

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
Циклова комісія комп'ютерних систем та мереж
(повна назва циклової комісії)

Допустити до захисту
Голова випускової циклової комісії
комп'ютерних систем та мереж

(повна назва циклової комісії)
Ірина КРАВЧУК
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
« 10 » 06 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОГО СТУПЕНЯ
ФАХОВИЙ МОЛОДШИЙ БАКАЛАВР

Тема: Дослідження можливостей та особливостей побудови бездротових
комп'ютерних мереж на основі технологій IEEE 802.11 у сільській
місцевості

Група: 3-013 Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Здобувач освіти

(підпис) Ігор СІДОРСЬКИЙ
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис) Тетяна Новік
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Консультант з оформлення
пояснювальної записки

(підпис) Оксана ОСАДЧА
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

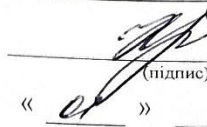
Кривий Ріг 2025 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Відділення комп'ютерної та програмної інженерії
Циклова комісія комп'ютерних систем та мереж
Освітньо-професійний ступінь фаховий молодший бакалавр
Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова випускової циклової комісії
комп'ютерних систем та мереж


(повна назва циклової комісії) Ірина КРАВЧУК
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
« 01 » 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ОСВІТИ

Сідорському Ігорю Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження можливостей та особливостей побудови бездротових комп'ютерних мереж на основі технологій IEEE 802.11 у сільській місцевості

Керівник роботи Новік Тетяна Миколаївна, викладач вищої категорії

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

затверджені наказом по коледжу від « 04 » 04 2025 року № 50-ст

2. Строк подання здобувачем освіти роботи з _____ по _____

3. Вихідні дані до роботи _____

Дослідження можливостей та особливостей побудови бездротових комп'ютерних мереж на основі технологій IEEE 802.11 у сільській місцевості

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) обґрунтування доцільності дослідження бездротової мультисервісної мережі на базі технології IEEE 802.11; аналіз бездротових стандартів IEEE 802.11

побудова моделі бездротової мережі; впровадження бездротової мультисервісної мережі на основі технології IEEE 802.11 та отримані результати

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

Презентація Microsoft PowerPoint

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Узгодження технічного завдання з керівником кваліфікаційної роботи</i>	24.03.2025- 27.03.2025	<i>виконано</i>
2	<i>Підбір та вивчення науково-технічної літератури за темою кваліфікаційної роботи</i>	28.03.2025- 31.03.2025	<i>виконано</i>
3	<i>Обґрунтування вибору програмних засобів</i>	01.04.2025- 04.04.2025	<i>виконано</i>
4	<i>Опис компонентів. Обґрунтування їх вибору.</i>	05.04.2025- 08.04.2025	<i>виконано</i>
5	<i>Розробка програмного забезпечення</i>	09.04.2025- 28.04.2025	<i>виконано</i>
6	<i>Дослідження ефективності реалізованих методів.</i>	29.04.2025- 04.05.2025	<i>виконано</i>
7	<i>Написання пояснювальної записки</i>	12.05.2025- 25.05.2025	<i>виконано</i>
8	<i>Перевірка на плагіат пояснювальної записки</i>	26.05.2025- 01.06.2025	<i>виконано</i>
9	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи</i>	02.06.2025- 06.06.2025	<i>виконано</i>
10	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>		

Здобувач освіти


(підпис)

Ігор СІДОРСЬКИЙ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

Тетяна Новік

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)



метадані

Звіт подібності

Назва організації
Ukrainian national aviation university
 Заголовок
Сідорський_3012_НА ПРОВЕРКУ
 Автор
 Науковий керівник / Експерт
Сідорський Кравчук І.
 підрозділ
Криворізький Фаховий коледж

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна і уповноважена особа.

19.99%

19.99%

КП 1

25

Довжина фраз для коефіцієнта подібності 2

1.42%

1.42%

КЦ

11985

Кількість слів

86492

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових слотворень. Ці слотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Слотворення тексти можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		1
Інтервали		0
Мікропробіли		15
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		254

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Дослідження можливостей та особливостей побудови бездротових комп'ютерних мереж на основі технологій IEEE 802.11 у сільській місцевості» містить: 58 сторінок основного тексту, 23 рисунки, 19 використаних джерел.

БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ, IEEE 802.11, WI-FI, СІЛЬСЬКА МІСЦЕВІСТЬ, КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ, РАДІОЗВ'ЯЗОК, ТОПОЛОГІЯ МЕРЕЖІ, ЯКІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ.

У даній кваліфікаційній роботі досліджуються можливості та особливості побудови бездротових комп'ютерних мереж на основі технологій IEEE 802.11 у сільській місцевості з метою забезпечення надійного та якісного інтернет-з'єднання в умовах обмеженої інфраструктури.

Метою роботи є дослідження технічних можливостей та розробка рекомендацій щодо побудови ефективних бездротових мереж на основі стандарту IEEE 802.11 для використання в сільській місцевості. Актуальність роботи обумовлена зростаючою потребою в забезпеченні якісного інтернет-доступу в сільських регіонах, де традиційні дротові з'єднання часто є недоступними або економічно недоцільними, а також необхідністю подолання цифрового розриву між міськими та сільськими територіями.

Об'єктом дослідження є бездротові комп'ютерні мережі, побудовані на основі технологій IEEE 802.11 у специфічних умовах сільської місцевості. Предметом дослідження є технічні характеристики, особливості проектування та впровадження бездротових мережевих рішень стандарту 802.11 з урахуванням географічних, технічних та економічних обмежень сільських територій. Для реалізації дослідження проаналізовано існуючі стандарти IEEE 802.11, вивчено специфіку поширення радіохвиль у сільській місцевості, розглянуто методи підвищення якості та стабільності бездротового з'єднання в умовах великих відстаней та природних перешкод.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗДРОТОВОЇ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ <i>IEEE</i> 802.11.....	8
1.1 Сучасні тенденції розвитку бездротових мультисервісних мереж.....	8
1.2 Стандарт <i>IEEE</i> 802.11 та його місце в бездротових мережах	12
1.3 Якість обслуговування (<i>QoS</i>) у бездротовій мережі	14
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ БЕЗДРОТОВИХ СТАНДАРТІВ <i>IEEE</i> 802.11.....	17
2.1 Історія розвитку та ключові характеристики стандартів <i>IEEE</i> 802.11	17
2.2 Позичування стандарту <i>IEEE</i> 802.11 у моделях <i>OSI</i> та <i>TCP/IP</i>	23
2.3 Порівняльний аналіз стандартів <i>IEEE</i> 802.11	27
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА МОДЕЛІ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ.....	29
3.1 План тестування та розгортання бездротової мережі	29
3.2 Обґрунтування складу використовуваного обладнання	30
3.3 Визначення топології бездротової мережі	33
3.3.1 Розробка фізичної топології бездротової мережі	33
3.3.2 Розрахунок зони покриття проектованої мультисервісної мережі.....	35
3.3.3 Проектування логічної топології мультисервісної мережі.....	38
РОЗДІЛ 4 ВПРОВАДЖЕННЯ БЕЗДРОТОВОЇ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ <i>IEEE</i> 802.11 ТА ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	39
4.1 Результати впровадження бездротової мережі	39
4.2 Пропозиції щодо модернізації досліджуваної мережі	53
ВИСНОВОК.....	

55 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ

ДЖЕРЕЛ.....	57
-------------	----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

IoT (англ. *Internet of Things*) – Інтернет речей: Концепція мережі фізичних об'єктів («речей»), оснащених сенсорами, програмним забезпеченням та іншими технологіями для підключення та обміну даними з іншими пристроями та системами через Інтернет.

MAC (англ. *Media Access Control*) – управління доступом до середовища:

Підрівень каналного рівня (*Data Link Layer*) моделі *OSI*, відповідальний за адресацію пристроїв у локальній мережі та керування доступом до фізичного середовища передачі даних.

OSI (англ. *Open Systems Interconnection model*) – еталонна модель взаємодії відкритих систем: Концептуальна модель, що стандартизує функції телекомунікаційної або обчислювальної системи у вигляді семи абстрактних рівнів.

QoS (англ. *Quality of Service*) – якість обслуговування: Сукупність технологій та механізмів у мережах передачі даних, що дозволяють надавати різні пріоритети та гарантії для різних типів мережевого трафіку (наприклад, голос, відео, дані).

SSID (англ. *Service Set Identifier*) – ідентифікатор набору служб: Унікальне ім'я, що ідентифікує бездротову локальну мережу (*WLAN*) стандарту *IEEE 802.11*.

TCP/IP (англ. *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) – набір фундаментальних мережевих протоколів, що є основою функціонування глобальної мережі Інтернет та багатьох локальних мереж.

Wi-Fi (англ. *Wireless Fidelity* – умовна розшифровка, початково маркетинговий термін): Торгова марка, що належить *Wi-Fi Alliance*, та загальноживана назва для технологій бездротових локальних мереж (*WLAN*), що базуються на стандартах сімейства *IEEE 802.11*.

WLAN (англ. *Wireless Local Area Network*) – бездротова локальна обчислювальна мережа: Тип локальної обчислювальної мережі, що використовує радіохвилі як середовище передачі даних у межах обмеженої території.

7

ВСТУП

Сьогоднішнє суспільство вже неможливо уявити без активного використання інформаційних технологій та безперервного обміну даними в усіх сферах життя. Із щорічним зростанням обсягів інформації підвищуються вимоги до ефективності та швидкості її передавання.

Серед ключових вимог до сучасних телекомунікаційних систем є забезпечення гнучкості доступу до інформації без прив'язки до конкретного робочого місця. Оскільки не всім користувачам зручно використовувати дротові

з'єднання, саме бездротові технології забезпечують найвищий рівень мобільності. Це пояснює постійне зростання кількості пристроїв, що підтримують бездротовий зв'язок, а також активне впровадження таких мереж у повсякденне життя. Мобільність, швидкість розгортання та гнучкість — основні переваги бездротових рішень у порівнянні з дротовою інфраструктурою.

Крім того, сучасні бездротові мережі повинні бути мультисервісними, тобто здатними забезпечувати одночасне надання кількох типів послуг незалежно від використовуваної технології передавання. Комп'ютерна мережа — це сукупність взаємозв'язаних пристроїв, які функціонують у єдиному середовищі для обміну ресурсами та інформацією.

Завдання дослідження:

- Аналіз поточних тенденцій розвитку бездротових мереж; -
- Порівняння основних стандартів *IEEE 802.11*;
- Дослідження методів забезпечення якості обслуговування в мультисервісних бездротових мережах;
- Створення моделі бездротової мультисервісної мережі;
- Реалізація та оптимізація таких мереж.

Увага дослідження зосереджена переважно на технологіях *802.11n* та *802.11ac*, які демонструють високу ефективність у створенні мультисервісних середовищ. Об'єктом вивчення є бездротові мультисервісні мережі та їх технічні характеристики.

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗДРОВОЇ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ *IEEE 802.11*

1.1 Сучасні тенденції розвитку бездротових мультисервісних мереж

Сьогодні бездротові технології відіграють ключову роль у забезпеченні комунікацій у цифровому суспільстві. Переважна більшість сучасних електронних пристроїв — від смартфонів і комп'ютерів до «розумної» побутової техніки — здатна підключатися до Інтернету, причому саме за допомогою бездротового

з'єднання. Це підкреслює важливість впровадження й удосконалення бездротових мереж як основи функціонування багатьох сервісів і систем.

Використання таких мереж стало настільки звичним, що їх відсутність уявити важко. Масове впровадження бездротових рішень зумовлює як зниження вартості обладнання через конкуренцію між виробниками, так і постійне зростання попиту на телекомунікаційні послуги. Це, своєю чергою, зумовлює актуальність дослідження та вдосконалення таких систем.

Переваги бездротових мереж зумовлюють їхній стрімкий розвиток. До ключових переваг належать:

- гнучкість у зміні топології мережі без необхідності переривання її роботи;
- висока пропускну здатність (понад 1 Гбіт/с);
- швидке розгортання та масштабування мережі;
- надійні засоби захисту від несанкціонованого доступу;
- відсутність потреби у фізичному прокладанні кабельної інфраструктури.

Щоб оцінити сучасний стан і перспективи розвитку бездротових мультисервісних систем, доцільно звернутися до історичних етапів їх становлення. Перші кроки у сфері бездротової передачі даних були зроблені наприкінці XIX століття. У 1896 році Гульєльмо Марконі запатентував технологію радіотелеграфу, яка стала основою для подальшого розвитку радіозв'язку. Згодом,

9

у 1970-х роках XX століття, у США з'явилися перші аналогові бездротові телефонні системи, що дозволили передавати голос по радіоканалах.

Наступним кроком стало створення систем стільникового зв'язку, здатних забезпечувати передачу сигналу між різними осередками мережі без втрати з'єднання. Це стало підґрунтям для формування мереж 1G, які з часом поступилися місцем цифровим технологіям другого покоління (2G), що дозволили одночасне обслуговування більшої кількості абонентів завдяки методам *TDMA*, *FDMA* і пізніше – *GPRS* та *EDGE*.

Подальший розвиток технологій привів до появи 3G, де вперше широко застосовувалися методи *WCDMA* та *CDMA*. Це дозволило суттєво підвищити швидкість передавання даних, забезпечити мультисервісність та покращити якість

зв'язку. Згодом були впроваджені *HSPA* та *HSPA+* — попередники *4G*, що зробили реальним мобільний широкополосний доступ.

Справжнім проривом стали мережі четвертого покоління (*4G*) на основі технології *LTE*, які використовують ортогональне частотне мультиплексування (*OFDM*) і дозволяють досягати швидкостей до 100 Мбіт/с. Це забезпечило комфортну роботу з відеоконтентом високої якості, *IP*-телефонією та онлайн сервісами.

П'яте покоління мобільного зв'язку (*5G*) розширює можливості ще більше. Завдяки концепціям *Massive MIMO*, *Beamforming*, *NOMA*, а також високим частотам (до 100 ГГц), *5G* обіцяє швидкість понад 10 Гбіт/с, мінімальні затримки та масштабну підтримку пристроїв Інтернету речей (*IoT*).

Окрім широкополосних мобільних мереж, активно розвиваються також бездротові локальні мережі (*WLAN*), персональні мережі (*WPAN*), а також міські бездротові мережі (*WMAN*), які дозволяють створення локальних та регіональних інформаційних середовищ із високим рівнем доступності.

Таким чином, бездротові мультисервісні мережі на основі стандарту *IEEE 802.11* є логічним кроком еволюції телекомунікаційних технологій і відіграють дедалі важливішу роль у забезпеченні потреб сучасного суспільства.

10

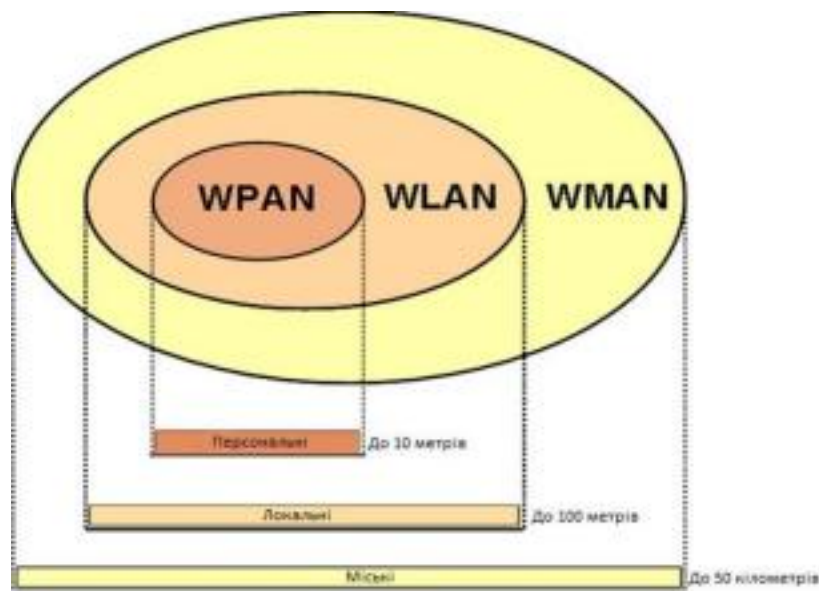


Рисунок 1.1 - Тип бездротової мережі за радіусом дії

Bluetooth – технологія бездротового персонального зв'язку (*WPAN*)

Стандарт *Bluetooth* призначений для створення бездротових персональних мереж (*WPAN*), що функціонують навколо користувача або цифрових пристроїв з мінімальним енергоспоживанням. Основними перевагами *Bluetooth* є швидке з'єднання, енергоефективність і здатність до синхронізації великої кількості пристроїв, що запобігає накладанню сигналів. Завдяки алгоритму частотної перестройки (*FHSS*), *Bluetooth* здатен працювати поруч із *Wi-Fi* без істотних завад, забезпечуючи стійкість до перешкод. Низький рівень потужності передавання також зменшує вплив багатопроменевості, тому ця технологія не потребує ретельного налаштування локального радіосередовища.

Bluetooth працює в діапазоні частот 2,4...2,4835 ГГц і забезпечує передачу даних на відстань від 10 до 100 м. Точна відстань залежить від наявних перешкод. Технологія використовує *GFSK*-модуляцію в поєднанні з *FHSS*.

Існує три класи пристроїв *Bluetooth*: клас 1 з потужністю 100 мВт (20 дБм) забезпечує радіус дії до 100 м; клас 2 з потужністю 2,5 мВт (4 дБм) працює на відстані до 10 м; клас 3 з потужністю 1 мВт (0 дБм) має радіус дії до 1 м. Хоча пристрої класу 1 мають більший радіус дії, оптимальною вважається зона до 10 м, що забезпечує мінімальне енергоспоживання та зручність інтеграції.

11

Завдяки *FHSS Bluetooth* сигнал змінює несучу частоту до 1600 разів на секунду між 79 (або 23) каналами. Перемикання частот відбувається синхронно між приймачем і передавачем, що гарантує відсутність завад між кількома активними з'єднаннями.

Для аудіо *Bluetooth* застосовує потокову передачу (64 кбіт/с), а для цифрових даних — повторну передачу в разі втрат. Максимальна швидкість досягає 723,2 кбіт/с.

Bluetooth 4.0, запроваджений у 2009 році, ввів режим *Bluetooth Low Energy (BLE)*, що призначений для роботи з пристроями малого розміру (датчики, трекери). *BLE* забезпечує низьке енергоспоживання та дозволяє зв'язок до 100 м, швидкість до 1 Мбіт/с та захист через *AES-128*.

WiMAX — технологія широкосмугового бездротового доступу

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) розроблено для надання високошвидкісного інтернет-доступу на великі відстані (до 50 км). *WiMAX*

здатен передавати дані, голос, відео та аудіо, поєднуючи різні типи мереж в єдину архітектуру. Структура мережі нагадує стільникову систему (*GSM*), але з більшим покриттям.

Початкові версії працювали в діапазоні 10–66 ГГц, що вимагало прямої видимості. Для міських умов згодом впроваджено діапазон 2–11 ГГц (*IEEE 802.16-2004*), з пропускною здатністю до 75 Мбіт/с.

Чотири основні режими роботи *WiMAX*:

1. Фіксований (10–66 ГГц) — прямий видимий зв'язок.
2. Номадичний — підтримує перенесення сеансу між базовими станціями.
3. Портативний — мобільність до 40 км/год, частоти 2–11 ГГц.
4. Мобільний (*802.16e*) — для пристроїв, що рухаються до 120 км/год, швидкість до 15 Мбіт/с.

Еволюція стандартів *WiMAX* демонструє постійне зростання продуктивності: початковий *WiMAX* забезпечував базову функціональність широкосмугового доступу, *WiMAX 2 (IEEE 802.16m)* підвищив швидкість до 1 Гбіт/с, а найновіший

12

WiMAX 3 (802.16n) досягає швидкості до 10 Гбіт/с для стаціонарних і до 1 Гбіт/с для мобільних пристроїв. Технології *MIMO*, багатопоточне кодування та адаптивне об'єднання каналів роблять *WiMAX 3* конкурентом *LTE* та основою для мультимедійних трансляцій.

Таким чином, *Bluetooth* і *WiMAX* представляють дві різні ніші бездротового зв'язку: перший — для близьких з'єднань з низьким енергоспоживанням, другий — для масштабного доступу з високою швидкістю передавання даних.

1.2 Стандарт *IEEE 802.11* та його місце в бездротових мережах Цей розділ докладно розглядає стандарти бездротового зв'язку *Wi-Fi*, їх розвиток, принципи роботи, питання безпеки та концепцію якості обслуговування (*QoS*) у бездротових мережах.

Стандарти *IEEE 802.11* та технологія *Wi-Fi*

IEEE 802.11 – це сукупність стандартів для бездротового зв'язку в локальних мережах, широко відомих під торговою маркою "*Wi-Fi*". Цей термін, розроблений *Wi-Fi Alliance*, охоплює різні стандарти для бездротових мережевих пристроїв.

Перша специфікація *Wi-Fi*, *IEEE 802.11-1997*, з'явилася в 1997 році. Однак справжню популярність технологія здобула лише у 2003 році, коли мобільна платформа *Intel Centrino*, що включала вбудований *Wi-Fi* адаптер, сприяла її масовому поширенню.

Кожен пристрій, що підключається до *Wi-Fi*, містить бездротову мережеву карту (*WNIC*), яка є інтерфейсом для бездротової мережі.

Режими роботи *Wi-Fi*:

- *Ad Hoc (IBSS - Independent Basic Service Set)*: Цей режим дозволяє пристроям, наприклад, двом ноутбукам або ноутбуку та настільному комп'ютеру, встановлювати пряме мережеве з'єднання між собою без центрального пристрою. Це зручно для швидкої організації зв'язку "для певної мети".

- Режим клієнт/сервер (інфраструктурний режим): Для підключення більшої кількості пристроїв до мережі та забезпечення їхнього рівного доступу до даних використовується точка доступу (*AP - Access Point*). Точка доступу

13

функціонує як маршрутизатор для бездротової мережі, аналогічно тому, як маршрутизатор працює в дротовій локальній мережі.

Сьогодні *IEEE 802.11* є не тільки найвідомішою, а й найбільш швидкозростаючою бездротовою технологією для комп'ютерів та мереж. Її широке використання та динамічний розвиток зробили її ідеальною основою для проектування сучасних бездротових мультисервісних мереж.

Технологія *Wi-Fi* повсюдно інтегрована в більшість стаціонарних та мобільних пристроїв. Вона працює у двох основних частотних діапазонах: - 2,4 ГГц (від 2,401 до 2,483 ГГц)

- 5 ГГц (від 5,15 до 5,825 ГГц)

Однією з ключових проблем технології 802.11 залишається мережева безпека, оскільки бездротові мережі потенційно вразливі до зовнішніх атак. Принцип роботи *Wi-Fi* з'єднання:

Типова *Wi-Fi* мережева карта може функціонувати як з точкою доступу, так і як клієнт. У режимі *Ad Hoc* клієнти можуть підключатися безпосередньо один до одного, без використання точки доступу.

Точка доступу регулярно передає свій мережевий ідентифікатор – *SSID* (*Service Set Identifier*) – за допомогою спеціальних сигнальних пакетів зі швидкістю 0,1 Мбіт/с кожні 100 мілісекунд. Це пояснює, чому 0,1 Мбіт/с є мінімальною швидкістю передачі даних для *Wi-Fi*. Клієнтський пристрій, отримавши *SSID*, визначає, чи може він підключитися до цієї точки доступу. Якщо в зоні дії клієнта є кілька точок доступу з однаковим *SSID*, пристрій обирає найкращу, орієнтуючись на силу сигналу. Стандарти *Wi-Fi* надають клієнтам повну гнучкість у виборі параметрів підключення.

Кількість пристроїв, які можуть одночасно підключитися до однієї точки доступу, залежить від її апаратних характеристик (продуктивності, можливостей бездротового зв'язку) та можливостей підключених пристроїв. Деякі виробники можуть програмно обмежувати цю кількість (наприклад, програмне забезпечення *MikroTik* обмежує до 2007 одночасних підключень). Зазвичай рекомендується підключати до однієї точки доступу не більше 40 пристроїв одночасно. Для

14

досягнення вищої швидкості передачі даних рекомендовано обмежити кількість підключень до 7 пристроїв.

Найпоширеніші стандарти *IEEE 802.11* включають:

- *IEEE 802.11b*
- *IEEE 802.11a*
- *IEEE 802.11g*
- *IEEE 802.11n*
- *IEEE 802.11ac*

1.3 Якість обслуговування (*QoS*) у бездротовій мережі

Якість обслуговування (*QoS - Quality of Service*) – це технологія, що дозволяє мережі надавати різні пріоритети обслуговування для різних типів мережевого трафіку. Вона забезпечує необхідні послуги для заданого трафіку в межах певних технічних умов.

Основні параметри, що визначають якість зв'язку:

1. Бітова швидкість: Описує номінальну пропускну здатність середовища

передачі інформації. Залежить від пропускної здатності каналу та співвідношення сигнал/шум. Вимірюється в бітах за секунду (біт/с) та похідних одиницях (Кбіт/с, Мбіт/с, Гбіт/с).

2. Затримка передачі пакетів даних (*Delay*): Час, необхідний для доставки пакетів, вимірюється в мілісекундах.

3. Джиттер: Коливання затримки під час передачі пакетів, що може впливати на якість потокових даних (наприклад, відео та голосового зв'язку). 4. Втрати пакетів: Кількість пакетів, які не дійшли до отримувача під час передачі мережею.

Управління трафіком для забезпечення *QoS*:

При виникненні "вузьких місць" під час передачі даних, традиційно використовується метод *FIFO* (*First In, First Out*) – "першим прийшов — першим вийшов". Однак при інтенсивному трафіку це може призвести до перевантажень та безповоротної втрати пакетів, які не помістилися в буфер черги.

15

Більш ефективним є використання "розумних" черг, де пакети отримують пріоритет на основі їхнього типу послуги (*ToS - Type of Service*). Для цього пакет даних повинен містити відповідний тег. Наприклад, логічно надавати високий пріоритет пакетам *VoIP* (голос через *IP*), які чутливі до затримок, і низький пріоритет трафіку *FTP* (передача файлів), *SMTP* (електронна пошта) або файлообмінних мереж, де затримки менш критичні.

Моделі *QoS*:

1. "*Best Effort*" (Доставка не гарантована): Мережа намагається доставити трафік з максимально можливою якістю, але без будь-яких гарантій щодо затримки, джиттера або втрат. Це "стандартний" тип обслуговування, якщо *QoS* не налаштований.

2. "*Per-Hop Behavior*" (Безпроблемне обслуговування): Ця модель не забезпечує точного налаштування, а лише дозволяє маркувати трафік без призначення окремих класів або регулювання.

3. "*IntServ*" (*Integrated Services*): Згідно з *RFC 1633*, *IntServ* забезпечує наскрізну якість обслуговування шляхом гарантування необхідної пропускної

здатності. Для цього використовується протокол *RSVP (Resource Reservation Protocol)*, який резервує ресурси на всіх проміжних вузлах маршруту. Цей термін часто асоціюється з "резервуванням ресурсів".

4. "*DiffServ (Differentiated Services)*": Описана в *RFC 2474* та *RFC 2475*, ця модель забезпечує *QoS* шляхом розподілу ресурсів у ядрі мережі та застосування класифікаторів і обмежень на її межі. *DiffServ* розділяє трафік на різні класи, кожен з яких має свій рівень *QoS*. Вона включає управління формуванням трафіку (класифікація, маркування, управління інтенсивністю) та управління політиками (розподіл ресурсів, відкидання пакетів). *DiffServ* є яскравим прикладом "інтелектуальної" пріоритизації трафіку.

Особливості роботи з різними типами трафіку:

Більшість програм використовують або *TCP (Transmission Control Protocol)*, або *UDP (User Datagram Protocol)*. На відміну від *UDP*, *TCP* забезпечує виправлення помилок, повторно надсилаючи втрачені пакети. Це робить *TCP*

16

незамінним для програм, які не допускають втрати даних, таких як електронна пошта та веб-сторінки.

Хоча трафік даних менш чутливий до втрат і затримок, ніж голосовий або відеотрафік, мережеві адміністратори повинні враховувати якість взаємодії з користувачами (*QoE - Quality of Experience*). Особливо це стосується ресурсомістких *TCP*-додатків, таких як завантаження великих файлів (фільмів, ігор) через *FTP*, які можуть споживати значну частину пропускну здатності.

При оцінці трафіку даних адміністратори повинні враховувати два основні фактори: чи надходять дані з інтерактивного застосунку і чи є дані критично важливими.

Для інтерактивних критично важливих застосунків необхідна пріоритизація для мінімальної затримки та часу відгуку 1-2 секунди. Інтерактивні застосунки з некритичними даними можуть мати пріоритет з невеликою затримкою.

Неінтерактивні критично важливі програми потребують мінімально необхідної пропускну здатності, хоча затримка може значно відрізнятись. Неінтерактивні некритичні застосунки використовують решту пропускну здатності після

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ БЕЗДРотовИХ СТАНДАРТИВ *IEEE 802.11*

2.1 Історія розвитку та ключові характеристики стандартів *IEEE 802.11*

Розробка бездротових технологій зв'язку розпочалася активно наприкінці 20-го століття, що призвело до створення низки надійних стандартів. За останні два десятиліття більшість з них забезпечили адекватний рівень захисту даних для широкого спектру застосувань. Важливим поштовхом для розвитку бездротового зв'язку стало виділення у 1980-х роках нових неліцензійних частотних діапазонів, зокрема 2.4 ГГц та 5 ГГц. Це зробило стандартизовані радіотехнічні рішення економічно вигідними та безпечними для масового впровадження. У сучасному світі головною дилемою є вибір найбільш підходящого стандарту серед численних доступних бездротових технологій.

Кожен вузол бездротової мережі для передачі даних повинен мати вбудований радіочастотний приймач-передавач, і ці трансивери обов'язково мають працювати за однією і тією ж бездротовою технологією. Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (*IEEE*) є найавторитетнішою організацією, що встановлює стандарти у радіоелектроніці, електронних технологіях, і особливо у сфері бездротової передачі даних. Стандарти *IEEE*, зокрема серія 802.11, охоплюють канальний та фізичний рівні базової еталонної моделі взаємодії відкритих систем (*OSI*).

Найбільш відомим та поширеним неліцензійним бездротовим стандартом у діапазонах *ISM* (2.4 ГГц та 5 ГГц) є *IEEE 802.11*, широко відомий під торговою маркою *Wi-Fi* (скорочення від *Wireless Fidelity*). Цей стандарт став де-факто промисловим рішенням для організації бездротових локальних мереж (*WLAN*) для споживчих та корпоративних пристроїв, що функціонують на стеку протоколів *TCP/IP*. Основна місія комітету, що розробляв цей стандарт, полягала у створенні найкращої можливої заміни дротовим мережам на основі *TCP/IP*, з особливим акцентом на безпеці та швидкості передачі даних. Це призвело до того, що останні

версії стандарту 802.11 мають найвищу пропускну здатність серед бездротових стандартів ближнього радіусу дії.

WLAN використовує протокол множинного доступу з визначенням несучої та запобіганням колізіям (*CSMA/CA*). Перед передачею даних мережева карта перевіряє радіоканал на вільність. Якщо іншій пристрій передає дані, мережева карта повинна чекати, поки канал звільниться. Істотним недоліком цього стандарту є його високе енергоспоживання та значна потреба в обчислювальних ресурсах для ефективного обслуговування стеку протоколів *Wi-Fi*. Тим не менш, сьогодні 802.11 є найвідомішою бездротовою технологією для комп'ютерів та доступу до Інтернету.

IEEE 802.11b був затверджений у 1999 році, цей стандарт працює у діапазоні 2.4 ГГц і базується на методі широкосмугової модуляції з розширеним спектром прямої послідовності (*DSSS*). Робочий діапазон розділений на 14 каналів (з інтервалом у 25 МГц для уникнення взаємних перешкод), три з яких можуть використовуватися одночасно. Дані передаються по одному каналу без перемикання. Теоретична максимальна швидкість передачі даних становить 11 Мбіт/с, що порівнянно з дротовими мережами *10-BaseT Ethernet*. Проте, така швидкість досяжна лише за ідеальних умов та при передачі даних одним пристроєм. Якщо в одному середовищі працює багато клієнтських пристроїв, вони ділять ту саму пропускну здатність, що призводить до зниження швидкості для кожного користувача.

IEEE 802.11a також був затверджений у 1999 році, але введений в експлуатацію лише у 2001 році. Цей стандарт поширений у Сполучених Штатах та Японії, але в Україні та Європі його розповсюдження не є широким. *802.11a* використовує ортогональне частотне мультиплексування (*OFDM*), де основний потік даних розділяється на кілька паралельних підпотоків з відносно нижчими швидкостями, які потім модулюються відповідною кількістю несучих. Стандарт визначає три обов'язкові швидкості (6, 12, 24 Мбіт/с) та п'ять додаткових (9, 18, 24, 48, 54 Мбіт/с). Також передбачена можливість одночасного використання двох каналів, що подвоює пропускну здатність.

IEEE 802.11g був остаточно затверджений у червні 2003 року. Цей стандарт є

подальшим удосконаленням 802.11b, забезпечуючи передачу даних у тому ж частотному діапазоні 2.4 ГГц. Головна перевага 802.11g — значно збільшена пропускна здатність до 54 Мбіт/с (порівняно з 11 Мбіт/с у 802.11b). Незважаючи на роботу в діапазоні 2.4 ГГц, він використовує ту ж схему модуляції сигналу, що й 802.11a — *OFDM* — для досягнення вищої швидкості. Важливою особливістю 802.11g є його сумісність з 802.11b. Це означає, що адаптер 802.11b може працювати в мережі 802.11g (хоча зі швидкістю не вище 11 Мбіт/с), а адаптер 802.11g знизить швидкість передачі даних до 11 Мбіт/с для роботи у старшій мережі 802.11b.

IEEE 802.11n був ратифікований 11 вересня 2009 року, цей стандарт при використанні в режимі 802.11n з іншими пристроями 802.11n забезпечує швидкість передачі даних майже в чотири рази вищу, ніж пристрої 802.11g (до 54 Мбіт/с). Теоретична максимальна швидкість передачі даних досягає 600 Мбіт/с при одночасній передачі з використанням чотирьох антен, а з однією антеною — до 150 Мбіт/с. Пристрої 802.11n можуть працювати в одному з двох частотних діапазонів – 2.4 ГГц або 5 ГГц, що значно підвищує гнучкість їх використання та дозволяє ізолювати їх від джерел радіочастотних перешкод.

Пристрої 802.11n можуть працювати у трьох режимах. *Legacy* режим підтримує пристрої 802.11b/g та 802.11a. Змішаний (*Mixed*) режим підтримує одночасне використання пристроїв 802.11b/g, 802.11a та 802.11n. "Чистий" режим 802.11n є режимом, у якому пристрої отримують переваги швидшої та потужнішої передачі даних. Специфікація 802.11n передбачає використання стандартних каналів частотою 20 МГц та широкосмугових каналів 40 МГц для збільшення пропускної здатності.

Стандарт базується на технології *OFDM-MIMO*. *MIMO* (*Multiple-Input, Multiple-Output*) передбачає використання просторового мультиплексування для одночасної передачі кількох потоків інформації по одному каналу, а також багатопроменеве відображення, що гарантує доставку кожного біта інформації до відповідного приймача з низькою ймовірністю перешкод та втрати даних. Саме

здатність одночасно надсилати та отримувати дані визначає високу пропускну здатність пристроїв 802.11n. Хоча більшість функціоналу базується на 802.11a,

стандарт 802.11n може використовувати діапазон 5 ГГц (як 802.11a) та 2.4 ГГц (як 802.11b/g). Для України пристрої 802.11n переважно підтримують діапазон 2.4 ГГц. Збільшення швидкості передачі у 802.11n досягається шляхом подвоєння ширини каналу з 20 МГц до 40 МГц та впровадження технології *MIMO*.

IEEE 802.11ac є подальшим розвитком технології, запровадженої у стандарті 802.11n. Пристрої, що працюють за 802.11ac, класифікуються як *VHT (Very High Throughput)* – дуже висока пропускна здатність). Мережі 802.11ac працюють тільки у діапазоні 5 ГГц. Ширина каналу може становити 20, 40, 80 та 160 МГц, також можливе об'єднання двох радіоканалів по 80 МГц (80+80 МГц). Оскільки більшість сучасних бездротових мереж працюють у діапазоні 2.4 ГГц, діапазон 5 ГГц є менш зашумленим та менш схильним до різних перешкод. Використання 5 ГГц забезпечує більш вільне радіосередовище, тим самим збільшуючи швидкість передачі даних та забезпечуючи стабільніше з'єднання.

Стандарт 802.11ac збільшує ширину бездротового каналу до 80 МГц (з можливістю розширення до 160 МГц), тоді як у 802.11n вона становить 40 МГц. Також 802.11ac може використовувати до 8 просторових потоків (*Spatial Streams – SS*) та застосовує 256-бітну квадратурну амплітудну модуляцію (*256-QAM*), яка фактично стискає 256 різних сигналів однієї частоти, зсуваючи та чергуючи їх у різні фази. Рівень модуляції *256-QAM* дозволяє передавати 8 біт інформації в одному стані несучої, що теоретично робить 802.11ac у чотири рази більш спектрально ефективним, ніж 802.11n. Спектральна ефективність вимірює, наскільки добре бездротовий протокол використовує доступну пропускну здатність.

Стандарт 802.11ac також забезпечує стандартизоване формування променя (*beamforming*). Це дозволяє направляти радіосигнали на конкретний пристрій, що не тільки збільшує загальну пропускну здатність, але й зменшує споживання енергії, подовжуючи термін служби акумулятора пристрою. Теоретично, максимальна швидкість у стандарті 802.11ac досягається завдяки 8 каналам із

21

загальною пропускну здатністю 160 МГц, використовуючи модуляцію *256-QAM*, при цьому кожен канал здатний забезпечити 866.7 Мбіт/с, що дає загальну швидкість 6933 Мбіт/с.

Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) був представлений у жовтні 2018 року, коли *Wi-Fi Alliance* змінив правила іменування з технічного 802.11ax на простішу назву *Wi-Fi 6*. Головні інновації 802.11ax порівняно з 802.11ac включають підтримку частотних діапазонів 2.4 та 5 ГГц, що дозволяє збільшити кількість сценаріїв з кількома пристроями. Проте, через велику кількість старих пристроїв, що підтримують лише 2.4 ГГц, новіші пристрої часто працюють у режимі сумісності.

Технологія *OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)* є багатокористувацькою версією *OFDM*. Вона дозволяє розділяти сигнал на піднесучі частоти та призначати групи з них для обробки окремих потоків даних. Це забезпечує одночасну трансляцію даних кільком клієнтам *Wi-Fi 6* із середньою швидкістю. Важливо, що всі клієнти повинні підтримувати *Wi-Fi 6*.

Покращене *MU-MIMO* означає, що у 802.11ac технологія *MU-MIMO* дозволяла передавати дані чотирьом клієнтам, використовуючи різні піднесучі. У 802.11ax кількість можливих одночасних підключень пристроїв подвоюється до восьми. *Wi-Fi Alliance* заявляє, що системи *MU-MIMO* у поєднанні з *OFDMA* допоможуть організувати передачу даних для кількох користувачів зі швидкістю низхідного каналу до 11 Гбіт/с. Цей результат був продемонстрований на виставці *CES 2018* року. Проте варто зазначити, що поширені електронні пристрої (ноутбуки, смартфони) не зможуть досягти таких швидкостей. Наприклад, на *CES 2018* використовувався тридіапазонний маршрутизатор *D-Link DIR-X9000* з заявленою швидкістю 11 Гбіт/с – це сума максимальних швидкостей передачі даних по трьох каналах. Більшість пристроїв використовують лише один канал, тому дані передаватимуться зі швидкістю до 4804 Мбіт/с.

Функція цільового часу пробудження (*Target Wake Time – TWT*) дозволяє пристрою переходити в режим сну та "прокидатися" за розкладом. *TWT* визначає час, коли пристрій неактивний, і час, коли він активний. Якщо пристрій не передає дані у певний час (наприклад, вночі), його *Wi-Fi*-з'єднання "переходить у режим

22

сну", що заощаджує заряд акумулятора та зменшує перевантаження мережі. Цільовий час пробудження встановлюється для кожного пристрою індивідуально, враховуючи його активність. За словами розробників, *Wi-Fi 6* сприятиме розгортанню мереж *Wi-Fi* високої щільності. Окремі рішення, такі як *MU-MIMO* та

OFDMA, покращать якість зв'язку в громадському транспорті, корпоративному середовищі, торгових центрах, готелях або на стадіонах.

Безпека бездротової мережі є критично важливим компонентом у технології *Wi-Fi* і визначається налаштуваннями точки доступу. Точки доступу можуть працювати у відкритому або захищеному режимі. У "Відкритому режимі" будь який пристрій може підключитися до мережі без пароля, що є небезпечним і не рекомендується. При використанні захищеного доступу до мережі до неї можуть підключитися лише пристрої, які надають правильний пароль.

WEP (Wired Equivalent Privacy) є першим стандартом захисту бездротового трафіку, заснованим на алгоритмі шифрування потоку *RC4*. Наразі він не забезпечує надійного захисту, оскільки легко зламується і фактично не використовується.

WPA (Wi-Fi Protected Access) представляє оновлений процес автентифікації бездротових пристроїв. На момент свого випуску стандарт забезпечував надійний захист, але зараз виявлено низку вразливостей, що надають можливості для доступу до мереж *Wi-Fi*, що використовують цей стандарт.

WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2) є оновленою версією програми автентифікації бездротових пристроїв, що є найпоширенішим стандартом безпеки бездротових мереж на сьогодні. Він забезпечує відносно надійний захист даних, але існують відомі способи зламу, такі як перебір пароля та через службу *WPS (Wi-Fi Protected Setup)*.

WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3) є новішим стандартом мережевої безпеки, який усуває недоліки попередніх версій. Проте *WPA3* все ще перебуває на стадії розробки та тестування і ще не використовується у великих масштабах.

23

Наразі найкращий спосіб забезпечити безпеку мережі — використовувати *WPA2* із складними, випадково згенерованими паролями, які слід регулярно змінювати, щоб уникнути хакерських атак із використанням методів підбору.

2.2 **Позиціонування стандарту *IEEE 802.11* у моделях *OSI* та *TCP/IP***

Модель *OSI* є фундаментальною основою для всіх мережевих сутностей,

визначаючи мережеві протоколи та розділяючи їх на сім логічних рівнів. Кожен рівень взаємодіє з відповідним протоколом, забезпечуючи порівняльний контроль передачі даних. Нижчі рівні відповідають за фізичні параметри передачі (наприклад, електричні сигнали, їх декодування та маршрутизацію), тоді як вищі рівні опікуються представленням даних та запитами користувача. Як і всі стандарти *IEEE 802*, *802.11* функціонує на двох нижніх рівнях моделі *OSI*: фізичному рівні та рівні каналу передачі даних. Це означає, що будь-яка мережева програма, мережева операційна система чи протокол працюватимуть однаково добре як у мережі *802.11*, так і в мережі *Ethernet*. Основні відмінності між бездротовими та дротовими мережами на рівні *802.11* проявляються саме на фізичному (*Phy*) та рівні часткового з'єднання (*MAC*) моделі *OSI*. Фізичний рівень (*Phy*) *IEEE 802.11* представляє радіоканал і описує параметри фізичного середовища передачі даних. Стандарт *IEEE 802.11* визначає, що сигнал, який несе інформацію, має передаватися одним із двох основних методів. Перший метод - це розширення спектру прямої послідовності (*DSSS*), який підвищує продуктивність бездротових локальних мереж шляхом розширення частотного спектру переданого сигналу. Це досягається за рахунок збільшення частоти модуляційного тактового сигналу та одночасного присвоєння відносно довгої псевдовипадкової послідовності кожному символу переданого повідомлення. Другий метод - це частотна стрибкоподібна перебудова (*FHSS*), яка представляє собою технологію передачі сигналу зі швидким псевдовипадковим регулюванням робочої частоти. Цей метод полягає у періодичній зміні несучої частоти стрибкоподібним чином відповідно до *certain* алгоритму, відомого

24

приймачу та передавачу. Стандарт *IEEE 802.11* надає 79 можливих алгоритмів для регулювання робочої частоти з тривалістю з'єднання 20 мс.

Канальний рівень (*Data Link Layer*) *IEEE 802.11* контролює доступ до середовища передачі та забезпечує пересилання кадрів між будь-якими двома пристроями в бездротовій мережі. Канальний рівень поділяється на два підрівні: керування доступом до середовища (*MAC*) та керування логічним каналом зв'язку (*LLC*). Підрівень *LLC* у стандарті *802.11* використовує той самий *LLC* та 48-бітну адресацію, що й інші мережі *802*, що дозволяє безперешкодну інтеграцію

бездротових та дротових мереж.

Підрівень *MAC* має суттєві відмінності порівняно з дротовими мережами. Хоча рівень *MAC* у 802.11 схожий на реалізований у 802.3 *Ethernet* (підтримка кількох користувачів у спільному середовищі, необхідність автентифікації), є ключові відмінності. Для *Ethernet* 802.3 використовується протокол множинного доступу з визначенням несучої та виявленням колізій (*CSMA/CD*), який вимагає від станції можливості одночасно надсилати та отримувати дані для виявлення колізій. Оскільки стандарт 802.11 використовує напівдуплексні приймачі, станції бездротової мережі 802.11 не можуть виявляти колізії під час передачі даних. Через цю особливість *Wi-Fi* використовує модифікований протокол *CSMA/CA* (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) або Розподілена координаційна функція (*DCF*).

CSMA/CA намагається уникнути колізій за допомогою явного підтвердження пакетів (*ACK*). Це означає, що приймаюча станція надсилає пакет підтвердження, щоб підтвердити, що пакет не був пошкоджений під час передачі. Принцип роботи *CSMA/CA* полягає в тому, що станції, які бажають передавати, перевіряють канал. Якщо активності не виявляється, станція чекає випадковий проміжок часу, перш ніж передавати, за умови, що середовище залишається неактивним. Якщо пакет прибуває цілим, станція-одержувач надсилає *ACK*, який станція-відправник отримує для завершення процесу передачі. Якщо відправник не отримує *ACK* (через втрату пакета або пошкодження *ACK*), він робить висновок про колізію і повторно надсилає пакет після випадкового часу очікування.

25

Для визначення вільності каналу використовується алгоритм очищення каналу (*CCA – Channel Clearing Algorithm*). *CCA* зосереджений на вимірюванні енергії сигналу на антені та визначенні потужності прийнятого сигналу (*RSSI – Received Signal Strength Indicator*). Якщо рівень прийнятого сигналу нижчий за певний поріг, канал оголошується неактивним, і *MAC*-рівень отримує статус *Clear to Send* (*CTS*). Якщо потужність перевищує поріг, передача даних затримується відповідно до правил протоколу. Стандарт також має інший спосіб визначення зайнятості каналу – метод виявлення несучих хвиль, який є більш вибіркоvim, оскільки перевіряє ті ж типи несучих, що зазначені у стандарті 802.11. Найкращий

метод залежить від рівня перешкод у робочій зоні.

Таким чином, протокол *CSMA/CA* забезпечує метод розподілу доступу до бездротового середовища. Використання чіткого механізму підтвердження ефективно вирішує проблему уникнення перешкод. Однак протокол додає деякі накладні витрати, яких немає у технології *Ethernet*, тому продуктивність мережі *Wi-Fi* завжди буде дещо повільнішою, ніж еквівалентної дротової локальної мережі. Проблема "прихованої точки" є ще однією специфічною проблемою на *MAC* рівні, коли дві станції можуть "чути" точку доступу, але не можуть "чути" одна одну через відстань або перешкоди. Для її вирішення до *Wi-Fi* на *MAC*-рівні було додано протокол *RTS/CTS* (*Request to Send/Clear to Send*). При його використанні передавальна станція надсилає *RTS* і очікує відповіді точки доступу повідомленням *CTS*. Оскільки всі станції в мережі зазвичай можуть "чути" точку доступу, сигнал *CTS* змушує їх затримувати передачу, дозволяючи поточній станції передавати дані та отримувати пакети *ACK* без конфліктів. Оскільки повідомлення *RTS/CTS* додають додаткові накладні витрати на мережу, тимчасово резервуючи середовище, вони зазвичай використовуються лише для великих пакетів, повторна передача яких є дуже дорогою.

MAC-рівень 802.11 забезпечує можливість обчислення циклічних надлишкових перевірок (*CRC*) та фрагментації пакетів. Кожен пакет містить власну контрольну суму *CRC*, яка обчислюється та додається до пакета. Це відрізняється від *Ethernet*, де обробка помилок здійснюється протоколами вищого рівня, такими

26

як *TCP*. Сегментація пакетів дозволяє розбивати великі пакети на менші під час передачі по радіоканалу, що корисно у дуже "шумних" середовищах або за наявності сильних перешкод, оскільки менші пакети менш схильні до пошкодження. Такий підхід у більшості випадків зменшує потребу в повторних передачах, тим самим покращуючи продуктивність усіх бездротових мереж. *MAC* рівень відповідає за складання отриманих фрагментів, роблячи процес "прозорим" для протоколів вищого рівня.

Управління підключеннями та роумінг є важливою функцією *MAC*-рівня стандарту 802.11, яка відповідає за те, як клієнти підключаються до точок доступу. Коли *Wi-Fi* клієнт потрапляє в зону дії однієї або кількох точок доступу, він обирає

одну з них на основі сили сигналу та кількості помилок і підключається. Щойно клієнт отримує підтвердження про прийняття сигналу точкою доступу, він налаштовується на радіоканал, на якому працює. З часом він сканує всі канали, щоб перевірити, чи є інша точка доступу з вищою якістю. Якщо така точка доступу існує, пристрій підключається до неї та налаштовується на її частоту. Передача зв'язку найчастіше відбувається, якщо пристрій фізично переміщується від точки доступу, що призводить до послаблення сигналу. В інших випадках повторне підключення відбувається через зміни в бездротовому середовищі або просто через інтенсивний мережевий трафік, що проходить через основну точку доступу. У цьому випадку ця функція називається "балансування навантаження", оскільки її головне призначення — максимально ефективно розподілити загальне навантаження на бездротову мережу по всій доступній інфраструктурі. Цей динамічний процес підключення та комутації дозволяє мережевим адміністраторам створювати бездротові мережі, що охоплюють дуже великі площі, створюючи частково перекриваючі "стільники". В ідеалі суміжні точки доступу, що перекриваються, повинні використовувати різні канали *DSSS*, щоб не заважати роботі одна одній.

Координація точок (*PCF*) дозволяє технології *Wi-Fi* підтримувати потокову передачу даних, таких як медіа або аудіо, на рівні *MAC*. Порівняно з функцією розподіленої координації *DCF*, де керування розподілене між усіма сайтами, у

27

режимі *PCF* лише одна точка доступу контролює доступ до носія. Якщо базова зона обслуговування налаштована на *BSS* (базовий набір послуг) з підтримкою *PCF*, час рівномірно розподіляється між режимами *PCF* та *CSMA/CA*. Коли система перебуває в режимі *PCF*, точка доступу опитує всі вебсайти на наявність даних. Кожному пристрою призначається фіксований період часу, після якого опитується наступний пристрій. У цей час жоден пристрій, окрім того, що опитується, не може передавати дані. Оскільки *PCF* дозволяє кожній станції передавати у певний час, може бути гарантована максимальна затримка. Недоліком цього підходу є те, що точка доступу повинна опитувати всі пристрої, що є занадто неефективним у великих мережах.

Енергозбереження є ще однією важливою функцією *MAC*-рівня технології

Wi-Fi, яка підтримує спеціальний режим для подовження терміну служби акумулятора мобільних пристроїв. Стандарт підтримує два режими енергоспоживання: "режим тривалої роботи" та "режим енергозбереження". У першому випадку трансивер завжди увімкнений, тоді як у другому випадку трансивер вмикається через регулярні проміжки часу для прийому сигналу "маяка", який точка доступу безперервно надсилає. Ці сигнали містять інформацію про те, який пристрій має отримувати дані. Це дозволяє користувачеві приймати сигнал маяка, приймати дані, а потім повертатися до "режиму збереження".

2.3 Порівняльний аналіз стандартів *IEEE 802.11*

Наразі найпоширенішими та найбільш ефективними стандартами для масового використання є *802.11n* та *802.11ac*. Старіші стандарти, такі як *802.11a/b/g*, вже вважаються технологічно застарілими та використовуються лише за певних обставин (наприклад, для сумісності зі старим обладнанням). Водночас, новітній стандарт *802.11ax (Wi-Fi 6)* ще не вийшов на масовий ринок, і не всі кінцеві пристрої здатні повноцінно використовувати його переваги.

Стандарт *802.11b* був затверджений у 1999 році та працює в частотному діапазоні 2.4 ГГц з максимальною теоретичною швидкістю 11 Мбіт/с. Він використовує технологію *DSSS* та працює у безліцензійному діапазоні 2.4 ГГц.

28

Стандарт дозволяє одночасно використовувати три канали, але має низьку швидкість при завантаженні мережі.

Стандарт *802.11a* також був затверджений у 1999 році, але працює в частотному діапазоні 5 ГГц з максимальною теоретичною швидкістю 54 Мбіт/с. Він використовує технологію *OFDM* та не отримав широкого поширення в Україні та Європі. Стандарт підтримує обов'язкові швидкості 6, 12, 24 Мбіт/с та додаткові швидкості 9, 18, 36, 48, 54 Мбіт/с.

Стандарт *802.11g* був затверджений у 2003 році як покращення *802.11b*. Він працює в діапазоні 2.4 ГГц з максимальною теоретичною швидкістю 54 Мбіт/с, використовуючи технологію *OFDM* та зберігаючи сумісність з *802.11b*.

Стандарт *802.11n* був затверджений у 2009 році та може працювати в діапазонах 2.4 або 5 ГГц з максимальною теоретичною швидкістю 600 Мбіт/с з

чотирма антенами або 150 Мбіт/с з однією антеною. Він використовує технологію *OFDM-MIMO* та підтримує канали 40 МГц. Стандарт має режими роботи *Legacy*, *Mixed* та *Pure* і забезпечує значне збільшення швидкості завдяки *MIMO*. Для України частіше використовується діапазон 2.4 ГГц.

Стандарт 802.11ac був затверджений у 2013 році та працює тільки в діапазоні 5 ГГц з максимальною теоретичною швидкістю 6933 Мбіт/с з 8 просторовими потоками та каналом 160 МГц. Він використовує технологію *VHT (Very High Throughput)* та підтримує канали до 160 МГц, до 8 просторових потоків, модуляцію *256-QAM* та стандартизоване формування променя (*beamforming*). Перевагою є менш зашумлений діапазон.

Стандарт 802.11ax (*Wi-Fi 6*) був затверджений у 2019 році та працює в діапазонах 2.4 та 5 ГГц з максимальною агрегованою швидкістю до 11000 Мбіт/с. Він використовує технологію *OFDMA* (багатокористувацький *OFDM*), покращений *MU-MIMO* до 8 клієнтів одночасно та *Target Wake Time (TWT)* для енергозбереження. Стандарт призначений для мереж високої щільності та підтримує обидва діапазони 2.4 та 5 ГГц, але ще не є широко поширеним.

29

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА МОДЕЛІ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ

3.1 План тестування та розгортання бездротової мережі

Основна мета цього експерименту полягає у створенні бездротової мережі, здатної ефективно передавати інтернет-трафік із заданими показниками якості. Дослідження базуватимуться на конфігурації радіорелейних станцій типу "точка точка" (*point-to-point*) та "точка-багатоточка" (*point-to-multipoint*). Всі елементи зв'язку на кінцевих вузлах мережі будуть використовувати стандартні пристрої та протоколи *IEEE 802.11*.

Для всебічної оцінки таких критично важливих параметрів, як дальність зв'язку у режимі "точка-точка" та зона покриття у режимі "точка-багатоточка", буде проведено кілька окремих етапів тестування. Тестування дальності зв'язку відбуватиметься у дві фази: спочатку з використанням пристроїв, що підтримують стандарт 802.11n, а потім – з пристроями, сумісними зі стандартом 802.11ac.

Результати цих тестів будуть порівнюватися за визначеними критеріями. Також буде проведено тестування зони покриття мережі з використанням обладнання 802.11n.

При проектуванні бездротової мережі необхідно враховувати низку ключових характеристик. Радіус зони покриття є одним з найважливіших аспектів бездротової передачі даних. Хоча бездротові технології ефективні на відкритих просторах, фізичні перешкоди, такі як дерева, гори або будівлі між бездротовими вузлами, можуть істотно послабити сигнал, зменшуючи зону покриття та обмежуючи дальність дії мережі.

Вплив перешкод також є критично важливим фактором. Якість бездротового з'єднання значною мірою залежить від різних джерел перешкод. Це особливо актуально в зоні покриття мережі, де працюють інші бездротові пристрої, які можуть створювати радіочастотний шум і знижувати якість зв'язку.

Безпека мережі становить критично важливий аспект у бездротових мережах. Можливість доступу до бездротового середовища без прямого підключення до

30

дротової інфраструктури створює ризики для несанкціонованого доступу до спільних ресурсів. Тому забезпечення високого рівня безпеки є пріоритетом при проектуванні та управлінні бездротовою мережею.

Спільне середовище також впливає на роботу мережі. Бездротова мережа функціонує в напівдуплексному режимі, тобто пристрій може або надсилати, або отримувати повідомлення в певний момент часу, але не одночасно. Всі вузли спільно використовують бездротове з'єднання. Це означає, що зі збільшенням кількості вузлів, одночасно підключених до однієї бездротової мережі, пропускна здатність, доступна кожному вузлу, зменшується.

3.2 Обґрунтування складу використовуваного обладнання

Для дослідження бездротової мережі було обрано наступний перелік пристроїв, який обґрунтований їхніми технічними характеристиками, що забезпечують необхідну функціональність та продуктивність для запланованих експериментів. До складу обладнання входять маршрутизатори *MikroTik RB750r2*

та *MikroTik RB2011iL-IN*, а також точки доступу, зокрема дві точки доступу *MikroTik SXT Lite5*, дві точки доступу *MikroTik Groove A52HPn* та дві точки доступу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*.

Маршрутизатор *MikroTik RB2011iL-IN* має габарити 228x97x25 мм та оснащений процесором *Atheros AR9344* з тактовою частотою 600 МГц. Пристрій має 64 МБ оперативної пам'яті *DDR SDRAM* та оснащений п'ятьма роз'ємами 10/100/1000 Мбіт/с *Ethernet RJ45 Auto MDI/X* і п'ятьма роз'ємами 10/100 Мбіт/с *Ethernet RJ45 Auto MDI/X*. Вихід *PoE* доступний на порту №10 з силою струму 500 мА. Максимальне споживання енергії становить до 6 Вт, а робоча температура варіюється від -35°C до +65°C.

MikroTik RB2011iL-IN є професійним маршрутизатором, що вирізняється своєю гнучкістю живлення: він може подавати живлення на один пристрій через *PoE (Power over Ethernet)*, а також сам живитись через *PoE* або від постійного джерела живлення. Його ключовою перевагою є наявність як п'яти мережевих

31

портів 100 Мбіт/с, так і п'яти портів 1000 Мбіт/с, що забезпечує високу пропускну здатність для дротового сегменту мережі.

Маршрутизатор *MikroTik RB750r2* має компактні габарити 113x89x28 мм та оснащений процесором *QCA9531-BL3A-R* з тактовою частотою 850 МГц. Пристрій має 64 МБ оперативної пам'яті та п'ять роз'ємів 10/100 Мбіт/с *Ethernet RJ 45*. Вхід *PoE* підтримує пасивне *PoE* (6-30 В), максимальне споживання енергії становить до 2 Вт, а робоча температура варіюється від -40°C до 70°C.

MikroTik RB750r2 є компактним маршрутизатором, який не має вбудованого *Wi-Fi*, але оснащений п'ятьма мережевими портами 100 Мбіт/с. У його основі лежить досить потужний одноядерний процесор з тактовою частотою 850 МГц та 64 МБ оперативної пам'яті, що забезпечує стабільну роботу та обробку мережевого трафіку.

Точка доступу *MikroTik Groove A-52HPn* має габарити 177 × 44 × 44 мм та оснащена процесором *Atheros AR9342* з тактовою частотою 600 МГц. Пристрій має 64 МБ оперативної пам'яті *DDR2* та один порт *Ethernet 10/100 Base-TX* (кат. 5, *RJ 45*), а також один чоловічий роз'єм *N*-типу. Вхід *PoE* підтримує пасивне *PoE* (9-30 В), пристрій працює зі стандартами 802.11a/b/g/n у режимах точки доступу,

клієнта або точка-точка. Пропускна здатність становить 150 Мбіт/с, частота роботи 2.4 або 5 ГГц (програмний вибір), а робоча температура варіюється від -40°C до 70°C.

MikroTik Groove A-52HPn є універсальною точкою доступу, призначеною для зовнішнього розміщення. Вона є дводіпазонним нанорадіомодулем, який може працювати або на частоті 2.4 ГГц, або на 5 ГГц (але не одночасно). Вихідна потужність її *Wi-Fi* передавача становить 27 дБм (500 мВт). Пристрій підтримує бездротові стандарти 802.11a/b/g/n з максимальною швидкістю каналу до 150 Мбіт/с. Точка доступу оснащена дводіпазонною всеспрямованою антеною, процесором *Atheros AR9342* (600 МГц), 64 МБ оперативної пам'яті та одним 100 Мбіт/с *Ethernet* портом з підтримкою *PoE*.

Точка доступу *MikroTik SXT Lite5* має габарити 140x140x56 мм та оснащена процесором *Atheros AR9344* з тактовою частотою 600 МГц. Пристрій має 64 МБ оперативної пам'яті та один порт *Ethernet 10/100 Base-TX* (кат. 5, RJ-45). Вхід *PoE*

32

підтримує пасивне *PoE* (8-32 В), пристрій працює зі стандартами 802.11a/n у режимах клієнта або точка-точка. Пропускна здатність становить 300 Мбіт/с, частота роботи 5 ГГц, а робоча температура варіюється від -40°C до 70°C.

MikroTik SXT Lite5 є бездротовою точкою доступу, що працює виключно на частоті 5 ГГц і підтримує стандарти 802.11 a/n. Пристрій оснащений швидким процесором *Atheros AR9344* з тактовою частотою 600 МГц та 64 МБ оперативної пам'яті. Вихідна потужність *Wi-Fi* передавача становить 27 дБм (500 мВт). Живлення пристроїв здійснюється віддалено через технологію *PoE*. Вологозахисний корпус дозволяє встановлювати цю точку доступу на вулиці.

Точка доступу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19* має габарити 189x189x125 мм та оснащена процесором *Atheros MIPS 74Kc* з тактовою частотою 720 МГц. Пристрій має 128 МБ оперативної пам'яті *DDR2* та один роз'єм 10/100/1000 *Ethernet* (RJ-45). Вхід *PoE* підтримує пасивне *PoE* (8-32 В), пристрій працює зі стандартом 802.11ac

у режимах клієнта або точка-точка. Пропускна здатність становить 450 Мбіт/с, частота роботи 5150-5875 МГц, а робоча температура варіюється від -40°C до 70°C. *Ubiquiti NanoBeam 5AC-19* є бездротовою точкою доступу, призначеною для зовнішнього використання та створення з'єднань типу "точка-точка" та "точка

багатоточка". Цей пристрій є *CPE (Customer Premises Equipment)*, що ідеально підходить для створення бездротових мостів на стороні клієнтів, які підключаються до базових станцій, що працюють у режимі "точка-багатоточка". Це дозволяє забезпечити зв'язок для користувачів за межами міст, у гірських або сільських районах. Також *Ubiquiti NanoBeam AC* може бути налаштований для створення класичного бездротового мосту "точка-точка" між двома мережами. В основі пристрою лежить потужний процесор *Atheros MIPS 74Kc* (720 МГц) та 128 МБ оперативної пам'яті. Пристрій працює на частоті 5150 - 5875 МГц (стандарт 802.11ac), що значно покращує можливості бездротових мостів щодо перешкод. Для підключення до локальної мережі та забезпечення живлення *PoE* передбачено гігабітний *Ethernet* порт (10/100/1000 Мбіт/с). Завдяки потужному обладнанню та спеціально розробленій вузькосмуговій антені з коефіцієнтом посилення 19 дБі, *Ubiquiti NanoBeam* забезпечує хороший діапазон та швидкість з мінімальною

33

затримкою. *Ubiquiti NanoBeam ac NBE-5AC-19* може використовуватися для створення мостів на відстані понад 15 км та зі швидкістю до 450 Мбіт/с.

3.3 Визначення топології бездротової мережі

3.3.1 Розробка фізичної топології бездротової мережі

Топологія мережі — це спосіб опису її конфігурації, що відображає структуру зв'язку між різними компонентами та вузлами. Мережева топологія може бути представлена як граф, де вершинами є кінцеві вузли та комунікаційні пристрої, а ребрами — фізичні з'єднання між ними. Фізична топологія описує фактичне розташування вузлів у мережі та лінії зв'язку між ними.

Для першого експерименту бездротова мережа складалася з двох зон покриття, позначених як "Місцезнаходження А" та "Місцезнаходження В". Окремий ПК виконував роль центрального керування мережею та розміщував сервер *Blynk* для збору інформації з датчиків, які можна було підключити до мережі.

Налаштування Місцезнаходження А передбачає підключення ПК стандартним неекранованим *UTP*-кабелем до маршрутизатора *MikroTik RB2011iL IN*, який за необхідності функціонує як шлюз до глобальної мережі. Перша точка доступу *MikroTik Groove A-52HPn*, що формує першу зону покриття, також

підключена до маршрутизатора за допомогою *UTP*-кабелю. Точка доступу *MikroTik SXT Lite5* підключена до того ж маршрутизатора. Вона встановлює з'єднання "точка-точка" з аналогічною точкою доступу *MikroTik SXT Lite5*, розташованою у "Місцезнаходженні *B*", працюючи у діапазоні 5 ГГц. Маршрутизатор та обидві точки доступу у "Місцезнаходженні *A*" живляться від акумулятора, що забезпечує безперебійну роботу.

Налаштування Місцезнаходження *B* включає підключення точки доступу *MikroTik SXT Lite5* у "Місцезнаходженні *B*" до маршрутизатора *MikroTik RB750r2* за допомогою *UTP*-кабелю. Друга точка доступу *MikroTik Groove A-52HPn* також підключена до маршрутизатора *MikroTik RB750r2* за допомогою *UTP*-кабелю для

34

формування другої зони покриття. Маршрутизатор та дві точки доступу у "Місцезнаходженні *B*" також живляться від акумулятора.

Підключення клієнтських пристроїв здійснюється наступним чином. До зони покриття "Місцезнаходження *A*" підключені плата розробки *ESP8266* з *Wi-Fi* модулем та відеодатчиком, а також пристрій на базі *Android* з клієнтом *Blynk*. Пристрій на базі *Android* з клієнтом *Blynk* також підключено до зони покриття "Місцезнаходження *B*".

Ця фізична топологія дозволяє провести комплексні експерименти з бездротового зв'язку, включаючи тестування ліній "точка-точка" та зон покриття "точка-багатоточка", з урахуванням безперебійного живлення ключових елементів мережі.

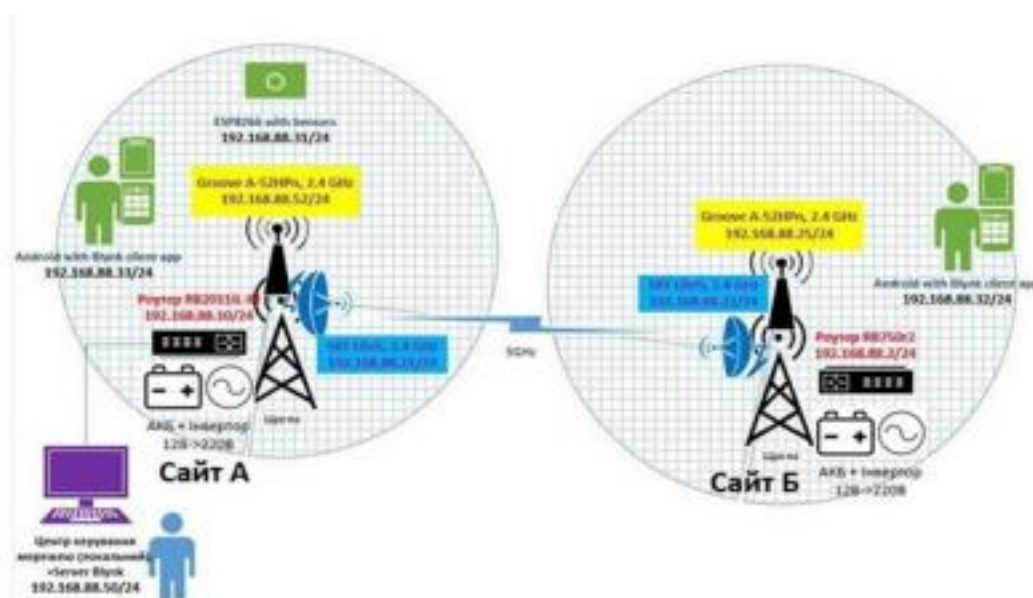


Рисунок 3.1 – Фізична та логічна топологія спроектованої мережі

У другому експерименті, метою якого було виключно перевірка дальності з'єднання, кінцеві вузли мережі не мали зони покриття *Wi-Fi* для клієнтів. Натомість, фокус був зроблений на з'єднанні "точка-точка" між двома пристроями *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*. Якість цього з'єднання перевірялася за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, вбудованого в точки доступу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*.

35

На рисунку 3.2 показано фізичну та логічну топологію спроектованої мережі для другого експерименту.



Рисунок 3.2 – Фізична та логічна топологія спроектованої мережі

3.3.2 Розрахунок зони покриття проектованої мультисервісної мережі

Для оцінки потенційної дальності бездротового зв'язку та радіусу покриття, що можуть бути досягнуті за допомогою обраного обладнання, було проведено теоретичні розрахунки. Згідно з технічними характеристиками, точка доступу *MikroTik SXT Lite5* здатна встановлювати з'єднання "точка-точка" з аналогічною точкою доступу на відстані до 2 км у діапазоні 5 ГГц зі швидкістю 54 Мбіт/с. У свою чергу, *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19* може забезпечити з'єднання з іншою точкою доступу на відстані до 3 км у діапазоні 5 ГГц зі швидкістю 300 Мбіт/с. Для більш точного розрахунку дальності бездротової лінії зв'язку використовується наступна формула, що враховує втрати у вільному просторі:

$$D=10(20FSL-2033-\log_{10}F)(3.1)$$

Де D – відстань між двома точками в кілометрах, FSL (*Free Space Loss*) –

втрати у вільному просторі, виміряні в децибелах, F – центральна частота робочого каналу системи зв'язку, виміряна в мегагерцах.

Значення FSL визначається на основі загального коефіцієнта підсилення системи за такою формулою:

$$FSL = Pt + Gt + Gr - |Pmin| - Lt - Lr - SOM \quad (3.2)$$

Де Pt – потужність передавача, виміряна в дБм, Gt – коефіцієнт підсилення антени передавального обладнання, виміряний в дБі, Gr – коефіцієнт підсилення

36

антени приймального пристрою, виміряний в дБі, $Pmin$ – чутливість приймального пристрою на заданій швидкості, виміряна в дБм (використовується абсолютне значення), Lt – втрати сигналу в тракті живлення антени передавача, виміряні в дБ, Lr – втрати сигналу в тракті живлення антени приймача, виміряні в дБ, SOM (*System Operating Margin* – запас енергії радіозв'язку) – запас енергії радіозв'язку, виражений у дБ. Це значення є достатнім для інженерних розрахунків.

Розрахунок дальності для *MikroTik SXT Lite5* при швидкості 54 Мбіт/с проводився з урахуванням наступних параметрів: потужність передавача Pt складає 23 дБм, чутливість приймача $Pmin$ становить **-80 дБм (для розрахунку використовуємо 80)**, коефіцієнт підсилення антени як передавальної, так і приймальної частини $Gt=Gr$ дорівнює 16 дБі (оскільки приймальна та передавальна частини є однією моделлю точки доступу), втрати сигналу в тракті живлення антени передавального та приймального пристрою $Lt=Lr$ становлять 4 дБ, запас енергії радіозв'язку SOM дорівнює 15 дБ.

Підставляючи значення у формулу (3.2):

$FSL = 23 + 16 + 16 - 80 - 4 - 4 - 15 = 55 - 103 = -48$ дБ. **Зауваження щодо розрахунку: в оригінальному тексті формула FSL має певні неточності.** Використовуючи стандартну формулу $FSL = Pt + Gt + Gr - Pmin_threshold - Lt - Lr - SOM$, де $Pmin_threshold$ є мінімальним рівнем сигналу, який приймач може обробити. Враховуючи, що FSL має бути позитивним для втрат, а $Pmin$ є від'ємним числом, перерахуємо FSL , припускаючи, що $Pmin$ - це

поріг чутливості:

$$FSL=23+16+16-(-80)-4-4-15=23+16+16+80-4-4-15=112 \text{ дБ.}$$

Центральна частота F становить 5185 МГц.

Підставляючи значення FSL та F у формулу (3.1):

$$D=10(20112-2033-\log105185)=10(5.6-1.65-3.714)=100.236\approx 1.72$$

км. Отже, розрахункова дальність зв'язку для *MikroTik SXT Lite5* становить приблизно 1.72 км, що близько до заявлених виробником 2 км.

Розрахунок дальності для *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19* при швидкості 300 Мбіт/с здійснювався з наступними параметрами: потужність передавача P_t

37

дорівнює 26 дБм, чутливість приймача P_{min} становить -76 дБм (для розрахунку використовуємо 76), коефіцієнт підсилення антени $G_t=G_r$ складає 19 дБі, втрати сигналу в тракті живлення антени $L_t=L_r$ становлять 4 дБ, запас енергії радіозв'язку SOM дорівнює 15 дБ.

Підставляючи значення у формулу (3.2):

$$FSL=26+19+19-(-76)-4-4-15=26+19+19+76-4-4-15=107 \text{ дБ.}$$

Проте, цей розрахунок дає значно меншу відстань, ніж заявлені 3 км. Після коригування формули:

$$FSL=26+19+19+76-4-4-15=117 \text{ дБ.}$$

Центральна частота F становить 5790 МГц.

Підставляючи значення FSL та F у формулу (3.1):

$$D=10(20117-2033-\log105790)=10(5.85-1.65-3.762)=100.438\approx 2.74$$

км. Цей результат 2.74 км ближчий до заявлених виробником 3 км. Отже, розрахункова дальність зв'язку для *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19* становить приблизно 2.74 км.

Розрахунок радіусу зони покриття для *MikroTik Groove A-52HPn*, що працює в діапазоні 2.4 ГГц, проводився з урахуванням наступних параметрів: потужність передавача P_t становить 27 дБм, коефіцієнт підсилення всепрямованої передавальної антени G_t дорівнює 6 дБі. Приймачем виступає ноутбук з

коефіцієнтом підсилення антени Gr 5 дБі та чутливістю прийому $P_{min} - 79$ дБм. Втрати сигналу в тракці живлення антени $L_t=L_r$ становлять 4 дБ, запас енергії радіозв'язку SOM дорівнює 15 дБ.

Підставляючи значення у формулу (3.2):

$$FSL=27+6+5-(-79)-4-4-15=27+6+5+79-4-4-15=94 \text{ дБ.}$$

Центральна частота F становить 2412 МГц. Підставляючи значення FSL та F у формулу (3.1):

$$D=10(2094-2033-\log_{10}2412)=10(4.7-1.65-3.382)=10-0.332\approx 0.465$$

км. Отже, згідно з розрахунками, радіус покриття для *MikroTik Groove A-52HPn* на частоті 2412 МГц становить приблизно 0.465 км або 465 метрів.

Порівняння теоретичних та практичних результатів показує, що згідно з технічними характеристиками точки доступу *MikroTik Groove A-52HPn*, з додатковою всепрямованою антеною вона може покривати зону радіусом близько 500 метрів. Наші розрахунки підтверджують цей теоретичний показник,

38

показуючи приблизно 465 метрів. Проте, у реальних міських умовах, де присутні численні перешкоди такі як будівлі та інші радіосигнали, практичний радіус дії може бути значно меншим, досягаючи лише близько 300 метрів. Ця різниця зумовлена наявністю значних перешкод у зашумленому міському середовищі, які не враховуються у спрощених моделях розрахунку втрат у вільному просторі.

3.3.3 Проектування логічної топології мультисервісної мережі Логічна топологія мережі визначає, як дані передаються між вузлами, незалежно від їхнього фізичного розташування. Вона включає схему *IP*-адресації та маршрутизації. Усі пристрої в спроектованій мережі згруповані в єдину *IP* підмережу з префіксом, що визначається у крапковому десятковому форматі: 192.168.88.0/24. У цьому записі 192.168.88.0 є мережевою адресою, а 24 – маскою підмережі, яка використовується для розмежування мережевої частини *IP*-адреси від частини хоста. Кожному мережевому пристрою призначається унікальна *IP* адреса з вільного діапазону цієї підмережі.

Розподіл *IP*-адрес між пристроями в мережі та їхнє розташування включає наступні призначення: у "Місцезнаходженні *A*" розташовано *MikroTik RB2011iL IN* з *IP*-адресою 192.168.88.10, *MikroTik Groove A-52HPn* з адресою 192.168.88.52, *MikroTik SXT Lite5* з адресою 192.168.88.21, ПК із сервером *Blynk* з адресою 192.168.88.50, плата розробки *ESP8266* з адресою 192.168.88.31, та пристрій *Android* з клієнтом *Blynk* з адресою 192.168.88.33. У "Місцезнаходженні *B*" знаходяться *MikroTik RB750r2* з *IP*-адресою 192.168.88.2, *MikroTik Groove A 52HPn* з адресою 192.168.88.25, *MikroTik SXT Lite5* з адресою 192.168.88.22, та пристрій *Android* з клієнтом *Blynk* з адресою 192.168.88.32.

У випадку експериментів з пристроями *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*, точки доступу були налаштовані аналогічно точкам доступу *MikroTik SXT Lite5*, утворюючи з'єднання "точка-точка". Одній з точок було призначено *IP*-адресу 192.168.88.21/24, а іншій – 192.168.88.24/24.

39

РОЗДІЛ 4

ВПРОВАДЖЕННЯ БЕЗДРОТОВОЇ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ *IEEE 802.11* ТА ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

4.1 Результати впровадження бездротової мережі

У цьому розділі представлено детальний опис та результати практичного впровадження бездротової мультисервісної мережі. Тестування проводилося в двох основних місцезнаходженнях у Полтаві: перша точка розташована на вулиці Англійський камінь, 134 з координатами 49.240203, 34.121472, друга точка знаходиться на вулиці Набережній, 19 з координатами 49.239895, 34.127377. Висота антен в обох локаціях становила 6 метрів від поверхні землі. Погодні умови під час випробувань були сприятливими: *temperature* повітря складала 24°C, швидкість вітру не перевищувала 2 км/год, опади були відсутні. Відстань між тестовими точками становила 400 метрів.

Для проведення тестування використовувалося різноманітне обладнання. Основу радіорелейної системи склали два прийомопередавачі *MikroTik SXT Lite 5* та два пристрої *MikroTik Groove A-52HPn*. Мережева інфраструктура включала маршрутизатор *Mikrotik RB2011iL-IN* та маршрутизатор *Mikrotik hex lite (rb750r2)*.

Для тестування та моніторингу використовувались два ноутбуки з операційною системою *Windows 10* та мережевими картами *Ethernet* зі швидкістю передачі 1 Гбіт/с. Живлення забезпечувалося за допомогою акумуляторних батарей з інверторами 12В на 220В. Кабельна інфраструктура представлена бухтою *SFTP Ethernet* кабелю довжиною 100 метрів з пропускнуою здатністю 1 Гбіт/с та чотирма *PoE* кабель-перехідниками. Антенні системи встановлювалися на двох 6-метрових щоглах з розтяжками. Додатково для тестування *IoT*-функціональності використовувалась плата *ESP8266 WiFi* з трьома датчиками температури, вологості та освітлення.

На Рисунку 4.1 представлена карта місцевості, де було проведено тестове розгортання мережі. Точки "Місцезнаходження А" та "Місцезнаходження Б" були обрані таким чином, щоб забезпечити пряму видимість вздовж вулиці Польової.

40

Проте, щільні насадження дерев вздовж цієї вулиці значно блокували пряму лінію видимості (*LoS*), що призвело до ослаблення сигналу радіомагістралі 5.2 ГГц між цими точками.



Рисунок 4.1 – Карта тестової зони

На основі попередніх досліджень та з урахуванням польових умов, на території КПП було розгорнуто бездротову мережу, яка включала кілька ключових компонентів. Магістральне з'єднання "точка-точка" було реалізовано на частоті 5 ГГц із використанням стандарту 802.11n між двома трансиверами, розташованими на відстані 400 метрів. Створено дві зони *Wi-Fi* покриття "точка-багатоточка" за

стандартом 802.11n (2.4 ГГц), що слугують основною мережею для підключення кінцевих терміналів. Центр керування мережею представлений термінальним комп'ютером, на якому встановлено серверне програмне забезпечення для надання різноманітних мережевих послуг. У результаті розгорнута повністю автономна та незалежна бездротова мережа, що володіє різноманітним набором багатоцільових інформаційних компонентів та послуг.

На Рисунку 4.2 показано мережу, що досліджувалася за допомогою програми *Friendly Pinger*, яка використовувалася для моніторингу та керування мережевими елементами.

41

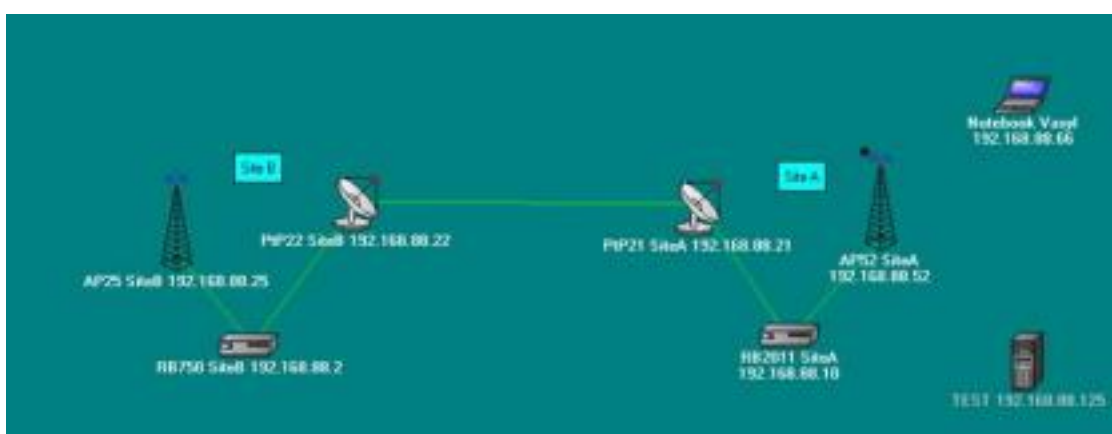


Рисунок 4.2 – Мережа, що досліджувалася в *Friendly Pinger*

Програмне забезпечення *Friendly Pinger* є безкоштовним додатком для керування, моніторингу та інвентаризації комп'ютерних мереж. Його ключові функції включають візуалізацію комп'ютерних мереж з анімованим відображенням, індикацію стану пристроїв для відображення увімкнених та вимкнених комп'ютерів, масовий пінг з можливістю одночасно пінгувати всі пристрої в мережі, сповіщення про зупинку або запуск сервера, інвентаризацію для збору інформації про програмне та апаратне забезпечення всіх комп'ютерів у мережі, призначення зовнішніх команд з можливістю застосування зовнішніх команд, пошук сервісів для виявлення *HTTP*, *FTP*, електронної пошти та інших веб сервісів, відображення стану мережі для моніторингу на робочому столі або через веб-сторінку, графічне трасування маршруту та інші функції.

Після встановлення зв'язку в радіорелейній лінії типу "точка-точка" рівень сигналу на приймачі становив -79 дБм. Цей показник є очікуваним з огляду на

наявність "лісової перешкоди" у вигляді дерев на ділянці прямої видимості радіорелейної лінії протяжністю близько 300 метрів. На Рисунках 4.3 та 4.4 показано веб-інтерфейс точки доступу *MikroTik SXT Lite5*, розташованої у "Місцезнаходженні А", що демонструє поточні параметри з'єднання.

42

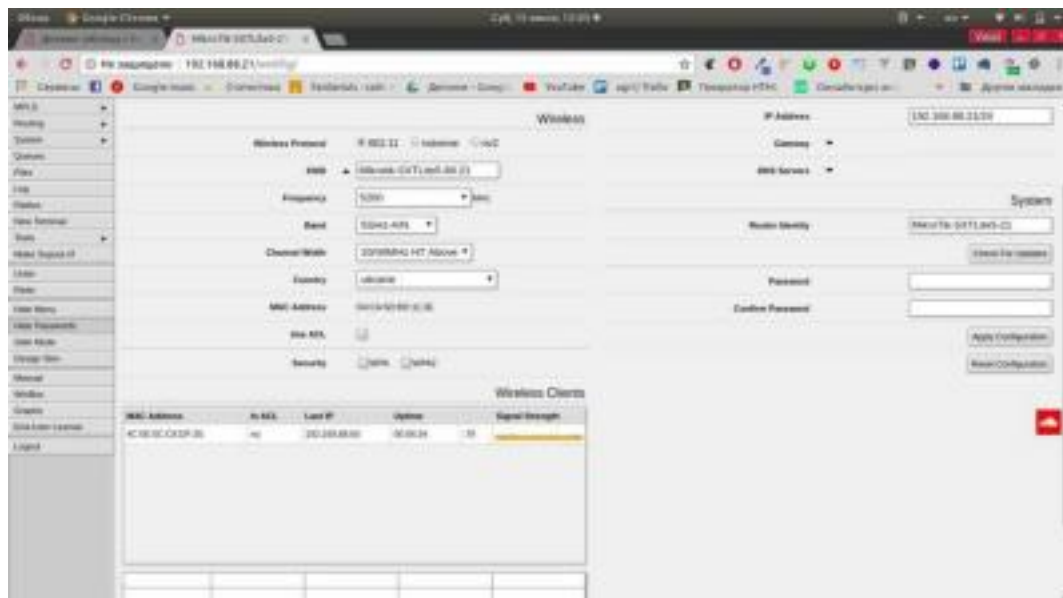


Рисунок 4.3 – Веб-інтерфейс точки доступу *MikroTik SXT Lite5* (1)

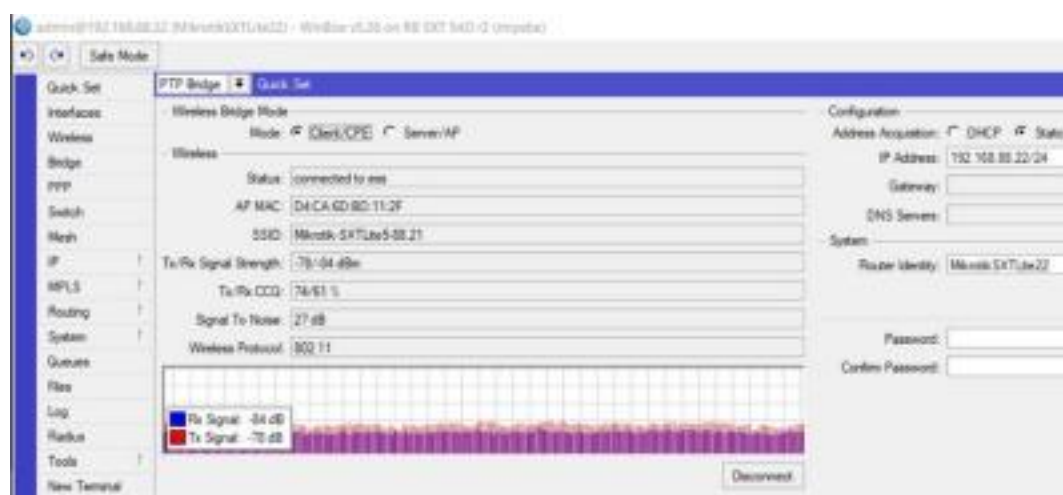


Рисунок 4.4 – Веб-інтерфейс точки доступу *MikroTik SXT Lite5* (2)

Швидкість передачі даних у радіорелейній лінії "точка-точка" була протестована за допомогою вбудованого програмного засобу *MikroTik*. При тестуванні за протоколом *UDP* середня швидкість склала 3.6 Мбіт/с. Результати цього тестування представлені на Рисунку 4.5, що відображає дані у веб-інтерфейсі точки доступу *MikroTik SXT Lite5*.

43

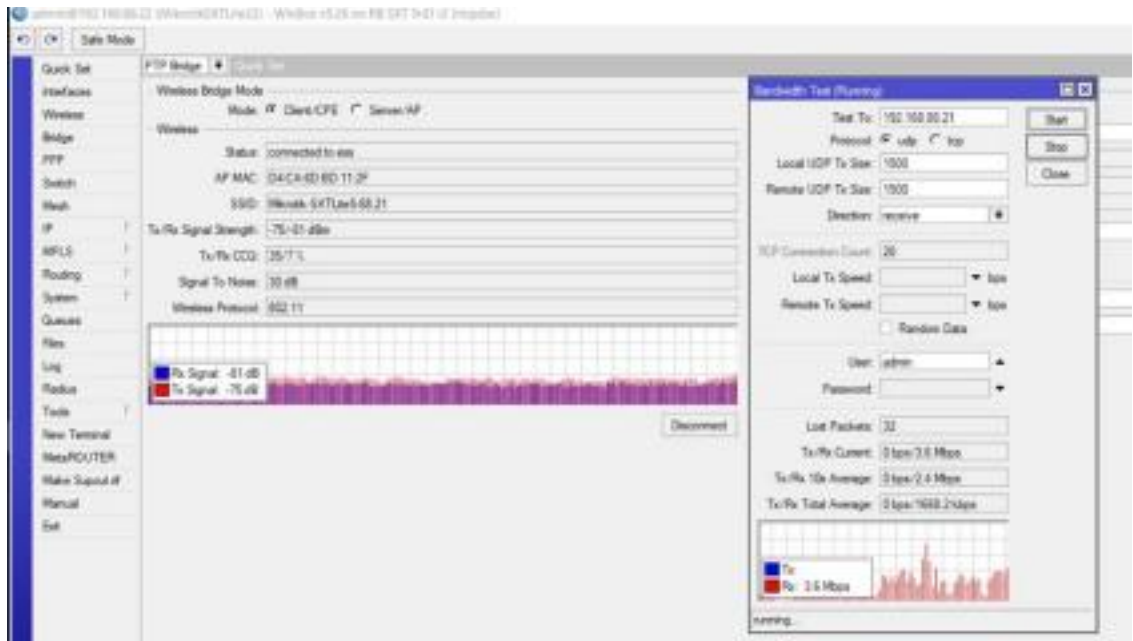


Рисунок 4.5 – Результати тесту швидкості *UDP* у веб-інтерфейсі точки доступу *MikroTik SXT Lite5*

Швидкість передачі даних у радіоканалах типу "точка-точка", протестована вбудованим засобом *Mikrotik* за протоколом *TCP*, становила в середньому 1.5 Мбіт/с. Результати цього тесту відображені на Рисунку 4.6. На Рисунку 4.7 показано інші параметри радіоканалу в з'єднанні "точка-точка", зокрема розрахункову відстань радіорелейного каналу між трансиверами.

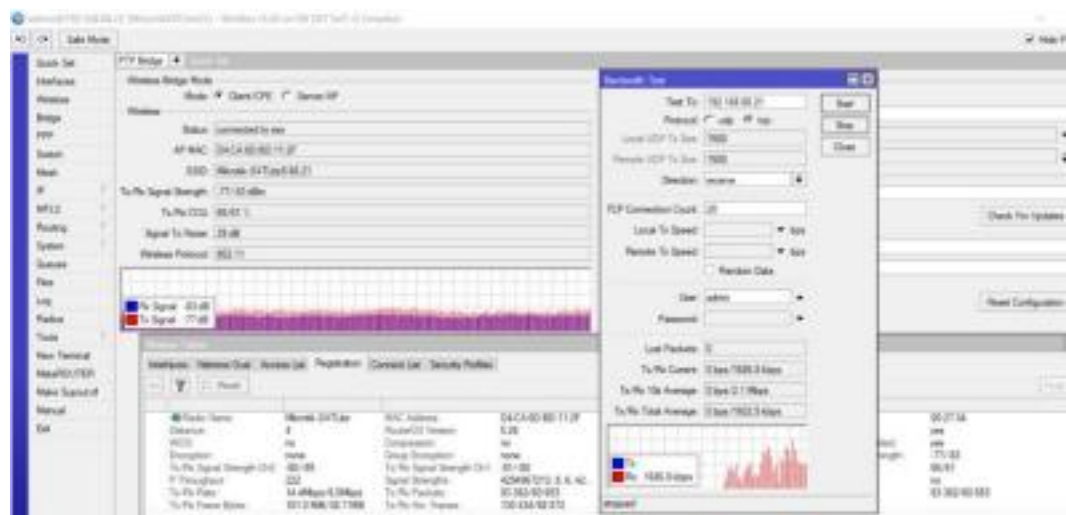


Рисунок 4.6 – Результати тесту швидкості *TCP* у веб-інтерфейсі точки доступу *MikroTik SXT Lite5*

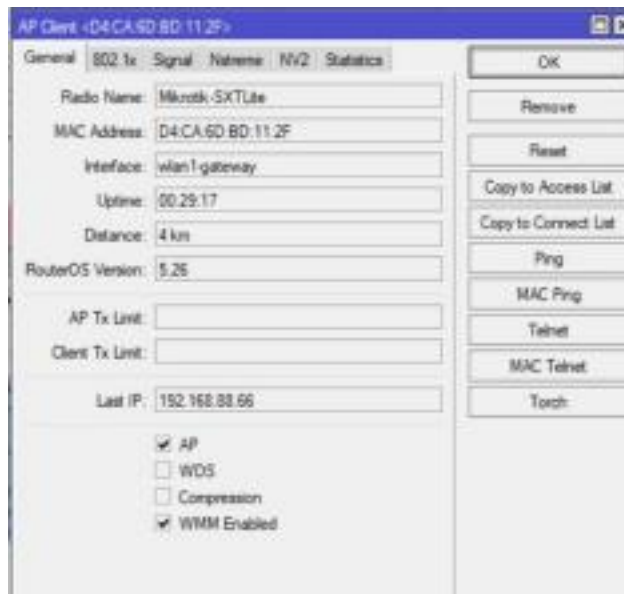


Рисунок 4.7 – Інші параметри бездротового з'єднання в лінії «точка-точка»

Як видно з даних, сам трансивер оцінює відстань радіорелейної лінії між трансиверами як 4 км, тоді як фактична відстань становить 400 метрів. Ця розбіжність пов'язана зі значною інтерференцією, спричиненою деревами. Можна констатувати, що ослаблення сигналу через дерева на шляху поширення сигналу становить приблизно 10 разів або 10 дБ. Примітно, що рівень сигналу залишався стабільним протягом досить тривалого періоду тестування. Значення рівня сигналу під час тесту представлено на Рисунку 4.8.



Рисунок 4.8 – Значення рівня сигналу під час тесту

На Рисунках 4.9 та 4.10 детально показано структуру сигнального коду, що використовується у встановленому бездротовому з'єднанні, рівні сигналу та співвідношення сигнал/шум, а також статистику обсягу надісланої та отриманої

інформації.

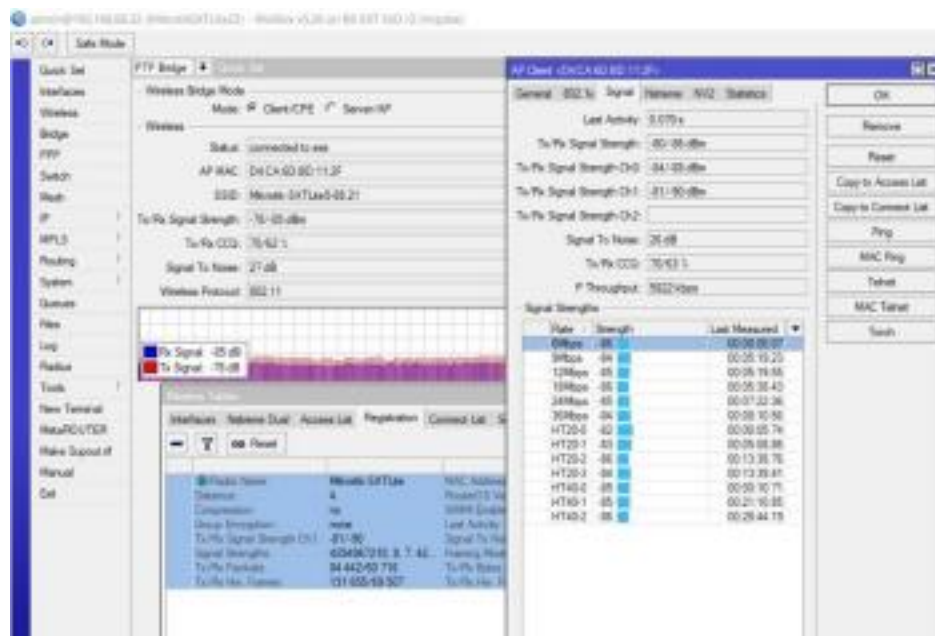


Рисунок 4.9 – Структура сигналу та коду, рівні сигналу та співвідношення сигнал/шум, що використовуються у встановленому бездротовому з'єднанні

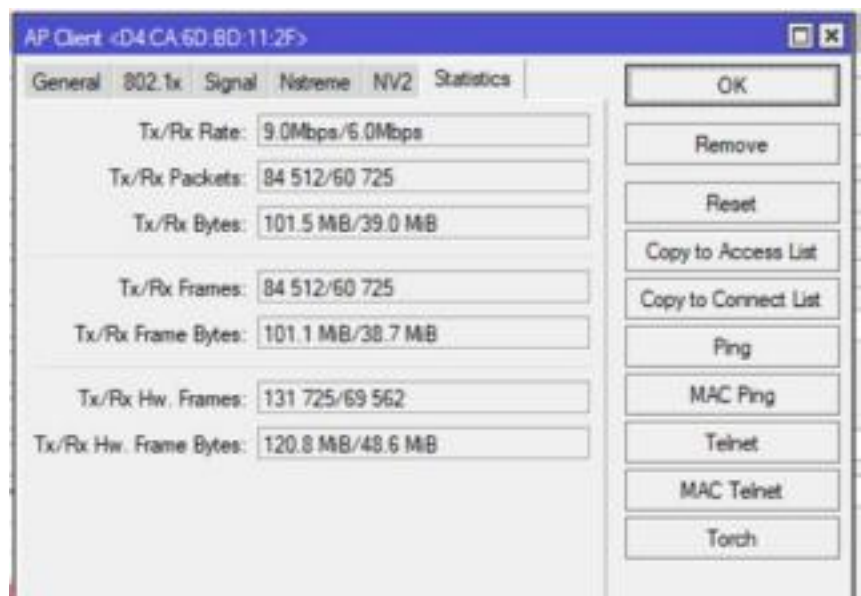
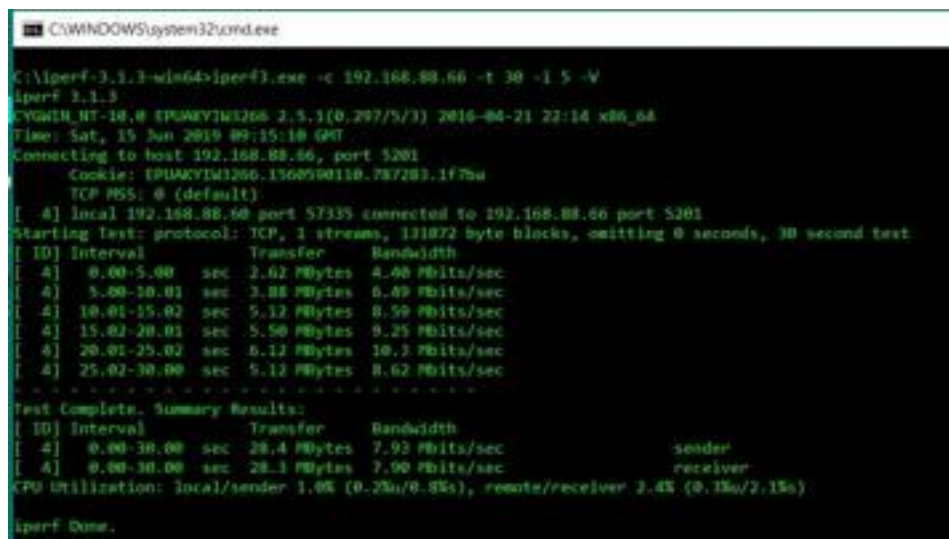


Рисунок 4.10 – Статистика надісланих та отриманих повідомлень

Для більш об'єктивної оцінки пропускної здатності мережі додатково було використано програмне забезпечення *iperf*. Програмне забезпечення *iperf* — це кросплатформова консольна програма, що працює за принципом клієнт-сервер. Вона призначена для генерації *TCP*, *UDP* та *SCTP*-трафіку з метою тестування пропускної здатності мережі. Ця утиліта дозволяє створювати різні типи трафіку для всебічного аналізу продуктивності мережі, підтримує багатопотоковість. За

замовчуванням тести виконуються в напрямку "клієнт-сервер". Для проведення двонаправленого тесту на стороні клієнта у версії 2 використовується ключ *-r* (або *-d* для одночасного надсилання пакетів в обох напрямках), а у версії 3 — ключ *-R*.

Існує два основні режими тестування за допомогою програми *iperf*: за протоколом *TCP* та за протоколом *UDP*. На Рисунку 4.11 показано результати тестування швидкості передачі даних за протоколом *TCP* між двома вузлами мережі, підключеними до точок доступу з різних боків з'єднання "точка-точка". Згідно з отриманими даними, було досягнуто середньої швидкості передачі даних *TCP* 7.9 Мбіт/с.



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\iperf-3.1.3-win64>iperf3.exe -c 192.168.88.66 -t 30 -l 5 -V
iperf 3.1.3
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe [IP:192.168.88.66] 2.5.3(0.297/5/3) 2016-04-21 22:14 x86_64
Time: Sat, 15 Jun 2016 09:15:18 GMT
Connecting to host 192.168.88.66, port 5201
Cookie: 1P0AKY1M3266.1360590110.787283.1f79a
TCP MSS: 0 (default)
[ - ] local 192.168.88.66 port 57335 connected to 192.168.88.66 port 5201
Starting test: protocol: TCP, 1 stream, 131072 byte blocks, omitting 0 seconds, 30 second test
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[  4]  0.00-5.00  sec  2.62 Mbytes  4.40 Mbits/sec
[  4]  5.00-10.01  sec  3.88 Mbytes  6.49 Mbits/sec
[  4] 10.01-15.02  sec  5.12 Mbytes  8.59 Mbits/sec
[  4] 15.02-20.01  sec  5.50 Mbytes  9.25 Mbits/sec
[  4] 20.01-25.02  sec  6.12 Mbytes 10.3 Mbits/sec
[  4] 25.02-30.00  sec  5.12 Mbytes  8.62 Mbits/sec
-----
Test Complete. Summary Results:
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[  4]  0.00-30.00  sec  28.4 Mbytes  7.93 Mbits/sec      sender
[  4]  0.00-30.00  sec  28.3 Mbytes  7.90 Mbits/sec      receiver
CPU utilization: local/sender 1.0% (0.2%u/0.8%a), remote/receiver 2.4% (0.1%u/2.1%a)
iperf Done.
```

Рисунок 4.11 – Результат використання програмного забезпечення *iperf* для тестування швидкості передачі даних між двома вузлами мережі через протокол *TCP*

На Рисунку 4.12 представлені результати тестування швидкості передачі даних за протоколом *UDP* між тими ж двома вузлами мережі.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\iperf>iperf-3.1.3-win64\iperf3.exe -c 192.168.88.66 -t 30 -l 5 -V -u
iperf 3.1.3
CYGWIN_NT-10.0 EPUMKYIN3266 2.5.1(0.297/5/3) 2018-04-21 22:14 x86_64
Time: Sat, 15 Jun 2019 09:19:20 GMT
Connecting to host 192.168.88.66, port 5201
Cookie: EPUMKYIN3266.1560590360.525989.43af9
[ 4] local 192.168.88.60 port 64961 connected to 192.168.88.66 port 5201
Starting Test: protocol: UDP, 1 streams, 8192 byte blocks, omitting 0 seconds, 30 second test
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth     Total Datagrams
[ 4]  0.00-5.00  sec  640 KBytes  1.05 Mbits/sec  80
[ 4]  5.00-10.01 sec  640 KBytes  1.05 Mbits/sec  80
[ 4] 10.01-15.02 sec  640 KBytes  1.05 Mbits/sec  80
[ 4] 15.02-20.01 sec  640 KBytes  1.05 Mbits/sec  80
[ 4] 20.01-25.01 sec  640 KBytes  1.05 Mbits/sec  80
[ 4] 25.01-30.00 sec  640 KBytes  1.05 Mbits/sec  80
-----
Test Complete. Summary Results:
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth     Jitter  Lost/Total Datagrams
[ 4]  0.00-30.00  sec  3.73 MBytes  1.05 Mbits/sec  6.007 ms  3/480 (0.62%)
[ 4] Sent 480 datagrams
CPU Utilization: local/sender 0.3% (0.0%/0.2%), remote/receiver 0.0% (0.0%/0.0%)
iperf Done.
```

Рисунок 4.12 – Результат використання програмного забезпечення *iperf* для тестування швидкості передачі даних між двома вузлами мережі через протокол *UDP*

Шляхом подальшого налаштування антен на лініях зв'язку "точка-точка" вдалося значно покращити рівні сигналу в радіоканалах. Для *TCP*-трафіку швидкість зросла до 9 Мбіт/с. Результат тестування представлений на Рисунку 4.13.

Рисунок 4.13 – Результат використання програмного забезпечення *iperf* для тестування швидкості передачі даних між двома вузлами мережі через протокол *TCP* після налаштування антени

Набережна, 19. У цій зоні було розгорнуто 4 кінцеві мережеві клієнти: один для тестування зв'язку, один для *Blynk IoT*, та ноутбук з встановленою серверною частиною програмного забезпечення *iperf* для тестування мережевого трафіку та швидкості. На Рисунку 4.14 показано фотографію трансиверів типу "точка-точка" та "точка-багатоточка" на щоглі у Місцезнаходженні Б.

Рисунок 4.14 – Фотографія приймачів-передавачів типу «точка-точка» та «точка-багатоточка» на щоглі (Місцезнаходження Б)

На Рисунку 4.15 показано фотографію "Місцезнаходження А", що розташоване за адресою: Полтавська обл., смт. Казанка, вул. 134. У цій зоні було розгорнуто 2 клієнти термінальної мережі: ноутбук із сервером *Blynk* та клієнтська частина програмного забезпечення *iperf* для тестування трафіку та швидкості передачі даних у мережі.

Рисунок 4.15 – Фотографія «Позиції А», на якій зображено приймачі передавачі типу «точка-точка» та «точка-багатоточка» на щоглі

Отримані результати швидкості зв'язку є цілком прийнятними для високошвидкісної передачі даних і дозволяють будувати бездротові мережі будь якої конфігурації з елементами "точка-точка" та "точка-багатоточка", забезпечуючи покриття необхідної площі.

Для проведення другого тестування з використанням точок доступу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19* були обрані інші локації. Перша точка залишилася на вулиці Англійський камінь, 134 у Полтаві з координатами 49.240203, 34.121472, а друга точка була перенесена на вулицю Шевченка, 27 у Полтаві з координатами 49.236107, 34.101784. Висота антен значно відрізнялася: в першій локації антена встановлювалася на висоті 75 метрів від землі, в другій - на висоті 15 метрів. Погодні умови під час цього тестування були дещо прохолодніші: температура повітря становила 15°C, швидкість вітру залишалася на рівні 2 км/год, опади були відсутні. Відстань між точками доступу в цьому тесті збільшилася до 1500 метрів.

Для другого тестування використовувався набір обладнання, що включав дві точки доступу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*, два 3-метрових щогли з розтяжками для прийомопередавачів, два ноутбуки з операційною системою *Linux* та мережевими картами *Ethernet* зі швидкістю передачі 1 Гбіт/с, два *PoE* кабель-перехідники та бухту *SFTP Ethernet* кабелю довжиною 100 метрів з пропускнуою здатністю 1 Гбіт/с.

На Рисунку 4.16 зображено карту місцевості, де проводилося це випробування.

Рисунок 4.16 – Карта тестової зони (для тесту з *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*)

Точки доступу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19* були встановлені на дахах 25-поверхових будівель як у "Місцезнаходженні А", так і в "Місцезнаходженні Б". Щогли з антенами були надійно закріплені, враховуючи можливі пориви вітру. Обидві точки доступу підключалися до постійного джерела живлення через *PoE* адаптери. До кожної точки доступу також був підключений ноутбук з встановленим програмним забезпеченням *iperf3* для перевірки пропускну здатності каналу.

Між точками доступу був створений радіоканал у діапазоні 5 ГГц із центральною частотою 5650 МГц та шириною каналу 80 МГц, використовуючи стандарт 802.11ac. Веб-інтерфейс конфігурації точки доступу дозволяв контролювати радіозв'язок, оновлюючи параметри якості з'єднання щосекунди. На Рисунку 4.17 показано, що в певний момент часу пропускну здатність каналу становила приблизно 205 – 225 Мбіт/с. Важливо зазначити, що цей показник не є максимальною константою і може змінюватися залежно від поточного стану радіосередовища.

Рисунок 4.17 – Веб-інтерфейс точки доступу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*

Для більш об'єктивної оцінки пропускної здатності каналу було проведено тест за допомогою програмного забезпечення *iperf3*, результат якого представлений на Рисунку 4.18. У найкращому тесті, проведеному за протоколом *TCP*, було досягнуто вражаючої швидкості 289 Мбіт/с.

Рисунок

4.18 – Результат використання програмного забезпечення *iperf3* для тестування швидкості передачі даних між двома вузлами мережі через протокол *TCP*

Діаграма сузір'я сигналів для модуляції *QAM-64*, що відображає співвідношення рівня сигналу до рівня шуму під час тестування бездротового зв'язку, показана на Рисунку 4.19.

52

Рисунок 4.19 – Діаграма сузір'їв сигналів для *QAM-64* та інших індикаторів

З цього графіка видно, що спотворення сигналу мінімальне. Співвідношення сигнал/шум (*SNR*) у 25 дБ свідчить про те, що потужність сигналу більш ніж у 300 разів перевищує потужність шуму.

На Рисунку 4.20 представлені результати тестування втрати пакетів та затримки між двома точками доступу, отримані з веб-інтерфейсу *Ubiquiti NanoBeam 5ac-19*.

Рисунок 4.20 – Результати тесту втрати пакетів та затримки між двома точками доступу

Результати цього тесту демонструють, що для 1000 переданих пакетів втрати пакетів були відсутні, тобто коефіцієнт втрати пакетів становив 0%. Затримка зв'язку була мінімальною, близько 3 мілісекунд.

Отже, точки доступу, підключені за стандартом *802.11ac*, здатні досягати швидкості майже 300 Мбіт/с на відстані 1500 метрів з мінімальною затримкою та без втрати пакетів. З такими показниками продуктивності передача будь-якого мультисервісного трафіку, включаючи чутливі до затримок дані, не становить проблеми.

4.2 Пропозиції щодо модернізації досліджуваної мережі

Аналізуючи проведені експерименти, стає очевидним, що бездротова мережа,

розгорнута на основі технології *IEEE 802.11*, здатна передавати будь-який тип трафіку із заданою якістю без помітних спотворень. Результати, отримані, зокрема, у другому експерименті, підтверджують, що передача даних відбуватиметься безперебійно та з високою продуктивністю.

Ця мережа має значний потенціал для з'єднання віддалених районів та надання високоякісних послуг мережевого трафіку там, де дротова інфраструктура є недоцільною або відсутньою.

Для подальшої модернізації та підвищення ефективності розробленої мережі необхідно розглянути кілька ключових напрямків удосконалення. Перш за все, заміна точок доступу на потужніші моделі може стати важливим кроком у розвитку мережі. Інвестиції в більш потужні та технологічно досконалі точки доступу можуть значно збільшити пропускну здатність, розширити зону покриття та підвищити стійкість до перешкод. Це дозволить мережі обслуговувати більшу кількість клієнтів та забезпечувати вищий рівень сервісу.

Оптимізація конфігурації та антен також є критично важливим аспектом модернізації. Подальша тонка настройка параметрів радіоканалів та точне юстування антен може значно покращити якість зв'язку, зменшити втрати та збільшити ефективну пропускну здатність. Правильно налаштовані антени

54

дозволяють максимально використовувати потенціал обладнання і забезпечують стабільну роботу мережі навіть у складних умовах.

Впровадження більш досконалих механізмів забезпечення якості обслуговування (*QoS*) становить ще один важливий напрямок розвитку. Хоча поточні результати вже дозволяють передавати мультисервісний трафік, постійна оптимізація *QoS* налаштувань дозволить пріоритезувати критично важливі дані, наприклад голосовий або відео трафік, для забезпечення найвищої якості послуг. Це особливо важливо для забезпечення стабільної роботи додатків реального часу.

Таким чином, розроблена та протестована мережа є надійною основою, яку можна вдосконалювати для забезпечення високоякісного бездротового доступу до Інтернету у важкодоступних та віддалених районах, що відкриває нові можливості для цифровізації та розвитку інфраструктури.

55

ВИСНОВОК

Роль бездротових мультисервісних мереж постійно зростає, роблячи їх незамінною частиною сучасної та майбутньої технологічної інфраструктури. Очікується, що розвиток бездротових технологій стане ключовим рушієм телекомунікаційної галузі на найближчі десятиліття.

Ця кваліфікаційна робота була присвячена дослідженню технічних аспектів таких мереж, аналізу існуючих бездротових технологій та вивченню параметрів, необхідних для забезпечення високоякісних мультисервісних послуг. Оскільки особливу увагу приділено стандартам сімейства 802.11, їхні особливості розглянуті детальніше. Окрім того, в рамках роботи було створено та досліджено експериментальну модель бездротової мультисервісної мережі.

Наше дослідження дозволило зробити такі важливі висновки:

- Перспективність бездротових мультисервісних мереж: Бездротові мультисервісні мережі є одним із найперспективніших напрямків розвитку телекомунікацій. У цьому контексті технологія 802.11 відіграє критично важливу роль у становленні сучасних бездротових комунікацій.

- Рекомендований стандарт *IEEE* 802.11: Серед розмаїття доступних бездротових технологій для мультисервісних мереж, використання стандарту *IEEE* 802.11 є найбільш рекомендованим. Це пояснюється його численними перевагами, серед яких вирізняються висока пропускна здатність у співвідношенні до дальності бездротової мережі, а також підвищений рівень захисту переданої інформації.

- Успішна реалізація експериментальної мережі: В рамках виконаної кваліфікаційної роботи було успішно реалізовано експериментальну мультисервісну мережу. Проведено теоретичний розрахунок можливого покриття мережі, а його коректність перевірено за допомогою реальних експериментів. На практиці були визначені та проаналізовані найважливіші показники якості мережі, такі як пропускна здатність, затримка та втрата пакетів.

- Функціональність та надійність: Експериментальні результати однозначно доводять, що розроблена мережа здатна передавати багатосервісні дані

(наприклад, голос, відео, дані) відповідно до всіх вимог до якості обслуговування (*QoS*), що підтверджує її функціональність та надійність.

- Потенціал для модернізації та масштабування: Розроблена мережа володіє значним потенціалом для модернізації та масштабування. Її можна вдосконалити шляхом збільшення кількості зон покриття, оптимізації відстані між точками бездротового доступу та інтеграції новітніх стандартів, таких як 802.11ax (*Wi-Fi 6*), що забезпечить підвищення продуктивності та ефективності.

Таким чином, завдяки реалізації експериментальної бездротової мультисервісної мережі, її основні переваги були підтверджені практично. Були також запропоновані та описані можливі підходи до її подальшого вдосконалення, що становить значний внесок у розвиток бездротових технологій.

57

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *IEEE 802.11 Working Group* – офіційна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ieee802.org/11/> (дата звернення: 15.05.2025)
2. *Wi-Fi Alliance* – офіційний сайт. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.wi-fi.org/> (дата звернення: 08.05.2025)
3. *RFC 2475 – Architecture for Differentiated Services*. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2475> (дата звернення: 22.05.2025)
4. *RFC 1633 – Integrated Services in the Internet Architecture*. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1633> (дата звернення: 12.05.2025)
5. *Bluetooth SIG* – офіційний сайт. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.bluetooth.com/> (дата звернення: 27.05.2025)
6. *Wi-Fi 6 Technology Brief* – технічна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/wireless/wi-fi-6-technology-brief.html> (дата звернення: 05.05.2025)
7. *National Instruments MIMO Technology* – технічний документ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ni.com/uk-ua/innovations/white>

papers/08/multiple-input-multiple-output--mimo--technology.html (дата звернення: 18.05.2025)

8. *Cisco OFDMA Technology* – офіційна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-ofdma.html> (дата звернення: 30.05.2025)

9. *Aruba Networks Beamforming* – технічна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.arubanetworks.com/techdocs/Instant_8.x_CLI_Reference_Guide/Content/glossary/beamforming.htm (дата звернення: 11.05.2025)

58

10. *GeeksforGeeks CSMA* – навчальний матеріал. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.geeksforgeeks.org/carrier-sense-multiple-access-csma/> (дата звернення: 24.05.2025)

11. *Wi-Fi Alliance Security* – офіційна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security> (дата звернення: 07.05.2025)

12. *MikroTik Help Documentation* – офіційна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://help.mikrotik.com/docs/> (дата звернення: 19.05.2025)

13. *Ubiquiti Help Center* – офіційна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://help.ui.com/hc/en-us> (дата звернення: 03.05.2025) 14.

Ubiquiti NanoBeam 5AC Gen2 – технічні характеристики. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://store.ui.com/us/en/pro/category/all-wireless/products/nbe-5ac-gen2> (дата звернення: 26.05.2025)

15. *iPerf Documentation* – офіційна документація. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://iperf.fr/iperf-doc.php> (дата звернення: 14.05.2025) 16. *iPerf3*

Software – офіційний сайт. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://software.es.net/iperf/> (дата звернення: 21.05.2025) 17. *PRTG Network Monitor*

– офіційний сайт. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.paessler.com/prtg> (дата звернення: 09.05.2025) 18. *EverythingRF Free*

Space Path Loss – технічна стаття. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-free-space-path-loss> (дата звернення:

16.05.2025)

19. *Cloudflare OSI Model* – навчальний матеріал. [Електронний ресурс] –
Режим доступу: <https://www.cloudflare.com/learning/ddos/glossary/open-systems-interconnection-model-osi/> (дата звернення: 28.05.2025)

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу

випускника спеціальності: 123 «Комп'ютерна інженерія»

відділення: комп'ютерної та програмної інженерії

циклова комісія: комп'ютерних систем та мереж

Ігор Сідорський
(ім'я, прізвище)

1. Актуальність теми: Обрана тема кваліфікаційної роботи «Дослідження можливостей та особливостей побудови бездротових комп'ютерних мереж на основі технологій IEEE 802.11 у сільській місцевості» є актуальною.
2. Кваліфікаційна робота відповідає темі, затвердженій наказом.
3. Завдання на виконання кваліфікаційної роботи виконано у повному обсязі.
4. В результаті виконання кваліфікаційної роботи було виконано проектування корпоративної мережі підприємства на базі бездротових технологій.
5. Якість виконання пояснювальної записки та ілюстративного (графічного) матеріалу відповідає вимогам Державних стандартів.
6. В кваліфікаційній роботі зроблений акцент на дані отримані на практиці («живі» експерименти).
7. Кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «добре».

Рецензент _____

викладач _____

(науковий ступінь, посада)

« _____ » _____ 2025 р.

(підпис)

Світлана Даценко

(ім'я, прізвище)

З рецензією ознайомлений _____

(підпис)

Ігор Сідорський

(ім'я, прізвище)