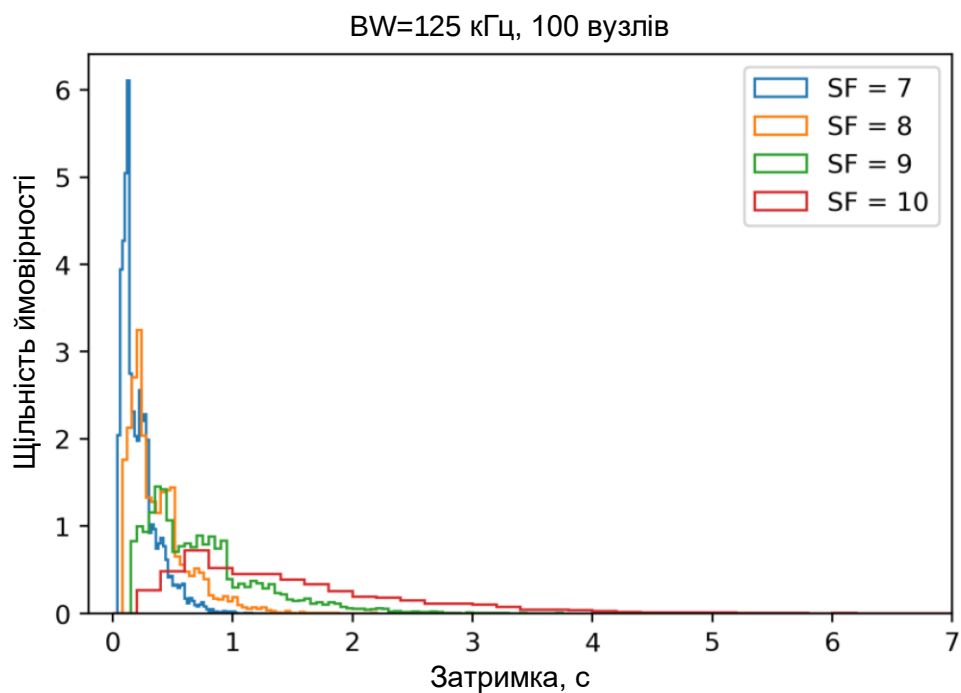


а)



б)

Рисунок 4.5 – Розподіл затримки при різних SF і BW=125 кГц



а)

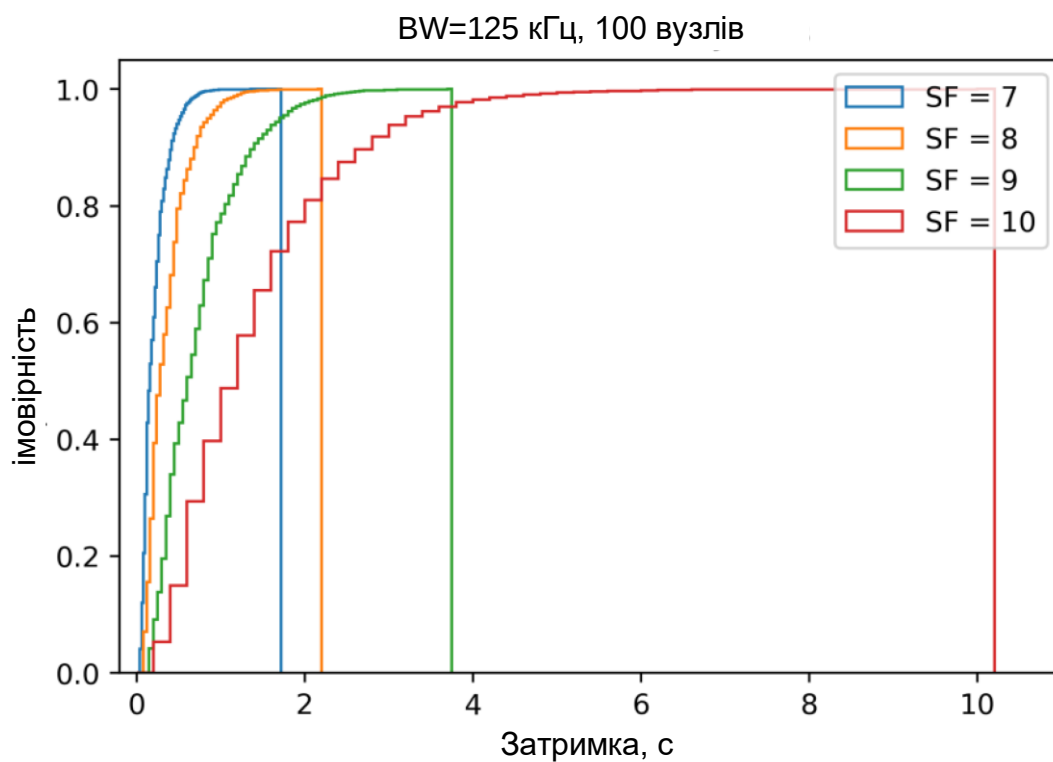
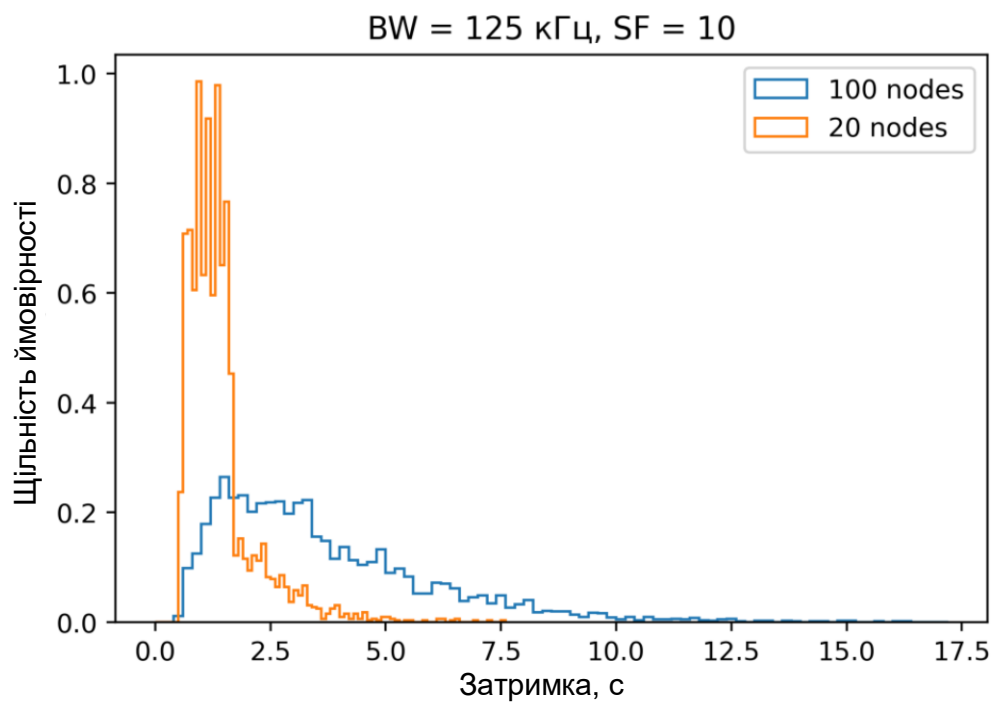
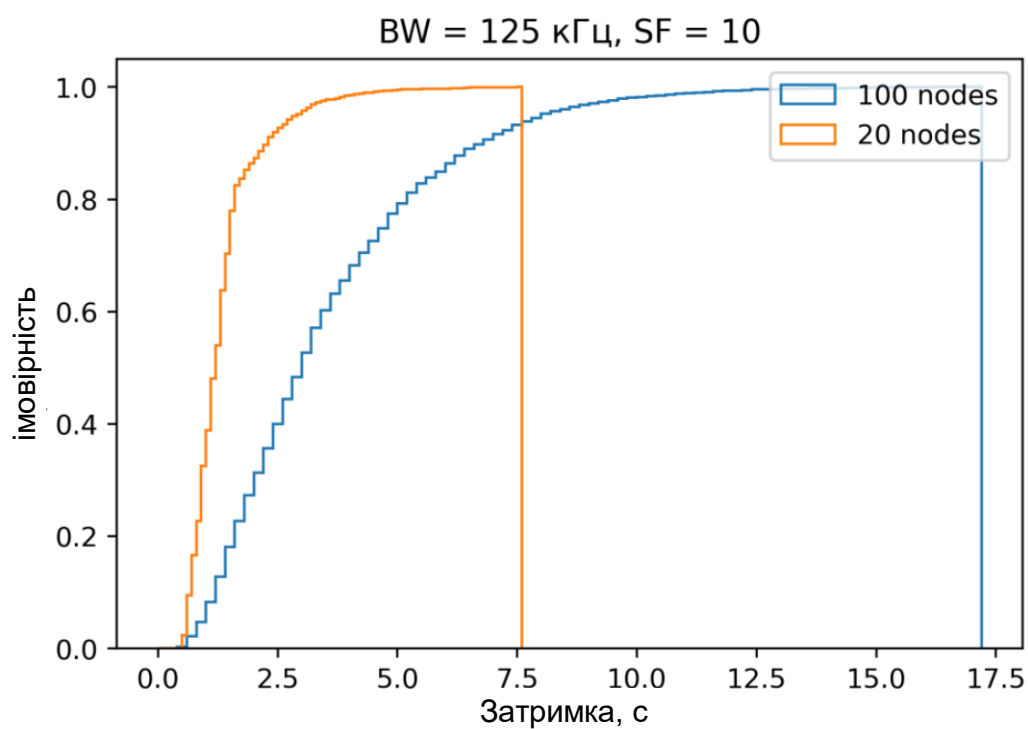


Рисунок 4.6 – Розподіл затримки при різних SF і BW=250 кГц

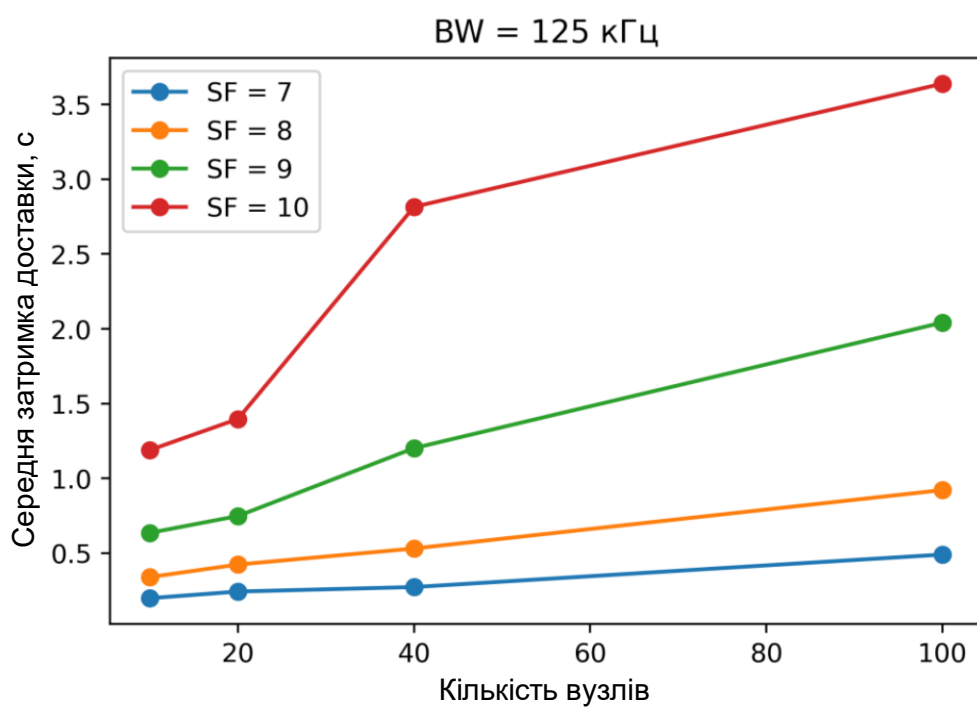




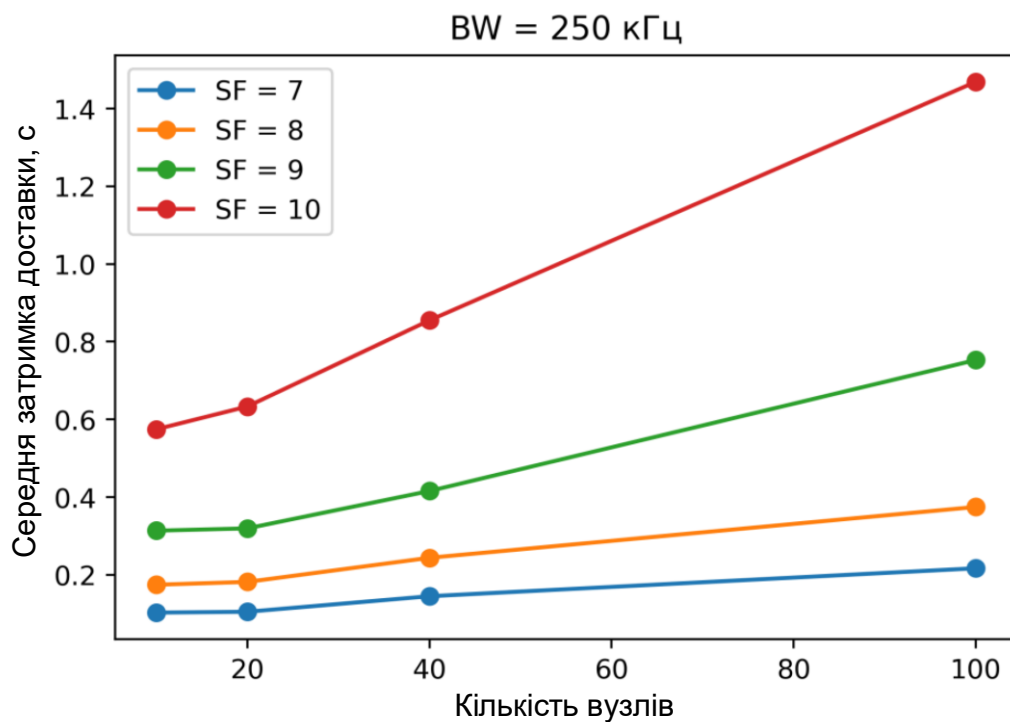
б)

Рисунок 4.7 – Розподіл затримок для різної кількості вузлів у мережі

На рис. 4.8 показана середня затримка доставки пакетів в порівнянні з кількістю вузлів.



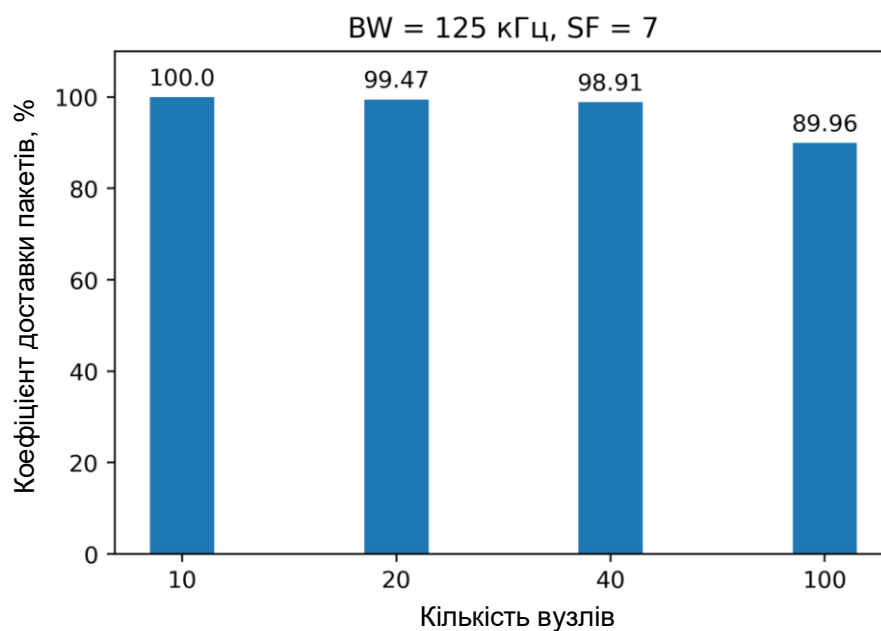
а)



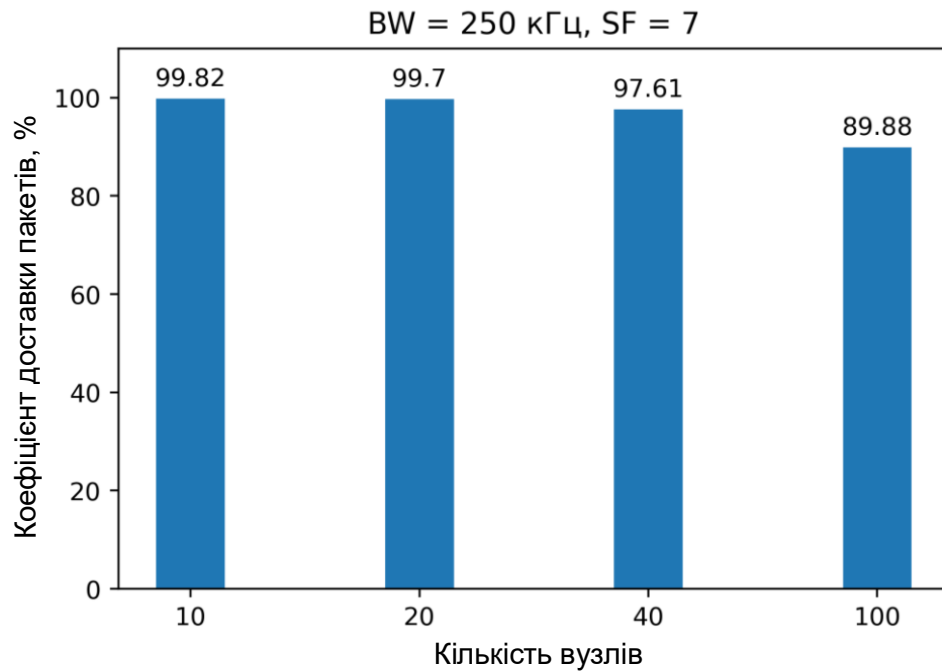
б)

Рисунок 4.8 – Середня затримка в доставці пакетів

Коефіцієнт доставки пакетів U міру збільшення числа вузлів коефіцієнт доставки пакетів буде показувати, який відсоток пакетів отримав цільовий вузол. Для двох розглянутих випадків швидкість доставки пакетів показана на рис. 4.9.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Коефіцієнт доставки пакетів: а) $BW=125$ кГц; б) $BW=250$ кГц

4.2. Аналіз результатів імітаційного моделювання.

Як було показано вище, зі збільшенням навантаження на систему збільшується час доставки даних. Згідно з гістограмами на малюнках 4.5 і 4.6, мале значення SF і широка смуга пропускання забезпечують низьку затримку доставки. При параметрах $SF=10$ і $BW=125$ кГц час доставки значно збільшується, тобто затримка через транзитні вузли при таких параметрах радіомодулів також буде високою і може становити одиниці або десятки секунд. Це можна побачити на рис. 20, який ілюструє передачу пакетів через кілька вузлів до вузла-отримувача вузла.

При використанні смуги пропускання 125 кГц з коефіцієнтами $SF=\{9, 10\}$ затримка збільшується до десятків секунд при проходженні через 10 транзитних вузлів. Залежно від застосування IoT, параметри SF і BW можуть бути відповідно налаштовані. З іншого боку, використання більш широкої смуги пропускання ($BW=250$ кГц) забезпечує короткий час доставки, хоча ПД здійснюється через кілька транзитних вузлів. Це значення можна встановити для деяких додатків, де

не потрібна низька затримка, або в разі нечастого опитування датчиків. Таким чином, застосування технології LoRa може збільшити затримку передачі, однак відстань передачі та низьке енергоспоживання є основними перевагами для додатків IoT.

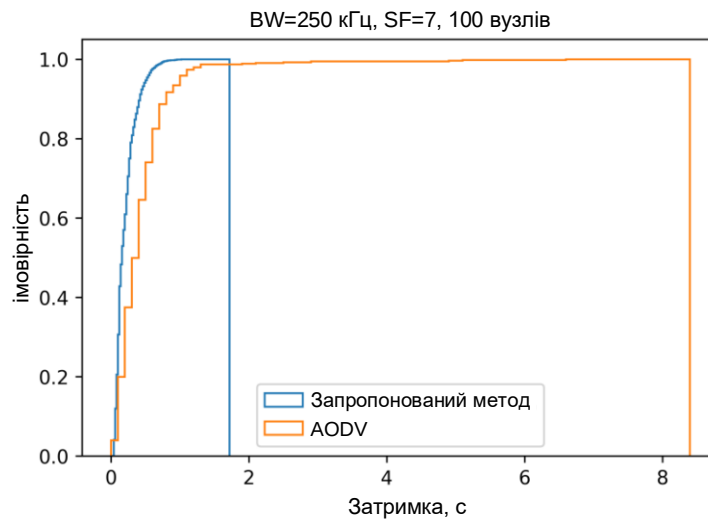
Згідно з гістограмами розподілу затримок на рисунках 4.5 і 4.6, потрібні більш тривалі терміни передачі даних при більшому коефіцієнті розширення спектру, вузькій смузі пропускання і великій кількості вузлів мережі. Коефіцієнт розширення спектру SF представлений кількістю мікросхем, які потрібно закодувати, тому високе число SF вимагає більш тривалого часу передачі.

Зі збільшенням числа вузлів в мережі зростає і кількість згенерованих пакетів. Отже, також зростають затримки доставки даних і частота втрати пакетів (див. рис. 24). Кількість хостів також впливає на відсоток доставлених пакетів цільовому вузла. З рис. 26 видно, що відсоток доставки пакетів з використанням $BW=125$ кГц більше, ніж при використанні $BW=250$ кГц. Можна припустити, що зі збільшенням числа вузлів в мережі коефіцієнт доставки пакетів зменшується, в той час як смуга пропускання ($BW=125$ кГц) визначає високу чутливість приймача.

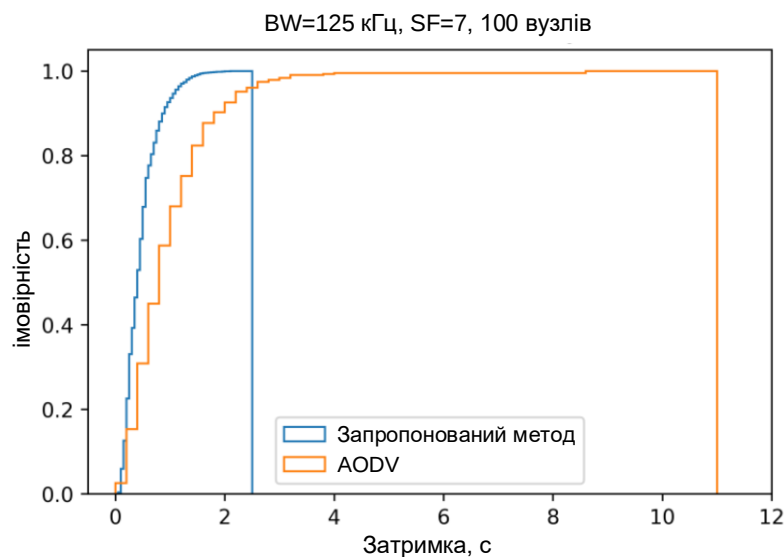
4.3. Результати порівняння AODV

За тих же умов моделювання запропонований метод маршрутизації порівнювався з більш відомим протоколом динамічної векторної віддаленої маршрутизації на вимогу (AODV).

Порівняння розподілу затримок показано на рис. 4.10.



а) імовірність розподілу затримки при $BW = 250$ кГц



б) імовірність розподілу затримки при $BW=250$ кГц

Рисунок 4.10 – Порівняння затримки з протоколом AODV

При запропонованому способі маршрутизації затримка доставки набагато нижче, ніж при протоколі AODV.

Крім того, бажано оцінити середню затримку і швидкість доставки пакетів з різною кількістю вузлів. Результати моделювання при $BW=125$ кГц і $SF=7$ показані на рис. 4.11. На рис. 4.11 показані середні затримки в двох випадках при збільшенні числа вузлів в мережі. На графіку видно, що середня затримка доставки при використанні запропонованого методу менше в порівнянні з протоколом AODV.

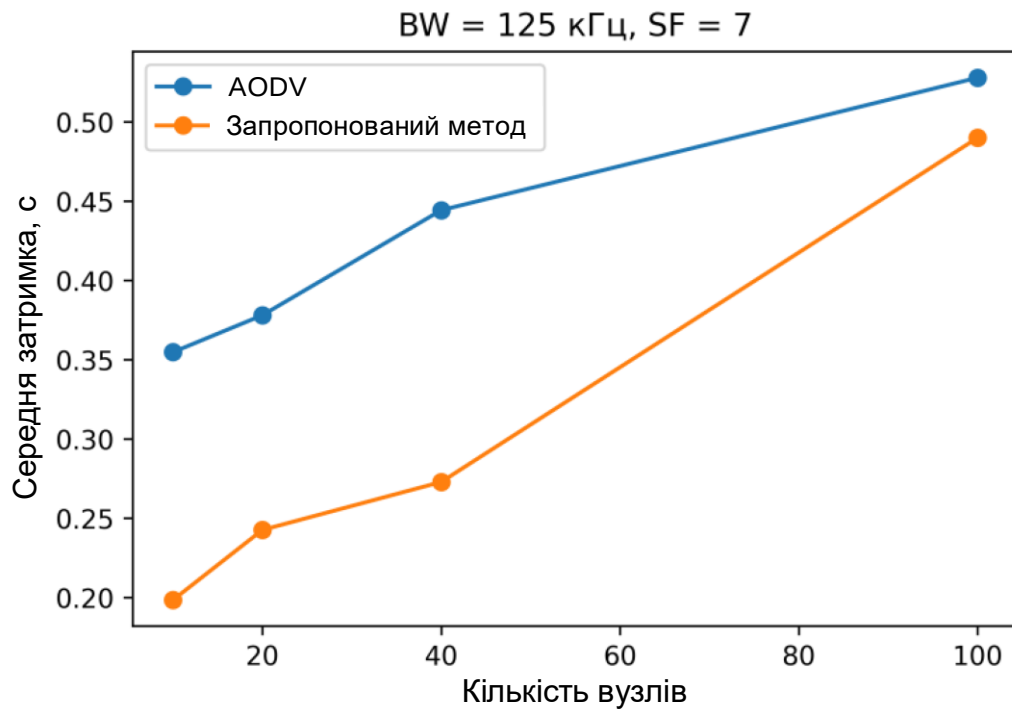


Рисунок 4.11 – Порівняння середньої затримки доставки з протоколом AODV

Більш того, запропонований метод показує і більш високий відсоток доставлених пакетів (рис. 4.12).

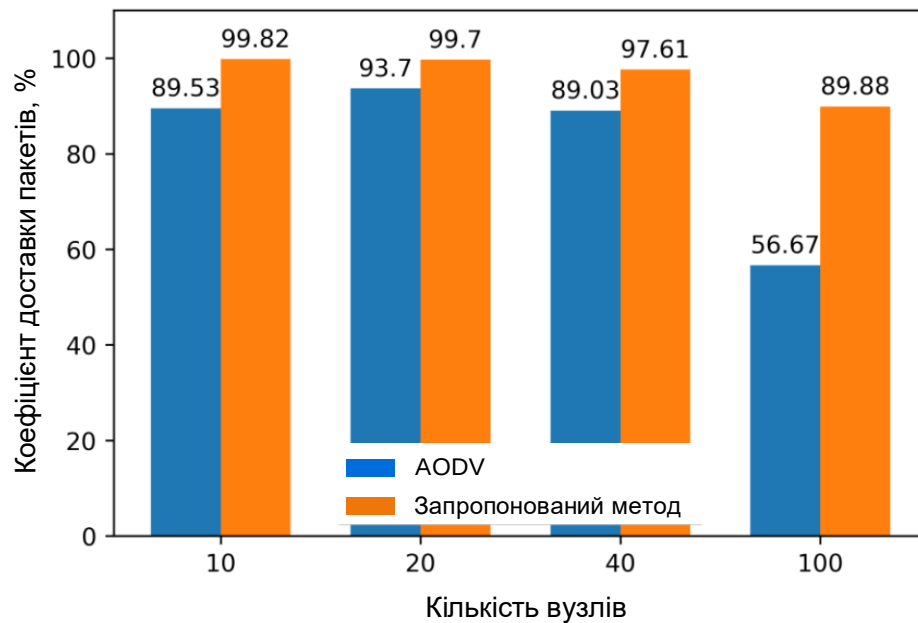


Рисунок 4.12 – Порівняння швидкості доставки пакетів з протоколом AODV

4.4. Висновки

1. Однією з найважливіших проблем у забезпеченні ефективної передачі даних у mesh-мережі є вибір надійних маршрутів для пересилання пакетів. Розроблена методика оцінки комплексного показника якості каналу зв'язку з використанням набору даних, таких як показник потужності прийнятого сигналу RSSI, відношення сигналу до шуму прийнятих пакетів SNR і швидкість прийому пакетів PRR, дозволяє запропонувати класифікацію рівнів показника якості з'єднання на основі технологій машинного навчання (векторний метод підтримки SVM). Виходячи з результатів експериментів, запропонований метод показує високу точність (середнє значення = 95%).

2. Виходячи з оцінки показника комплексного з'єднання, розроблений метод маршрутизації дозволяє організувати надійні енергоефективні mesh-мережі дальнього радіусу дії з використанням технології передачі даних LoRa. Результати комп'ютерного моделювання показали вплив параметрів вузлів мережі LoRa на розподіл затримок і коефіцієнт доставки пакетів. Ці результати можуть бути використані для розгортання різних додатків IoT в залежності від параметрів конфігурації вузлів мережі LoRa. Виходячи з результатів порівняння з відомим протоколом маршрутизації AODV, запропонований метод показав меншу затримку мережі та більший відсоток доставки пакетів.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

В Україні охорона життя та здоров'я людини є пріоритетним напрямком соціальної політики держави. Основні засади охорони праці визначаються Конституцією України, Законом України «Про охорону праці», Кодексом законів про працю (КЗпП), а також Законом України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності». Відповідно до цих законодавчих актів, роботодавці зобов'язані розробляти та затверджувати внутрішні документи, що регламентують питання охорони праці на підприємстві. Ці документи повинні містити правила та вимоги щодо безпечного виконання робіт, а також норми поведінки працівників на робочих місцях та у виробничих приміщеннях. Інструкції та інша документація з охорони праці розробляються з урахуванням специфіки діяльності підприємства, конкретних умов праці та відповідно до чинного законодавства у сфері охорони праці.

На працівника під час виконання кваліфікаційної роботи на тему «Побудова мережі на основі LORA WAN» можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори (згідно Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»):

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до визначених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1. Технічні рішення з безпечного виконання роботи

Обладнання приміщення та робочого місця

Процес виконання дослідження вимагав використання персональних комп'ютерів (ПК) та спеціалізованого програмного забезпечення. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з будь-якими типами та моделями екранних пристроїв встановлені у Вимогах щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями, затверджених наказом Мінсоцполітики від 14.02.2018 № 207 (НПАОП 0.00-7.15-18). При організації робочого місця, оснащеного екранними пристроями, слід віддавати перевагу обладнанню з низьким рівнем шуму та мінімальним виділенням тепла. Робочі місця для працівників, що використовують екранні пристрої, повинні бути ергономічно спроектовані та мати достатні розміри для забезпечення можливості зміни робочої пози та виконання необхідних рухів.

Роботодавець повинен за рахунок тривалості робочої зміни організувати внутрішні регламентовані перерви для відпочинку відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98. Робоче місце, обладнане відеодисплейним терміналом (ВДТ) для користувача ПК, повинно бути спроектоване таким чином, щоб забезпечувати підтримку оптимальної робочої пози. Рекомендується розміщувати робочі місця з ВДТ відносно вікон таким чином, щоб природне світло падало збоку, переважно з лівого боку. При організації розміщення робочих столів з ВДТ необхідно дотримуватися відстані не менше 1,2 метра між бічними поверхнями сусідніх ВДТ та не менше 2,5 метра між тильною поверхнею одного ВДТ та екраном іншого.

Площу приміщень адміністративного та побутового призначення слід приймати з розрахунку не менше ніж 6 м^2 на робоче місце працівника, а для працюючих осіб з інвалідністю, які користуються кріслами-колясками – не менше ніж $7,65\text{ м}^2$. В досліджуваному приміщенні ці норми дотримуються. При оснащенні робочих місць великогабаритним обладнанням і розміщенні в робочих приміщеннях обладнання колективного користування їх площі

допускається збільшувати відповідно до технічних умов на експлуатацію обладнання. Приміщення, де використовуються ВДТ, повинні бути забезпечені аптечками для надання першої медичної допомоги. Також, поруч з такими приміщеннями необхідно обладнати побутові кімнати для відпочинку працівників під час робочого дня та кімнати психологічного розвантаження.

Електробезпека приміщення

Для забезпечення електробезпеки комп'ютерного обладнання та захисту користувачів від ураження електричним струмом, приміщення з комп'ютеризованими робочими місцями повинні бути обладнані необхідними технічними засобами захисту, що відповідають чинним нормативним вимогам. Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, обладнання для їх обслуговування, ремонту та налагодження, а також інше електрообладнання (апарати керування, контрольно-вимірювальні прилади, світильники тощо), електричні проводи та кабелі за своїм виконанням та ступенем захисту повинні відповідати класу зони, визначеному Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), та бути оснащені пристроями захисту від струмів короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію. Лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК в досліджуваному приміщенні виконана, як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Усі електричні провідники підібрані відповідно до номінальних параметрів електромережі та очікуваного навантаження, враховуючи умови навколишнього середовища, спосіб прокладання, температурний режим експлуатації та

характеристики захисної апаратури, згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ). Підключення персональних комп'ютерів та їхніх периферійних пристроїв до звичайної двопровідної електромережі, зокрема із застосуванням перехідників, є неприпустимим. Індивідуальні та групові штепсельні роз'єми та електричні розетки встановлені на негорючих або важкогорючих основах з дотриманням вимог ПУЕ та Правил пожежної безпеки в Україні. Для підключення переносного електрообладнання використовуються гнучкі проводи з надійною ізоляцією.

5.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Мікроклімат

Мікрокліматичні умови на робочому місці та у виробничих приміщеннях є найважливішим санітарно-гігієнічним фактором, що безпосередньо впливає на стан здоров'я та працездатність людини. Нормування мікроклімату на робочому місці дослідника здійснюється відповідно до Державних санітарних норм ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». За рівнем енерговитрат його праця відноситься до категорії І б.

І категорія робіт – легка, роботи, що виконуються сидячи (І а), стоячи, або пов'язані із ходьбою, але не потребують систематичного напруження або піднімання та перенесення вантажів (І б); енерговитрати за таких робіт відповідно складають 105...140 Дж/с (І а) та 138...174 Дж/с (І б).

Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для підтримання мікроклімату в приміщенні в межах допустимих норм застосовується комплекс різноманітних заходів та способів, що охоплюють будівельно-планувальні, організаційно-технологічні, санітарно-гігієнічні,

технічні та інші колективні засоби захисту, серед яких: централізована парова система опалення (забезпечує обігрів приміщення та регулювання температурного режиму), систематичне вологе прибирання (сприяє підтриманню оптимального рівня вологості повітря в приміщенні) та система вентиляції (забезпечує надходження свіжого повітря та видалення відпрацьованого повітря, шкідливих речовин і надлишкового тепла).

Склад повітря робочої зони

Для забезпечення належних умов праці необхідно подбати не лише про комфортний мікроклімат, але й про чистоту повітря в робочих приміщеннях. У процесі виробничої діяльності в повітряне середовище можуть потрапляти різноманітні шкідливі речовини, що використовуються в технологічних циклах.

Для оцінки складу повітря робочої зони використовують такі нормативні документи:

- Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затверджена наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248;

- Перелік речовин, продуктів, виробничих процесів, побутових та природних факторів, канцерогенних для людини, затверджений наказом МОЗ № 7 від 13.01.2006;

У повітрі приміщення, де здійснюється дослідження, потенційно можуть бути присутні такі шкідливі речовини, як вуглекислий газ, пил та озон. Гранично допустимі концентрації (ГДК) цих речовин у повітрі робочої зони наведені у таблиці 5.2.

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування та вологого прибирання.

Виробниче освітлення

Оптимальне освітлення робочого простору є визначальним елементом у створенні комфортних умов праці. Правильне проектування та вибір освітлювальних приладів для виробничих приміщень забезпечує чітке

сприйняття працівником об'єктів та інструментів без надмірного навантаження на зір, що сприяє зменшенню ймовірності виробничого травматизму та професійних захворювань очей.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	10	4	4
Озон	0,16	0,03	4

Система освітлення в приміщенні комбінована та включає як штучне, так і природне світло. Штучне освітлення реалізоване у вигляді загального рівномірного освітлення, розміщеного для забезпечення оптимальної освітленості робочих місць. Природне освітлення надходить через віконні прорізи, орієнтовані на північний схід. Обидва типи освітлення використовуються залежно від конкретних обставин та потреб виробничого процесу для гарантування зручних та безпечних умов праці.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення зазначені у таблиці 5.3:

передбачено наступні заходи:

1. Для локального освітлення використовуються пересувні світильники, закріплені на спеціальних шарнірних механізмах, що дозволяють регулювати їх положення відповідно до індивідуальних потреб працівника.

2. Віконні прорізи обладнані регульованими світлозахисними пристроями, такими як жалюзі, для контролю рівня природного освітлення.

Для підтримання нормативних показників освітленості здійснюється систематичне очищення вікон та світильників не рідше ніж двічі на рік, а також своєчасна заміна ламп, що вийшли з ладу.

Таблиця 5.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Для забезпечення належного рівня освітленості в робочому приміщенні

Виробничий шум

Шум являє собою комбінацію звуків різної частоти та сили, що виникають внаслідок коливань частинок у пружних середовищах (твердих, рідких або газоподібних). Будь-який звук, що є небажаним або дискомфортним для людини, також класифікується як шум. Вплив шуму на людський організм умовно поділяється на специфічний, що призводить до змін у слуховому апараті, та неспецифічний, що впливає на інші органи та системи. Санітарні норми щодо виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку встановлені в ДСН 3.3.6.037-99. Допустимі значення звукового тиску для виконання роботи представлені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Мінімізація негативного впливу шуму на працівників є важливим аспектом забезпечення безпечних умов праці, що потребує застосування цілого ряду організаційних, технічних та медичних заходів. У досліджуваному приміщенні рівень шуму відповідає встановленим нормам, проте у випадку його перевищення передбачається використання звукоізоляційних перегородок.

Виробничі випромінювання

Шкідливість виробничого випромінювання для працівника залежить від типу випромінювання, його інтенсивності, частоти, тривалості впливу та індивідуальних особливостей організму людини. Загалом, виробничі випромінювання можуть спричиняти широкий спектр негативних наслідків для здоров'я, які умовно поділяють на короткострокові та довгострокові.

У приміщенні, де здійснюється дослідження можлива поява електромагнітне випромінювання. Важливо зазначити, що сучасна комп'ютерна техніка, як правило, випромінює ЕМВ низької інтенсивності, і при дотриманні правил безпеки ризик для здоров'я є мінімальним. Однак, при тривалій роботі та недотриманні ергономічних вимог можуть виникати втомлюваність, головний біль та інші неприємні симптоми.

Гранично допустимі значення характеристик ЕМП для умов праці, в яких знаходиться дослідник, вказана в таблиці 5.5

Таблиця 5.5 - Гранично допустимі значення характеристик ЕМП

Найменування параметрів	Допустиме Значення
Напруженість електромагнітного поля по електричній складовій на відстані 50 см від поверхні відеомонітора	10 В / м
Напруженість електромагнітного поля по магнітній складовій на відстані 50 см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати для дорослих користувачів	20 кВ / м
Напруженість електромагнітного поля на відстані 50 см навколо ВДТ по електричній складовій повинна бути не більше:	
в діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц;	25 В / м
в діапазоні частот 2 - 400 кГц	2,5 В / м
Щільність магнітного потоку повинна бути не більше:	
в діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц;	250нТл
в діапазоні частот 2 - 400 кГц	25 нТл
Поверхневий електростатичний потенціал не повинен перевищувати	500 В

Для забезпечення безпеки проектувальника необхідно дотримуватися вимог НПАОП 0.00-7.15-18 та встановленого режиму часу під час роботи з ПК.

5.3. Пожежна безпека

У приміщенні, де проводилося дослідження, використовуються винятково негорючі речовини та матеріали, що перебувають у холодному стані. За класифікацією вибухопожежної та пожежної безпеки, дане приміщення належить до категорії «Д». Це значно знижує ризик виникнення та поширення пожежі. Однак, необхідно враховувати потенційну небезпеку, пов'язану з електрообладнанням.

За показниками вогнестійкості будівля належить до другої категорії, що узгоджується з відповідними вимогами. Робоча зона приміщення класифікується як вибухонебезпечна зона В-Па та пожежонебезпечна зона П-Па, оскільки утворення вибухонебезпечної концентрації пилу та волокон можливе лише внаслідок аварійних ситуацій або несправностей обладнання. Така класифікація передбачає певні вимоги до конструктивних елементів будівлі та інженерних систем. Для забезпечення належного рівня безпеки необхідно вживати заходів щодо запобігання аваріям та несправностям обладнання, що можуть призвести до утворення небезпечних концентрацій. Регулярні перевірки та технічне обслуговування обладнання є важливими елементами підтримання безпечного робочого середовища.

Технічні рішення системи запобігання пожежі

У досліджуваному приміщенні відсутні легкозаймисті, самозаймисті та вибухові речовини, потужні електроустановки та обладнання, що іскрить, а також механізми з рухомими частинами, знос чи корозія яких могли б спровокувати пожежу. Таким чином, основні фактори ризику виникнення пожежі практично знівельовані. Проте, для забезпечення максимальної пожежної безпеки, рекомендується впровадити наступні превентивні заходи: призначення відповідальних осіб за пожежну безпеку приміщення; щорічне

проведення повторних протипожежних інструктажів та навчань з пожежно-технічного мінімуму для відповідальних осіб; підтримання засобів протипожежного захисту в повній справності; своєчасне повідомлення про будь-які несправності пожежної техніки, систем протипожежного захисту та водопостачання. Крім того, необхідно регулярно проводити огляд приміщення на предмет дотримання вимог пожежної безпеки. Слід також забезпечити наявність та актуальність планів евакуації. Важливим є проведення роз'яснювальної роботи з персоналом щодо дій у випадку пожежі. Рекомендується мати первинні засоби пожежогасіння в легкодоступних місцях, навіть за відсутності явних факторів ризику. Дотримання цих простих правил значно підвищить рівень пожежної безпеки та мінімізує потенційні наслідки у разі непередбачуваної ситуації.

Технічні рішення системи протипожежного захисту

У досліджуваному приміщенні діють такі правила пожежної безпеки:

1. Для всіх будівель та приміщень, де розміщено комп'ютерну техніку, мають бути визначені категорії вибухо- та пожежонебезпеки, а також класи зон відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), з обов'язковим зазначенням цієї інформації на вхідних дверях.
2. Для звукоізоляції стін та стелі використовуються лише негорючі або важкогорючі матеріали.
3. Промивання деталей здійснюється із застосуванням негорючих мийних засобів. Використання горючих речовин для промивання допускається виключно у спеціально обладнаних приміщеннях, оснащених ефективною припливно-витяжною вентиляцією.

У всіх приміщеннях будівлі розміщено плани евакуації з чітко позначеними напрямками руху та евакуаційними шляхами, а також інструкції щодо дій у разі виникнення пожежі. Евакуація персоналу при пожежі здійснюється через два сходові марші, розташовані в різних частинах коридорів. Ширина евакуаційних шляхів становить не менше одного метра, а максимальна відстань від будь-якого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не перевищує 25 метрів.

Для гасіння пожежі всередині будівлі функціонує внутрішній пожежний водогін, обладнаний пожежними кранами та приєднаними до них пожежними рукавами. У кожному приміщенні та на кожному поверсі встановлено вогнегасники порошкового типу ВП-5. Біля будівлі розміщено пожежний щит, укомплектований вогнегасником, багром, лопатою, ломом та відром. Поруч зі щитом знаходиться ящик з піском об'ємом 5 кубічних метрів. Для забезпечення безперебійної роботи системи протипожежного водопостачання необхідно проводити регулярні перевірки її працездатності. Також важливо слідкувати за наявністю та терміном придатності вогнегасників, а персонал повинен бути навчений правилам їх використання. Пожежний щит та ящик з піском повинні бути легкодоступними та укомплектованими згідно з нормами.

ВИСНОВОК

Проведено аналіз енергоефективних магістральних мереж.

На основі дослідження сучасних тенденцій розвитку бездротових мереж, з урахуванням технічних обмежень енергоефективних технологій передачі даних на великі відстані, обґрунтовано доцільність використання гратчастої (mesh) топології на базі LoRaWAN для реалізації систем обміну даними в умовах щільної міської забудови. Впровадження такої топології дозволяє розширити зону покриття мережі, підвищити надійність комунікації IoT-пристроїв та зменшити енергоспоживання. На цій основі сформульовано комплекс завдань дослідження, ключовим з яких є розробка моделей маршрутизації та методів побудови енергоефективних магістральних mesh-мереж.

Виконано аналіз протоколів маршрутизації для бездротових mesh-мереж.

Досліджено особливості організації маршрутизації у бездротових mesh-мережах, де проблема надійної передачі даних від джерела до одержувача є критичною, особливо за умов можливої втрати маршруту. Розглянуто класифікацію протоколів маршрутизації на проактивні та реактивні, а також метрики маршруту, зокрема мінімізацію кількості проміжних вузлів. Особливу увагу приділено параметрам якості обслуговування (QoS), таким як затримка, втрата пакетів та стабільність зв'язку. Встановлено, що для енергоефективних LoRaWAN-мереж топології «зірка» доцільно адаптувати або розробити альтернативні методи маршрутизації, здатні враховувати обмеження в енергоспоживанні та забезпечувати необхідний рівень QoS.

Розроблено модель фрагмента енергоефективної mesh-мережі дальнього радіусу дії.

В умовах активного розвитку концепцій «розумного будинку» та «розумного міста» запропоновано модель енергоефективної гратчастої мережі на базі технології LoRa, що забезпечує з'єднання між датчиками, виконавчими пристроями та інфраструктурою загального доступу. Розроблена гібридна архітектура враховує особливості низького енергоспоживання, високої дальності

передачі та сумісності з іншими бездротовими технологіями. Модель реалізована з урахуванням використання гетерогенних шлюзів, що забезпечують можливість обміну даними між різними сегментами міської мережі.

Запропоновано метод маршрутизації в LoRa-мережах з використанням машинного навчання.

Розроблено метод оцінки комплексного індикатора якості з'єднання на основі таких параметрів, як RSSI (рівень прийнятого сигналу), SNR (відношення сигнал/шум) та PRR (швидкість прийому пакетів). Для класифікації рівнів якості зв'язку використано векторну машину підтримки (SVM) — один з ефективних методів машинного навчання. За результатами моделювання метод продемонстрував високу точність класифікації (середнє значення точності — 95%), що дозволяє використовувати його як основу для побудови динамічних енергоефективних маршрутів у мережах дальнього радіусу дії.

Проведено оцінку впливу небезпечних і шкідливих факторів на розробників під час створення LoRaWAN-мереж.

Проаналізовано чинники, які можуть впливати на безпеку праці під час науково-дослідних робіт, пов'язаних із проектуванням і тестуванням бездротових мереж. Надано рекомендації щодо організації безпечних умов праці, зокрема в роботі з радіоелектронним обладнанням, джерелами випромінювання та лабораторними стендами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 802.11s-2011 - IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 10: Mesh Networking [текст]. — IEEE, 2011. — URL: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2011.6018236>.
2. ITU-T. Recommendation Y.4903/L.1603 (10/16) [електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4903-201610-I/en>
3. Q.3055 signalling protocol for heterogeneous internet of things gateways [електронний ресурс]. — ITU-T, 2019. — URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Q.3055-201912-I>
4. Q.4060 the structure of the testing of heterogeneous internet of things gateways in a laboratory environment [електронний ресурс]. — ITU-T, 2019. — URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Q.4060-201810-I>
5. Smart Sustainable Cities [електронний ресурс]. — ITU-T. — URL: <https://www.itu.int/en/ITU-T/ssc/Pages/default.aspx>
6. LoRa Alliance. LoRaWAN® Specification v1.0.4 [Електронний ресурс]. — LoRa Alliance, 2020. — Режим доступу: <https://loro-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v104> — Дата звернення: 10.06.2025.
7. Sornin N., Luis M., Eirich T., Kramp T. LoRaWAN Specification // LoRa Alliance Technical Committee. — 2015. — Version 1.0.
8. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things // Sensors. — 2016. — Vol. 16, №9. — DOI: 10.3390/s16091466.
9. Reynders B., Meert W., Pollin S. Range and Coexistence Analysis of Long Range Unlicensed Communication // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. — 2016. — №1. — С. 1–15. — DOI: 10.1186/s13638-016-0536-x.
10. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios

// IEEE Wireless Communications. – 2016. – Vol. 23, №5. – С. 60–67. – DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743.

11. Semtech Corporation. AN1200.22 LoRa Modulation Basics. – [Электронный ресурс]. – Semtech, 2015. – Режим доступа: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf> – Дата звернення: 10.06.2025.

12. Petäjäjärvi J., Mikhaylov K., Hänninen T., Pettissalo M., Janhunen J., Iinatti J. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2017. – Vol. 13(3). – DOI: 10.1177/1550147717699412.

13. Sanchez-Iborra R., Cano M. State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services // Sensors. – 2016. – Vol. 16, №5. – С. 708. – DOI: 10.3390/s16050708.

14. Kurkowski, S., Navidi, W. and Camp, T. Discovering Variables that Affect MANET Protocol Performance / S. Kurkowski, W. Navidi, T. Camp // 2007 IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference. — IEEE, 2007. — Pp. 1237–1242.

15. LoRaWAN Specification V. 1.0.2 / LoRa Alliance, Inc. — 70 с.

16. Lundell, D. A routing protocol for lora mesh networks / D. Lundell, A. Hedberg, C. Nyberg, E. Fitzgerald // 2018 19th International Symposium on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks”(WoWMoM). — IEEE, 2018. — Pp. 14– 19.

17. Luo, J. A new link quality estimation mechanism based on LQI in WSN / J. Luo, L. Yu, D. Zhang, Z. Xia, W. Chen // Information Technology Journal. — 2013. — Vol. 12, no. 8. — Pp. 1626

18. Makodia, B. Implementing and analyzing routing protocols for self-organized vehicular adhoc network / B. Makodia, T. Patel, K. Parmar, S. Hadia, A. Shah // 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE). — IEEE, 2013. — Pp. 1–6.

19. Makolkina, M. Transmission of augmented reality contents based on ble 5.0

mesh network / M. Makolkina, V. D. Pham, T. D. Dinh et al. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2018, ruSMART 2018. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, 2018. — Vol. 11118. — Pp. 394–404.

20. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

21. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

22. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028

23. ДСан ПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

24. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

25. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Електронний ресурс] – Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819

26. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

27. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських

приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

28. СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php>

29. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

30. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>

31. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

32. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf

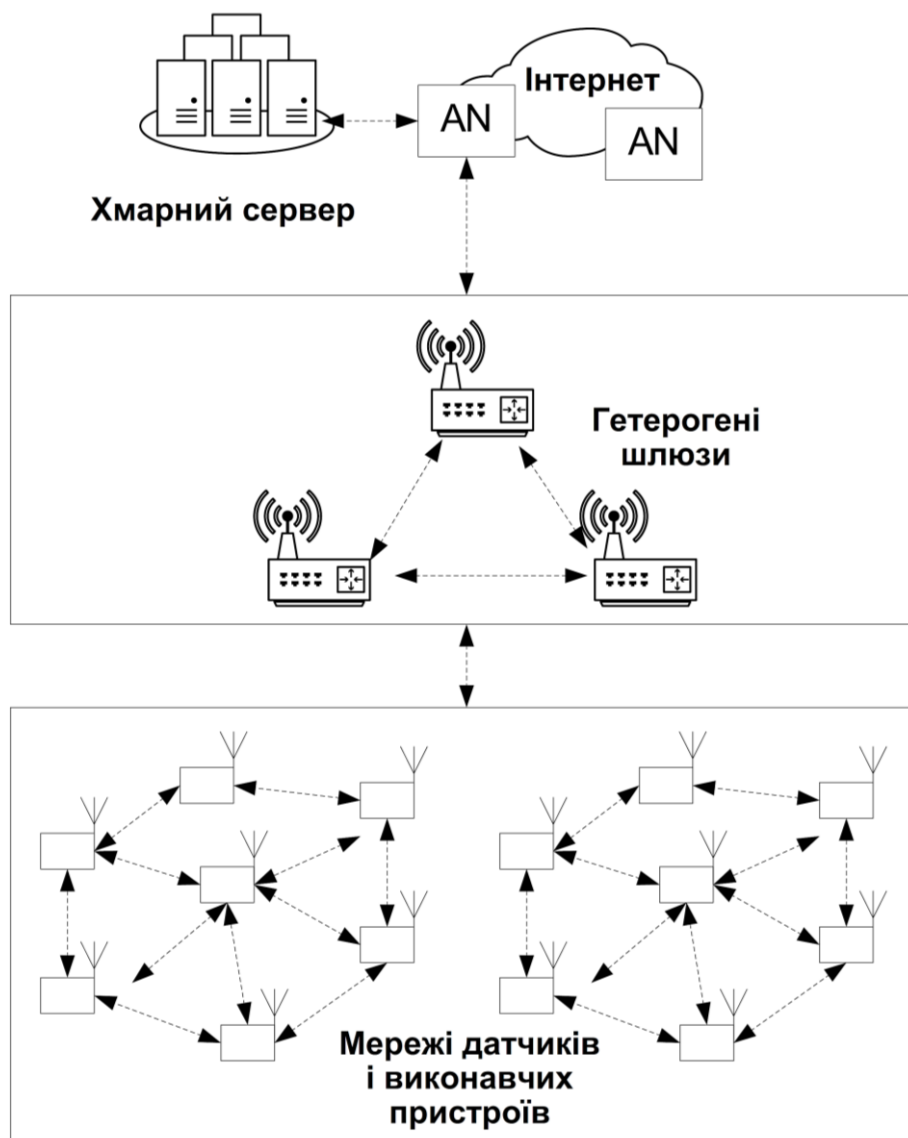
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

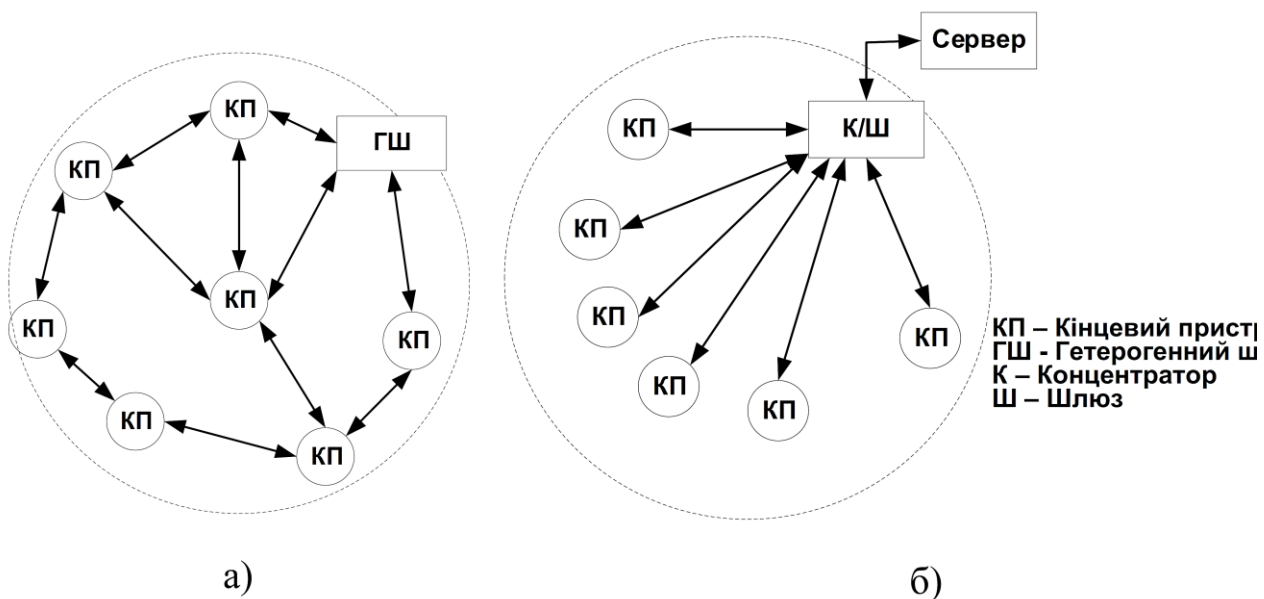
Побудова мережі на основі LORA WAN

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

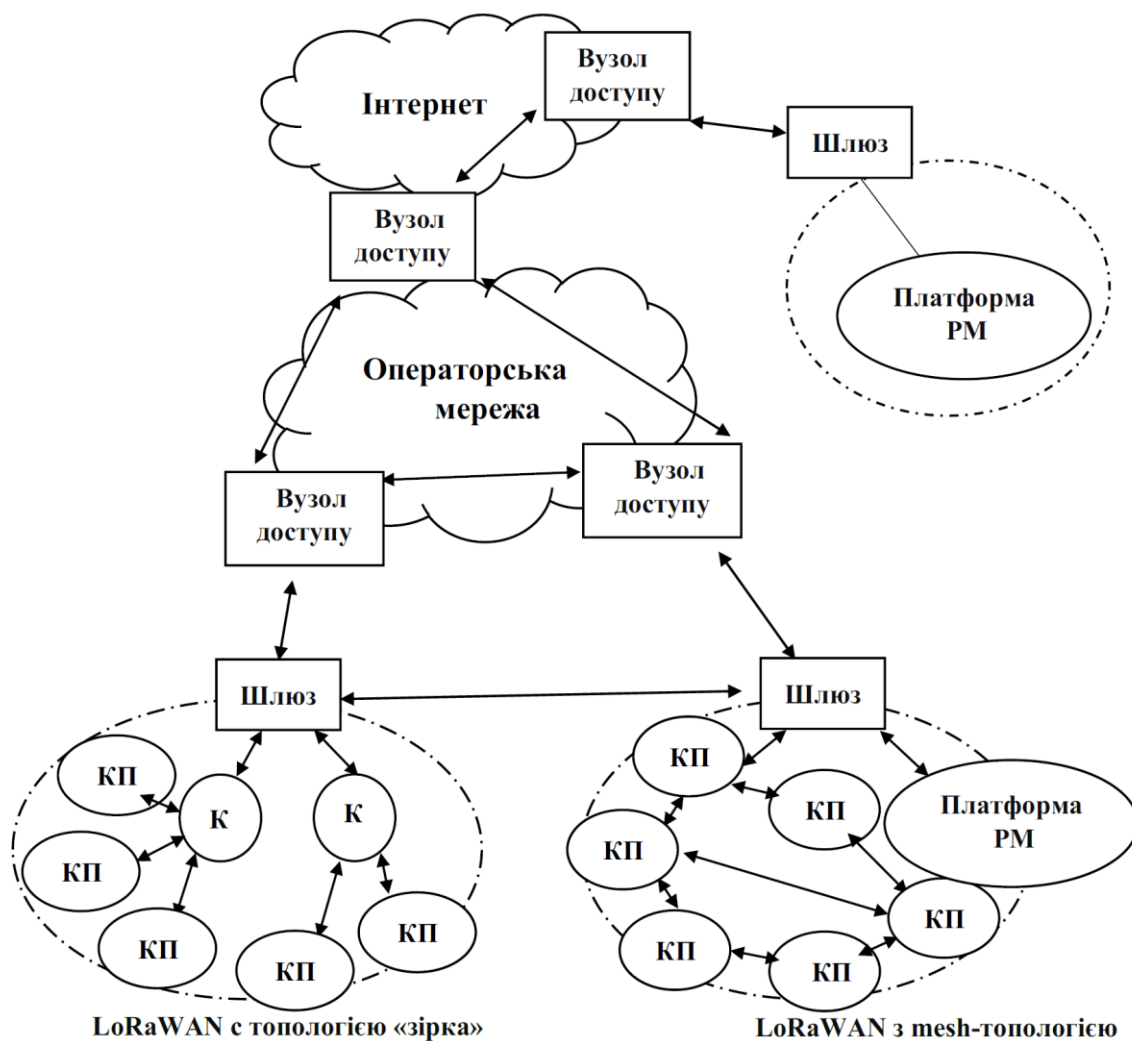
Гібридні мережі в системі розумного міста



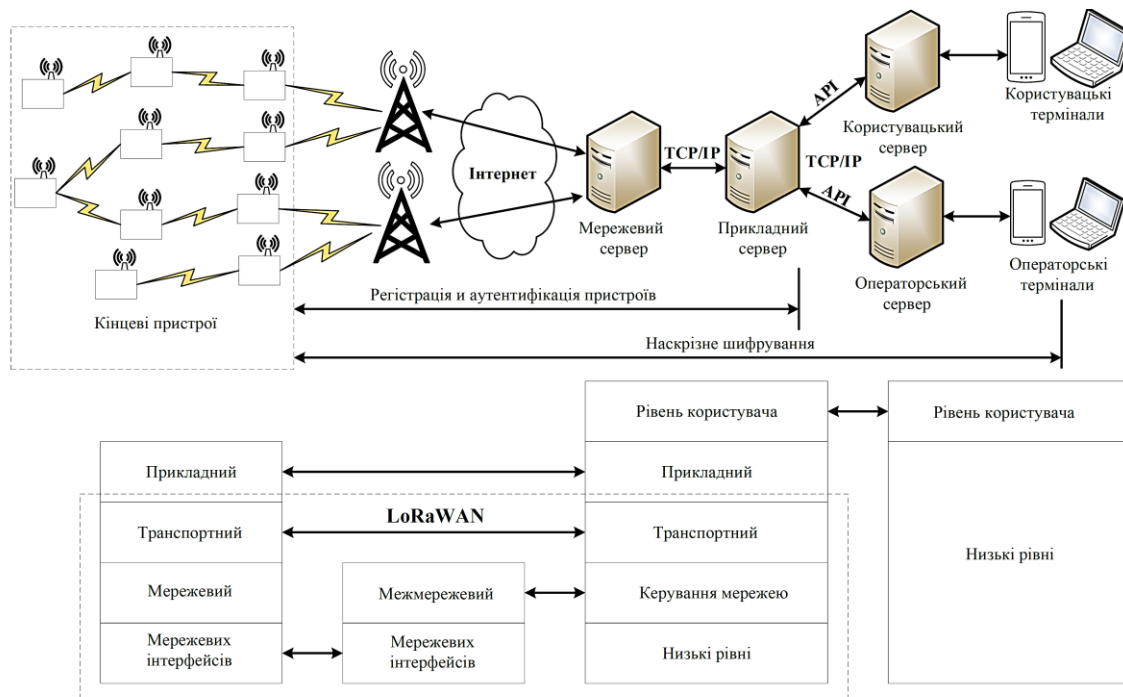
Структура мережі LoRaWAN для: а) топології «зірка»; б) комірчаста топологія



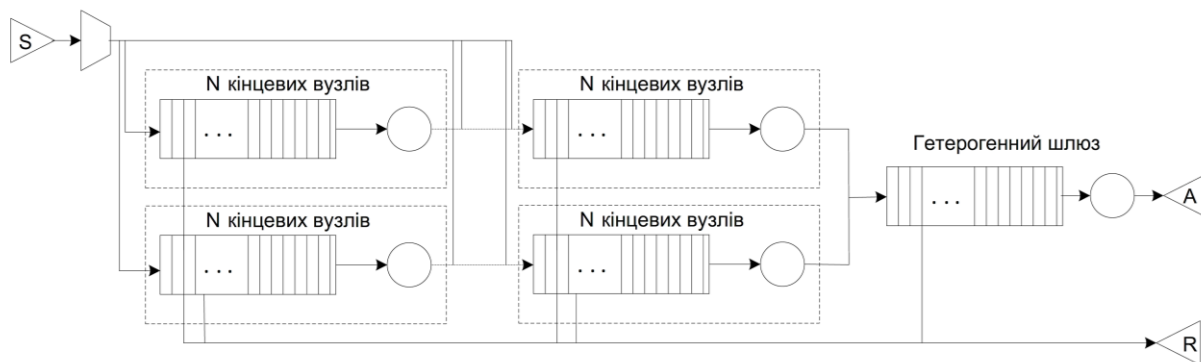
Структура функціонування мережі в рамках системи розумного міста



Ієрархічна архітектура енергоефективної мережі дальнього радіусу дії



Структура імітаційної моделі мережі: а) з ГШ; б) без ГШ



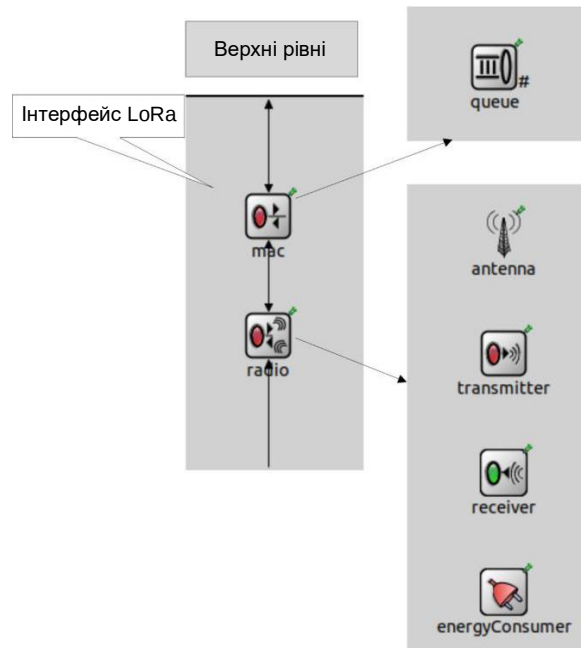
а)



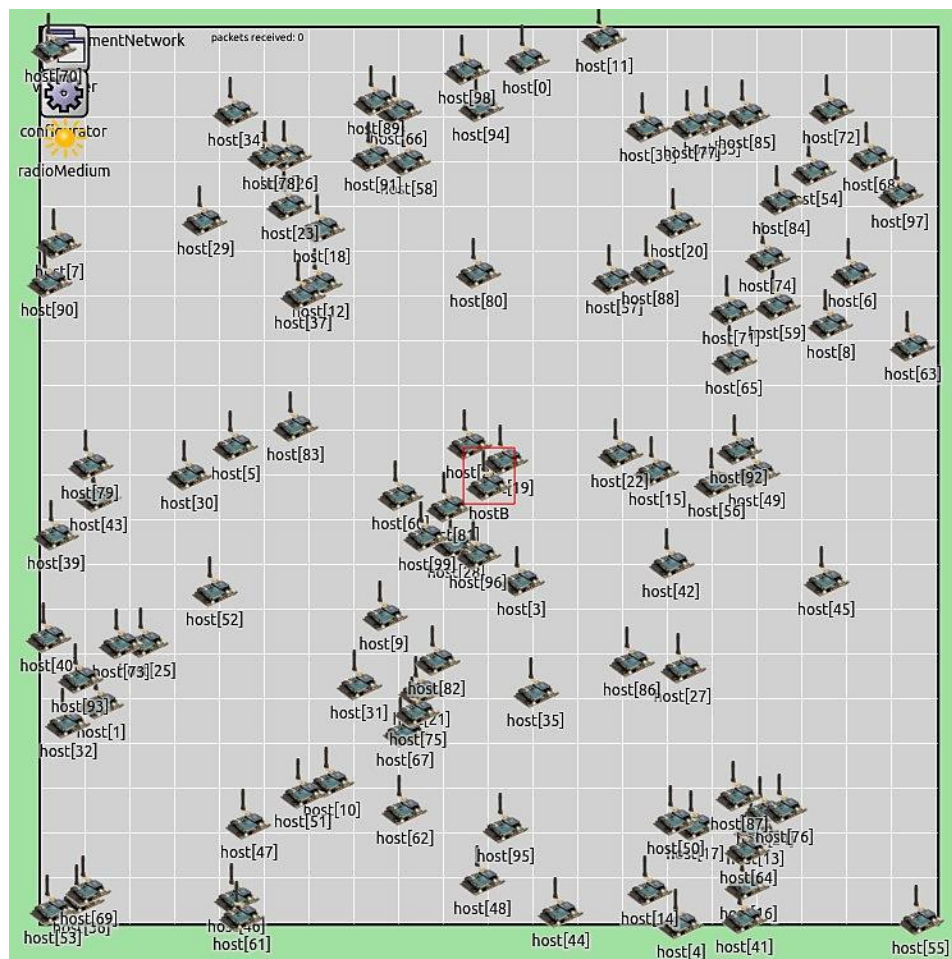
б)

	Джерело запиту		Пункт розрахунку запиту
	Буфер запиту		Точка прийняття
	Селектор маршруту		Точка відхилення

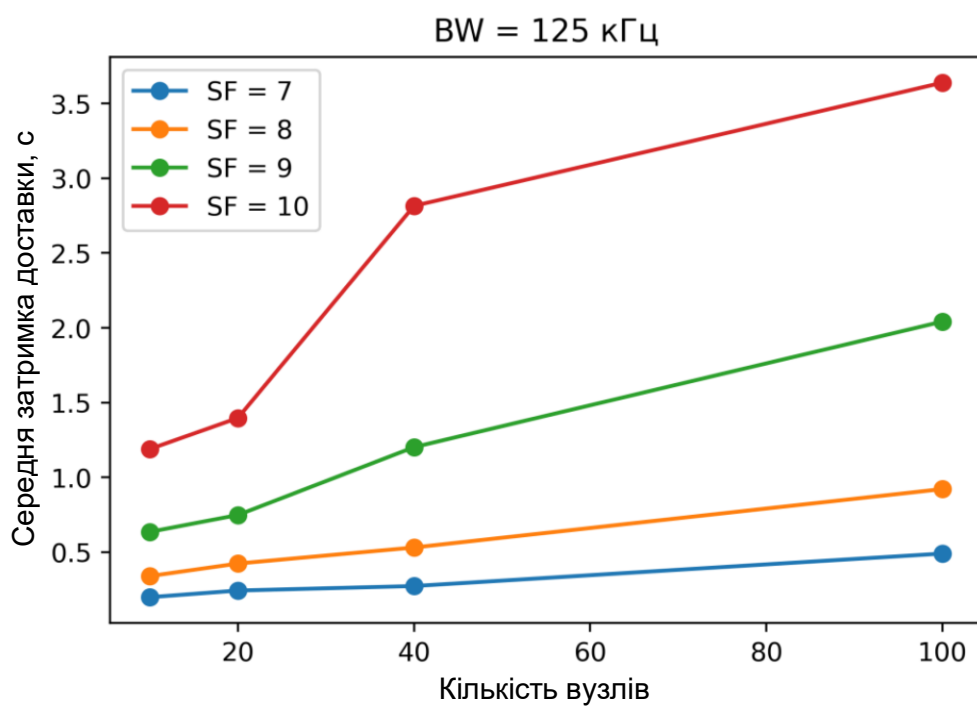
Комп'ютерне моделювання



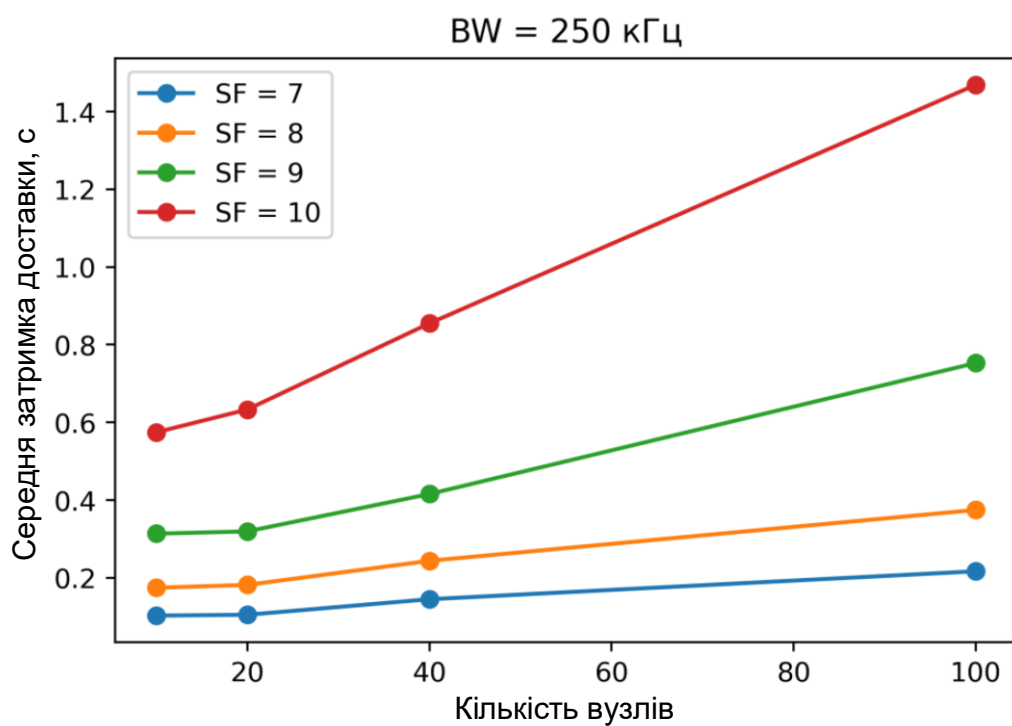
Вузол мережі в OMNET++



Представлення моделі мережі в OMNET++



а)



б)

Середня затримка в доставці пакетів

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Дослідження пристроїв модуляції та демодуляції OFDM - сигналів

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-23мс
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 15,11 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Васильківський М.В., гарант ОПП

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Скрипка А.В.

(прізвище, ініціали)