

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____Марія СКУЛИШ

«_____»_____2025 р

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні
технології»**

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: Дослідження характеристик безпроводових мереж стандарту
802.11

Виконала: здобувачка вищої освіти 4 курсу, групи ТІ-11

Лукаш Катерина Дмитрівна _____

Науковий керівник: доцент кафедри ІТТ НН ІТС, доктор технічних наук,
доцент

Астраханцев Андрій Анатолійович _____

Рецензент: доцент кафедри штучного інтелекту,

кандидат технічних наук Шаповал Н.В. _____

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

Здобувач вищої освіти _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Марія СКУЛИШ

«_____»_____2025 р

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студентці

Лукаш Катерині Дмитрівні

1. Тема дипломної роботи: Дослідження характеристик безпроводових мереж стандарту 802.11, науковий керівник роботи доцент кафедри ІТТ НН ІТС, доктор технічних наук, доцент__Астраханцев Андрій Анатолійович,
затверджені наказом по університету від 26.05.2025 р. № 1755-с

2. Строк подання студентом дипломної роботи 06.06.2025 р.

3. Об'єкт дослідження: Процес функціонування бездротових Wi-Fi мереж стандарту IEEE 802.11 у контексті забезпечення якісного з'єднання.

4. Вихідні дані до роботи: Технічні характеристики стандарту IEEE 802.11, параметри бездротових мереж, моделі загасання сигналу, методи оцінювання продуктивності Wi-Fi-з'єднань, а також міжнародні стандарти та програмні засоби моделювання (зокрема NetSim).

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести аналіз стандарту IEEE 802.11 та архітектури Wi-Fi-мереж. Дослідити параметри, що впливають на якість з'єднання (пропускну здатність, затримку, джитер, втрати пакетів). Виконати серію симуляцій у NetSim для оцінки впливу потужності передавача, ширини смуги та коефіцієнта загасання. Побудувати графіки зміни метрик у часі, проаналізувати результати та сформулювати рекомендації з оптимізації Wi-Fi-мереж.

6. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація - слайдів, 2 таблиці, 17 рисунків

7. Дата видачі завдання: 01 лютого 2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Узгодження організаційних питань з науковим керівником	01.02.25-08.02.25	Виконано
2	Узгодження теми роботи та початок роботи над першим розділом	19.02.25-23.02.25	Виконано
3	Робота над першим, другим та третім розділами	02.03.25-21.03.25	Виконано
4	Робота над четвертим розділом	31.03.25-18.04.25	Виконано
5	Розробка рекомендацій по вдосконаленню мережі	21.04.25 - 25.04.25	Виконано
6	Підготовка п'ятого розділу	27.04.25 - 30.04.25	Виконано
7	Оформлення дипломної роботи	01.05.25 - 20.05.25	Виконано
8	Підготовка презентації до захисту	26.05.25 - 30.05.25	Виконано

Здобувачка вищої освіти _____ Катерина ЛУКАШ

Науковий керівник роботи _____ Андрій АСТРАХАНЦЕВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 60 сторінок, 17 рисунка та 2 таблиці, а також використовує 13 літературних джерел.

Актуальність: Сучасні бездротові технології, зокрема Wi-Fi, є невід'ємною частиною інформаційної інфраструктури у побуті, навчанні, бізнесі та промисловості. В умовах зростаючої кількості клієнтських пристроїв, високих вимог до швидкості передавання даних та мінімальних затримок виникає потреба в оптимізації конфігурацій мереж стандарту IEEE 802.11. Вивчення параметрів, що впливають на якість з'єднання, та їхнє обґрунтоване налаштування є важливою складовою підвищення ефективності бездротових мереж. Результати такого дослідження дозволяють сформулювати практичні рекомендації, які підвищують продуктивність мережі та забезпечують стабільність з'єднання.

Мета роботи: Підвищення ефективності мережі Wi-Fi за рахунок врахування найкращих значень ключових параметрів бездротових мереж стандарту IEEE 802.11. Таких як вплив швидкості передавання даних та зони покриття Wi-Fi. Для досягнення поставленої мети буде проведено моделювання в середовищі NetSim, аналіз результатів симуляції та побудова відповідних графічних залежностей. За підсумками дослідження планується визначити оптимальні значення параметрів, що забезпечують підвищення ефективності роботи бездротової мережі та стабільності з'єднання.

Об'єктом дослідження є процес функціонування бездротових Wi-Fi мереж стандарту IEEE 802.11 у контексті забезпечення якісного з'єднання.

Предметом дослідження є вплив параметрів конфігурації мережі (ширини смуги пропускання, потужності передавача, коефіцієнта загасання сигналу) на ключові показники якості з'єднання (затримку, джітер, втрати пакетів, пропускну здатність) та розробка практичних

рекомендацій щодо оптимізації Wi-Fi мереж на основі результатів моделювання.

Ключові слова: Wi-Fi, IEEE 802.11, БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ, МОДЕЛЮВАННЯ, ЯКІСТЬ З'ЄДНАННЯ, NETSIM, ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ.

ABSTRACT

The thesis consists of 60 pages, 17 figures and 2 tables, and uses 13 literature sources.

Relevance: Modern wireless technologies, in particular Wi-Fi, are an integral part of the information infrastructure in everyday life, education, business, and industry. Given the growing number of client devices, high requirements for data transfer speed and minimal delays, there is a need to optimize IEEE 802.11 network configurations. Studying the parameters that affect the quality of the connection and their reasonable adjustment is an important component of improving the efficiency of wireless networks. The results of this study allow us to formulate practical recommendations that improve network performance and ensure connection stability.

Purpose of the study: To improve the efficiency of a Wi-Fi network by taking into account the best values of key parameters of IEEE 802.11 wireless networks, such as the impact of data rate and Wi-Fi coverage area. To achieve this goal, we will conduct a simulation in the NetSim environment, analyze the simulation results and build the corresponding graphical dependencies. Based on the results of the study, it is planned to determine the optimal values of the parameters that ensure an increase in the efficiency of the wireless network and the stability of the connection.

The object of research is the process of functioning of wireless Wi-Fi networks of the IEEE 802.11 standard in the context of ensuring a quality connection.

The subject of the study is the influence of network configuration parameters (bandwidth, transmitter power, signal attenuation coefficient) on key indicators of connection quality (delay, jitter, packet loss, throughput) and the development of practical recommendations for optimizing Wi-Fi networks based on modeling results.

Keywords: Wi-Fi, IEEE 802.11, WIRELESS NETWORKS, MODELING, CONNECTION QUALITY, NETSIM, PARAMETER OPTIMIZATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1	14
ОГЛЯД БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11	14
1.2. Стандарт 802.11 та його еволюція.....	15
1.3. Основні параметри, що впливають на якість Wi-Fi	17
1.3.2 Потужність передавача (Transmitter Power).....	18
1.3.3 Коефіцієнт загасання сигналу (Pathloss Exponent)	19
1.4 Сфери застосування Wi-Fi	19
1.5 Висновки.....	20
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ WI-FI МЕРЕЖ	22
2.1 Теоретичні основи пропускнуої здатності бездротових каналів.....	22
2.2. Моделі згасання сигналу	23
2.2.1 Модель втрат у вільному просторі	24
2.2.2 Логарифмічна модель відстані (Log-Distance Path Loss.....	24
2.3 Практичне значення моделей	25
2.4 Вплив потужності передавача на зону покриття.....	26
2.4 Взаємозв'язок параметрів мережі та показників QoS	28
2.5 Висновки.....	30
РОЗДІЛ 3 ОПИС СЕРЕДОВИЩА МОДЕЛЮВАННЯ NetSim.....	32
3.1 Призначення та можливості середовища NetSim.....	32
3.2 Структура інтерфейсу NetSim та робоче середовище.....	32
3.3 Реалізація моделей і сценаріїв у NetSim	34
3.3.1 Вплив потужності передавача (Transmitter Power).....	35

3.3.2 Вплив ширини смуги пропускання (Bandwidth).....	36
3.3.3 Вплив коефіцієнта згасання сигналу (Pathloss Exponent)	37
3.4. Вхідні параметри та умови симуляції	39
3.5 Висновки.....	41
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ Wi-Fi МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ З'ЄДНАННЯ	42
4.1. Моделювання впливу ширини смуги пропускання на параметри якості з'єднання	42
4.2. Моделювання впливу потужності передавача на параметри якості з'єднання	46
4.3 Моделювання впливу коефіцієнта загасання сигналу на параметри якості з'єднання	49
4.4 Висновки.....	52
РОЗДІЛ 5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ WI-FI МЕРЕЖ	53
5.1. Порівняння ефективності параметрів конфігурації	53
5.2 Практичні рекомендації щодо оптимізації Wi-Fi-мереж	54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

Wi-Fi – Бездротовий зв'язок високої якості

IEEE 802.11 – Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.11 – Стандарт бездротових локальних мереж

QoS – Quality of Service – Якість обслуговування (параметри якості з'єднання)

CBR – Constant Bit Rate – Постійна швидкість передачі

VBR – Variable Bit Rate – Змінна швидкість передачі

TCP – Transmission Control Protocol – Протокол керування передачею

UDP – User Datagram Protocol – Протокол користувацьких дейтаграм

AP – Access Point – Точка доступу

STA – Station – Клієнтський пристрій у Wi-Fi мережі

Transmit Power – Потужність передавача

Rx – Receive – Прийом (зокрема потужність прийнятого сигналу)

Pathloss Exponent — Коефіцієнт загасання сигналу

Bandwidth — Ширина смуги пропускання

Latency — Затримка

Jitter — Коливання затримки

Packet Loss — Втрати пакетів

Throughput — Пропускна здатність

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Ортогональне частотне мультиплексування

MIMO – Multiple Input, Multiple Output – Багатоканальна (багатоантенна) система

GHz / MHz – Gigahertz / Megahertz – Гігагерц / Мегагерц (одиниці частоти)

Mbps – Megabits per second – Мегабіт за секунду (швидкість передачі)

SNR – Signal-to-Noise Ratio – Співвідношення сигнал/шум

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасному світі, де бездротові технології відіграють ключову роль у повсякденному житті, бізнесі та промисловості, якісне та стабільне покриття Wi-Fi [6] стає критично важливим. Безпроводові мережі на базі стандарту IEEE 802.11 використовуються повсюдно - від «розумних» будинків до офісів, промислових підприємств і громадських місць. Зростає потреба в оптимізації таких мереж для забезпечення стабільного зв'язку в умовах великої кількості пристроїв, високих вимог до пропускної здатності та мінімальних затримок.

Зі стрімким розвитком Інтернету речей (IoT), хмарних технологій, систем відеоспостереження, віддаленої роботи та онлайн-освіти зростають вимоги до швидкості, стабільності та надійності Wi-Fi з'єднань. Це питання особливо актуальне в середовищах з великою кількістю пристроїв, високим навантаженням на мережу або в складних умовах поширення сигналу (наприклад, багатоповерхові будівлі, бетонні конструкції, перешкоди тощо).

На ефективність роботи Wi-Fi мереж впливають технічні параметри, в тому числі такі ключові, як смуга пропускання, потужність передавача і загасання сигналу. Неправильне налаштування цих параметрів може призвести до зниження якості з'єднання, появи «мертвих зон», втрати пакетів і збільшення затримок, що є критичним у багатьох сферах - від звичайного інтернет-серфінгу до управління інтелектуальними системами в режимі реального часу.

Водночас, незважаючи на широке використання технології IEEE 802.11, питання оптимізації конфігурації мережі для конкретних умов залишається відкритим. На практиці це вимагає експериментального дослідження параметрів з використанням засобів моделювання та аналізу,

що дозволяє заздалегідь оцінити ефективність мережі та прийняти обґрунтовані рішення щодо її конфігурації.

Таким чином, дослідження впливу основних характеристик бездротових мереж стандарту IEEE 802.11 є надзвичайно актуальним з огляду на необхідність підвищення продуктивності та стабільності Wi-Fi з'єднань в різних умовах експлуатації, а результати такої роботи можуть бути практично застосовані при проектуванні нових та модернізації існуючих систем бездротового зв'язку.

Об'єктом дослідження є процес функціонування бездротових Wi-Fi мереж стандарту IEEE 802.11 у контексті забезпечення якісного з'єднання.

Предметом дослідження є вплив параметрів конфігурації мережі (ширини смуги пропускання, потужності передавача, коефіцієнта загасання сигналу) на ключові показники якості з'єднання (затримку, джітер, втрати пакетів, пропускну здатність) та розробка практичних рекомендацій щодо оптимізації Wi-Fi мереж на основі результатів моделювання.

Метою роботи є підвищення ефективності мережі Wi-Fi за рахунок врахування найкращих значень ключових параметрів бездротових мереж стандарту IEEE 802.11. Таких як вплив швидкості передавання даних та зони покриття Wi-Fi. Для досягнення поставленої мети буде проведено моделювання в середовищі NetSim, аналіз результатів симуляції та побудова відповідних графічних залежностей. За підсумками дослідження планується визначити оптимальні значення параметрів, що забезпечують підвищення ефективності роботи бездротової мережі та стабільності з'єднання.

Для досягнення мети дослідження було поставлено такі основні задачі:

- 1) Проаналізувати стандарт IEEE 802.11.

Ознайомитись з технічними характеристиками, версіями (a/b/g/n/ac/ax) та особливостями бездротових мереж Wi-Fi, визначити параметри, які найбільше впливають на якість з'єднання.

2) Вибрати ключові параметри для аналізу.

Обґрунтувати доцільність дослідження таких параметрів, як смуга пропускання, потужність передавача та загасання сигналу, з огляду на їх практичний вплив на продуктивність мережі.

3) Створити модель бездротової мережі Wi-Fi в NetSim.

Розробити кілька топологічних схем з різними параметрами конфігурації для проведення порівняльного дослідження.

4) Виконати серію симуляцій з різними параметрами.

Провести експериментальне моделювання в NetSim, змінюючи один або кілька параметрів мережі, включаючи потужність передавача, відстань між точками доступу, пропускну здатність і середовище поширення сигналу.

5) Проаналізувати результати моделювання.

Зібрати статистичні дані, побудувати графіки залежностей та оцінити вплив кожного параметра на продуктивність мережі - швидкість, затримку, покриття та стабільність з'єднання.

6) Розробити рекомендації щодо оптимізації Wi-Fi мереж.

На основі аналізу отриманих результатів запропонувати практичні рекомендації щодо налаштування параметрів Wi-Fi, вибору обладнання та розміщення точок доступу для різних типів середовищ - житлових, офісних, промислових та громадських.

Об'єктом дослідження є безпроводові Wi-Fi-мережі стандарту 802.11.

Предметом дослідження є характеристики бездротових мереж Wi-Fi стандарту 802.11, зокрема, ті технічні параметри, які визначають їх продуктивність, якість з'єднання та ефективність роботи в різних умовах навколишнього середовища

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

1.1. Загальні відомості про бездротові мережі

Бездротові мережі відіграють ключову роль у сучасному цифровому світі, оскільки вони дозволяють передавати дані без необхідності фізичного з'єднання між пристроями. Вони засновані на використанні радіохвиль для встановлення з'єднання між кінцевими точками, що забезпечує мобільність, гнучкість і зручний доступ до інформаційних ресурсів. Найпоширенішим типом бездротових мереж є локальні бездротові мережі [6] (WLAN - Wireless Local Area Network), які побудовані за стандартом IEEE 802.11, більш відомим як Wi-Fi.

Суть мережі Wi-Fi полягає в тому, що дані передаються за допомогою електромагнітних хвиль на певних частотах, зазвичай 2,4 ГГц і 5 ГГц. Між точкою доступу та клієнтськими пристроями - смартфонами, ноутбуками, планшетами, датчиками тощо - встановлюється з'єднання. - встановлюється з'єднання. Всі пристрої можна вільно переміщати в межах зони покриття без втрати з'єднання. Це забезпечує високий ступінь гнучкості при використанні мережі як вдома, так і в компанії.

Бездротові мережі стандартизовані Міжнародним інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE). Перший стандарт IEEE 802.11 був прийнятий в 1997 році і згодом зазнав численних удосконалень і поліпшень, таких як 802.11a/b/g/n/ac/ax, кожен з яких пропонував нові можливості: більш високі швидкості, більш широкі смуги пропускання, поліпшене кодування сигналу, зменшення перешкод і поліпшену багатокористувацьку підтримку.

Однак робота таких мереж пов'язана з низкою технічних проблем, таких як загасання сигналу, перешкоди, перевантаження повітряного трафіку і нестабільність з'єднання в умовах великої кількості користувачів. Тому для побудови ефективної мережі Wi-Fi необхідно враховувати вплив ключових фізичних і логічних параметрів, таких як смуга пропускання, потужність передачі, топологія точок доступу, тип середовища тощо.

Зі стрімким розвитком Інтернету речей, «розумних» будівель, мобільної медицини, автономного транспорту та дистанційного навчання важливість бездротових мереж зростає. Як наслідок, зростає потреба в їх точному проектуванні та оптимізації, що робить дослідження їх характеристик надзвичайно важливим і практично значущим.

1.2. Стандарт 802.11 та його еволюція.

Стандарт IEEE 802.11 [1] - це технічна специфікація для бездротових локальних мереж (WLAN), розроблена Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE). Цей стандарт визначає методи фізичного та канального рівнів моделі OSI, які забезпечують бездротову передачу даних в локальних мережах. Завдяки своїй гнучкості, масштабованості та відносно простій інфраструктурі, Wi-Fi на базі стандарту 802.11 став стандартом де-факто в бездротовому зв'язку для приватного, корпоративного та громадського використання.

Перша версія стандарту IEEE 802.11 була затверджена в 1997 році. Вона підтримувала швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с і працювала в діапазоні 2,4 ГГц. Згодом було розроблено низку розширень для покращення швидкості, стабільності, ефективності використання спектру, методів модуляції, механізмів безпеки та багатокористувацьких можливостей.

Короткий огляд найважливіших змін по стандарту наведено в табл. 1.1 нижче:

Таблиця 1.1 - Основні характеристики модифікацій стандарту IEEE 802.11

Модифікація	Частотний діапазон	Максимальна швидкість	Рік	Особливості
802.11	2.4 ГГц	До 2 Мбіт/с	1997	Базовий стандарт
802.11b	2.4 ГГц	До 11 Мбіт/с	1999	Використання DSSS, перша масова реалізація
802.11a	5 ГГц	До 54 Мбіт/с	1999	OFDM, вища швидкість, менше перешкод
802.11g	2.4 ГГц	До 54 Мбіт/с	2003	Зворотна сумісність з 802.11b
802.11n	2.4 / 5 ГГц	До 600 Мбіт/с	2009	MIMO, збільшення дальності та швидкості
802.11ac	5 ГГц	До 1300 Мбіт/с і більше	2014	MU-MIMO, ширина смуги до 160 МГц
802.11ax (Wi-Fi 6)	2.4 / 5 / 6 ГГц	До 9.6 Гбіт/с	2019	OFDMA, Target Wake Time, краща робота при високому навантаженні

Кожна нова модифікація стандарту має на меті покращити один або декілька важливих аспектів: швидкість передачі, стабільність сигналу, кількість підключених пристроїв або енергоефективність. Наприклад,

802.11n впроваджує технологію MIMO для одночасної передачі декількох потоків даних, а 802.11ac і 802.11ax (Wi-Fi 6) використовують технології MU-MIMO і OFDMA для оптимізації продуктивності мережі при високому навантаженні.

Однією з переваг стандарту є його зворотна сумісність: пристрої, що підтримують новіші версії, можуть працювати з попередніми версіями, забезпечуючи поступовий перехід на нові технології без необхідності повної заміни пристроїв.

Таким чином, розробка стандарту IEEE 802.11 спрямована на підвищення продуктивності бездротових мереж, дозволяючи їм краще відповідати сучасним вимогам до швидкості, надійності і масштабованості Wi-Fi зв'язку.

1.3. Основні параметри, що впливають на якість Wi-Fi

Ефективність бездротових мереж значною мірою залежить від технічних параметрів, які визначають продуктивність передачі даних, радіус дії, стабільність з'єднання і стійкість до зовнішніх перешкод. При проектуванні та оптимізації мереж Wi-Fi вирішальне значення мають наступні три параметри: пропускна здатність, потужність передачі і загасання сигналу. Аналіз цих параметрів дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо конфігурації пристроїв і топології мережі.

1.3.1 Ширина смуги пропускання (Bandwidth)

Цей параметр визначає розмір частотного спектра, який використовується для передачі сигналу. Чим більша смуга пропускання, тим більше даних можна передати за одиницю часу. У стандарті IEEE 802.11 доступні такі значення: 20, 40, 80 і 160 МГц (залежно від версії).

Наприклад, стандарт 802.11n в основному використовує 20 і 40 МГц, тоді як 802.11ac і 802.11ax підтримують більш високі значення.

Збільшуючи смугу пропускання, можна досягти більшої швидкості передачі, але при цьому зростає ймовірність інтерференції з сусідніми каналами, зменшується дальність стабільного прийому сигналу і підвищуються вимоги до якості бездротового обладнання.

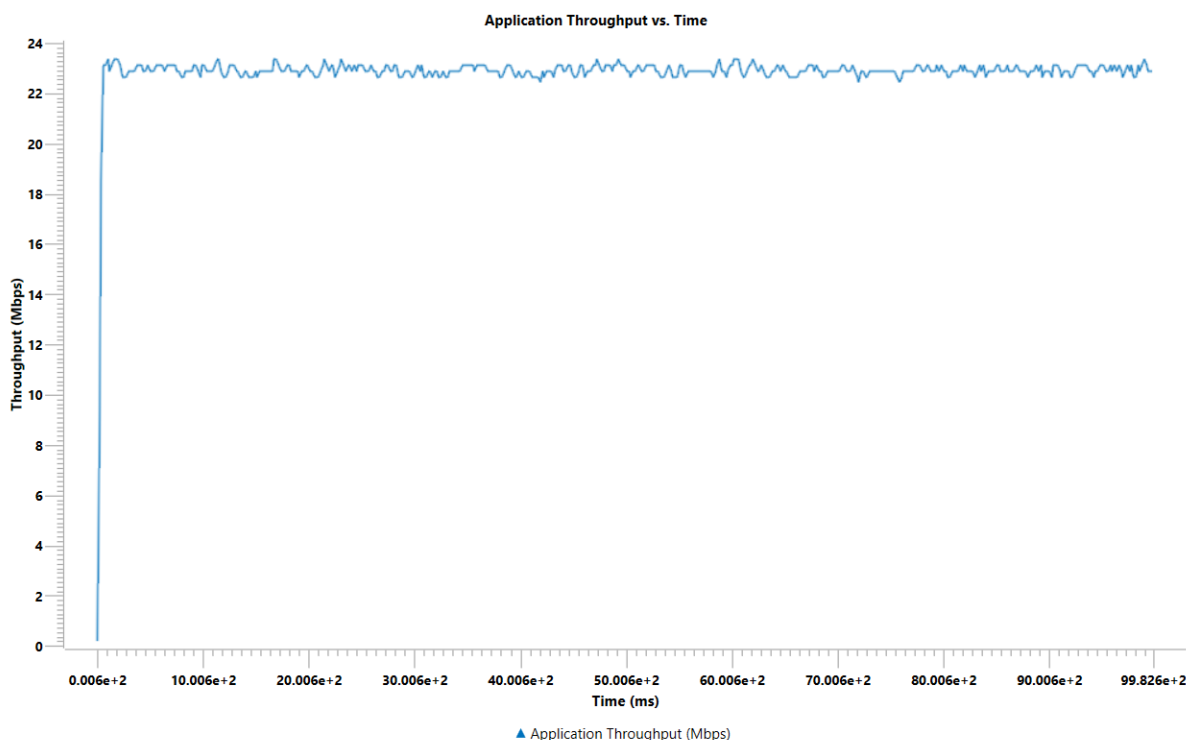


Рис. 1.1 - Динаміка зміни пропускної здатності (Throughput) у часі при фіксованій ширині смуги пропускання

1.3.2 Потужність передавача (Transmitter Power)

Потужність передачі визначає силу сигналу, що випромінюється антеною точки доступу. Значення в діапазоні 10-30 дБм поширені в мережах Wi-Fi. Більша потужність забезпечує більший радіус дії і краще проникнення через перешкоди (стіни, меблі тощо), але значно збільшує енергоспоживання і ризик виникнення перешкод для сусідніх мереж, а

надто велика потужність може призвести до нестабільності в багатоточкових топологіях.

При виборі потужності слід враховувати тип приміщення, щільність розміщення пристроїв і конфігурацію мережі.

1.3.3 Коефіцієнт загасання сигналу (Pathloss Exponent)

Загасання сигналу описує, наскільки швидко зменшується його потужність під час поширення в просторі. У вільному просторі коефіцієнт затухання (n) становить близько 2,0, але в реальних умовах – у приміщенні, з перегородками, металевими конструкціями – він може досягати 3,0-4,5.

Загасання залежить від навколишнього середовища:

$n = 2,0$ – відкритий простір;

$n = 3,0$ – типовий офісний простір;

$n \geq 4,0$ – бетонні стіни, багатоповерхові будівлі.

Цей параметр має вирішальний вплив на планування зони покриття: враховуйте, скільки точок доступу потрібно для забезпечення високоякісного зв'язку по всій території.

1.4 Сфери застосування Wi-Fi

Технологія Wi-Fi, що базується на стандарті IEEE 802.11, стала невід'ємною частиною сучасного цифрового середовища [7]. Її універсальність, простота впровадження та відносно низька вартість зробили його домінуючим рішенням, що забезпечує бездротовий доступ до Інтернету в багатьох сферах людської діяльності. Оптимальна конфігурація Wi-Fi в кожній із цих зон має вирішальне значення для забезпечення високоякісного з'єднання.

Житлові приміщення використовують Wi-Fi для підключення побутової техніки, систем відеоспостереження, охорони, клімат-контролю в кімнаті, розумного освітлення та мультимедійних пристроїв. Надійне покриття без мертвих зон має вирішальне значення для стабільної роботи систем Інтернету речей та голосових помічників.

В офісних та корпоративних мережах Wi-Fi забезпечує доступ до внутрішніх ресурсів компанії, хмарних сервісів, корпоративних комунікаційних систем та відеоконференцій. У таких умовах важливо досягти балансу між високою пропускнуою здатністю, стабільністю з'єднання та збалансованим навантаженням на точки доступу.

Публічні Wi-Fi-мережі зазвичай існують в **громадських місцях** та дозволяють великій кількості користувачів, що використовують різні пристрої, отримувати доступ до Інтернету. У таких місцях слід приділяти особливу увагу стабільності навантаження, швидкості повторного підключення та безпеці мережі.

Транспортні системи наразі є доволі вживаним місцем користування Інтернетом і Wi-Fi зокрема. Це забезпечує пасажирів завжди, в першу чергу, залишатись на зв'язку в дорозі. А також дозволяє коректно користуватися навігаційними та охоронними системами. У цьому випадку важливою є здатність системи працювати в динамічному середовищі та швидко адаптуватися до змінних умов.

1.5 Висновки

1. У першій частині розглядаються основні принципи роботи бездротових мереж IEEE 802.11, їх еволюція та ключові параметри, що впливають на якість з'єднання. Представлено історію розвитку стандарту, його найважливіші модифікації та можливості сучасних технологій Wi-Fi.

2. Особливу увагу було приділено аналізу впливу пропускної здатності, потужності передачі та коефіцієнта ослаблення сигналу на продуктивність мережі. Ці параметри мають вирішальне значення для забезпечення стабільної роботи бездротових систем у різних умовах експлуатації. Крім того, були представлені найважливіші сфери застосування WLAN – від житлових районів до промисловості, транспорту та громадських приміщень.

3. Зроблені теоретичні узагальнення складають основу для подальшого моделювання в середовищі NetSim, що дозволяє кількісно оцінити вплив технічних параметрів на пропускну здатність та інші властивості мереж Wi-Fi.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ WI-FI МЕРЕЖ

2.1 Теоретичні основи пропускної здатності бездротових каналів

Пропускна здатність - один з найважливіших показників продуктивності бездротової мережі [8]. Він визначає обсяг даних, який може бути переданий за одиницю часу по каналу зв'язку. У мережах IEEE 802.11 реальна пропускна здатність часто значно відхиляється від номінальної, зазначеної в технічній документації, через вплив багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів.

На відміну від дротових мереж, передача даних в бездротовому середовищі ускладнюється мінливими умовами поширення сигналу, перешкодами, коливаннями потужності сигналу і одночасним використанням радіочастот декількома пристроями. Всі ці фактори знижують ефективність використання частотного спектру і зменшують фактичну пропускну здатність.

Найважливішими технічними параметрами, що впливають на швидкість передачі даних у мережах Wi-Fi, є смуга пропускання, тип модуляції, кількість просторових потоків у технології MIMO і співвідношення сигнал/шум (SNR). В останніх версіях стандарту, таких як 802.11n, 802.11ac і 802.11ax, для збільшення швидкості активно використовуються багатопотокові технології, широкі канали (до 160 МГц) і високоефективні методи модуляції (наприклад, 256-QAM і 1024-QAM).

Теоретично, пропускна здатність бездротового каналу за ідеальних умов визначається теоремою Шеннона:

$$C = B \times \log_2(1 + SNR) \quad (2.1)$$

де C - максимальна швидкість передачі (біт/с), B - смуга пропускання (Гц) SNR_i - відношення сигнал/шум. Хоча ця формула не враховує практичних втрат, вона показує, що для підвищення продуктивності каналу можна або розширити смугу пропускання, або поліпшити якість сигналу.

У мережах Wi-Fi значну частину ресурсів каналу займає службовий трафік: сигнали підтвердження, контрольні кадри, пакети синхронізації передачі та інші. Крім того, зі збільшенням навантаження на мережу зростає ймовірність виникнення колізій, що призводить до повторних передач і зниження пропускну здатності. Тому фактична пропускну здатність може становити лише 50-70% від теоретичної.

У наступних розділах ми будемо використовувати симуляції NetSim, щоб експериментально дослідити, як фактична пропускну здатність змінюється залежно від обраної смуги пропускання, потужності передачі та середовища поширення сигналу. Це дозволить нам перевірити вплив теоретичних параметрів на реальну продуктивність мережі на практиці.

2.2. Моделі згасання сигналу

Одним з найважливіших факторів, що впливають на якість бездротового з'єднання, є загасання сигналу, тобто зменшення потужності радіохвиль при їх поширенні в просторі. Цей процес особливо важливий при розробці мереж Wi-Fi, оскільки він визначає, на яку відстань можна передавати сигнал з достатньою силою, щоб його можна було прийняти. Ослаблення сигналу залежить від навколишнього середовища, наявності перешкод, частоти сигналу та інших фізичних факторів [13].

Існує кілька моделей для оцінки згасання сигналу. Вони використовуються для розрахунку зони покриття мережі та розміщення точок доступу відповідно до умов експлуатації.

2.2.1 Модель втрат у вільному просторі

Це найпростіша модель, яка передбачає поширення сигналу у відкритому просторі без перешкод. Вона дозволяє оцінити мінімально можливе загасання, коли між передавачем і приймачем немає фізичних об'єктів.

Ця модель добре працює у відкритих просторах – наприклад, на вулиці або у великих кімнатах без перешкод. Її часто використовують як базову модель для порівняння.

2.2.2 Логарифмічна модель відстані (Log-Distance Path Loss Model)

У більшості реальних сценаріїв сигнал поширюється в середовищі зі стінами, меблями, людьми та металевими конструкціями. У таких випадках загасання сигналу збільшується, і для опису цього явища використовується модель логарифмічного загасання.

Ця модель добре підходить для побудови симуляцій у середовищах типу NetSim, оскільки дозволяє змінювати параметр n і спостерігати, як це впливає на зону покриття.

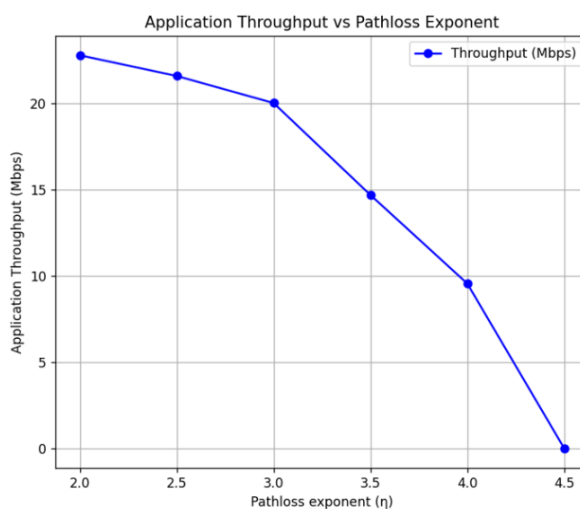


Рис. 2.1 Вплив коефіцієнта згасання сигналу n на пропускну здатність Wi-Fi мережі

На рисунку 2.1 показано залежність пропускної здатності мережі Wi-Fi від коефіцієнта ослаблення сигналу (показника ступеня втрат на шляху), створеного на основі моделювання в середовищі NetSim.

Як бачите, зі зростанням значення n від 2,0 до 4,5, пропускна здатність падає майже до нуля. Це підтверджує, що в складних середовищах з багатьма перешкодами ефективність мереж Wi-Fi знижується навіть за незмінних інших параметрів.

Існують також **інші вдосконалені моделі**, такі як модель Hata, Okumura-Hata, ITU-R, які враховують тип будівлі, висоту антени та частотний діапазон і використовуються переважно в мобільних мережах. Для Wi-Fi, який в основному працює на відстані до 100 метрів, ці моделі не використовуються, але можуть бути згадані в загальному контексті.

2.3 Практичне значення моделей

Розуміння моделей згасання сигналу має важливе значення для проектування та оптимізації бездротових мереж. За допомогою цих моделей можна надійно передбачити поведінку радіосигналу в конкретному фізичному середовищі, а отже, правильно спланувати кількість і розміщення точок доступу.

Це допомагає уникнути низки поширених проблем, таких як мертві зони (зони без покриття), надмірне перекриття зон сигналу (що спричиняє перешкоди) або перевантаження окремих вузлів мережі. Результатом є рівномірне покриття, економне використання обладнання та висока якість послуг для кінцевих користувачів.

У середовищі моделювання NetSim рівень загасання сигналу задається одним з ключових параметрів - коефіцієнтом загасання, який відповідає певному типу середовища: від відкритого простору до

багатоповерхових будівель або приміщень з великою кількістю перешкод. Варіюючи це значення, можна імітувати реальні умови роботи Wi-Fi мережі.

Практична користь таких моделей полягає в тому, що вони дозволяють заздалегідь виявити потенційні проблеми з якістю з'єднання, такі як підвищена затримка, нестабільність сигналу або втрата пакетів. Це дає можливість оцінити ефективність різних конфігурацій ще на етапі проектування і уникнути помилок під час реалізації мережі.

Таким чином, використання моделей сигналу є необхідною умовою для побудови надійних, ефективних та адаптивних бездротових рішень.

2.4 Вплив потужності передавача на зону покриття

Потужність передавача - один з найважливіших параметрів бездротової мережі. Вона визначає рівень сигналу на вході приймача і, відповідно, максимальну відстань, на якій можливе стабільне з'єднання. У мережах Wi-Fi потужність передачі зазвичай вказується в децибелах на міліват (дБм) і становить від 10 до 30 дБм.

Зі збільшенням потужності сигнал може покривати більші відстані, краще проникати через перешкоди і забезпечувати кращу якість зв'язку в умовах поганого прийому. Однак цей параметр має свої межі. Занадто велика потужність може створювати перешкоди для інших бездротових мереж, перевантажувати приймачі, викликати зворотні колізії і впливати на загальну продуктивність мережі в багатоповерховому середовищі.

У реальних умовах зона покриття Wi-Fi мережі залежить не тільки від продуктивності передавача, але і від параметрів приймача, характеристик антени, середовища поширення сигналу і частоти. Наприклад, сигнал краще поширюється в діапазоні 2,4 ГГц, ніж в діапазоні 5 ГГц при однаковій потужності.

Загальна формула для оцінки сили сигналу на заданій відстані включає потужність передачі як змінну:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL(d), \quad (2.2)$$

Де: P_r – потужність прийнятого сигналу (dBm), P_t – потужність передавача (dBm), G_t, G_r – коефіцієнти підсилення антен передавача і приймача відповідно, $PL(d)$ – загасання сигналу на відстані d .

З цього рівняння випливає, що чим вища потужність передачі, тим вищий рівень сигналу на вході приймача. Це забезпечує стабільну роботу мережі навіть на великих відстанях та в складних умовах.

Завдяки моделюванню за допомогою NetSim можна експериментально перевірити вплив зміни потужності передачі на такі показники:

- Зона покриття мережі;
- Місткість;
- Стабільність з'єднання (втрата пакетів, джиттер).

Результати моделювання показують, що збільшення потужності з 10 до 20–25 дБм дозволяє значно збільшити дальність надійного прийому сигналу та покращити показники якості, особливо в середовищах зі збільшеним затушенням.

Однак, зверніть увагу, що перевищення рекомендованих рівнів потужності може призвести до порушення нормативних обмежень, а також до перевантаження каналу в багатокористувацьких сценаріях. Тому важливим завданням є вибір оптимального значення продуктивності з урахуванням конкретного середовища, кількості клієнтів та взаємодії між точками доступу.

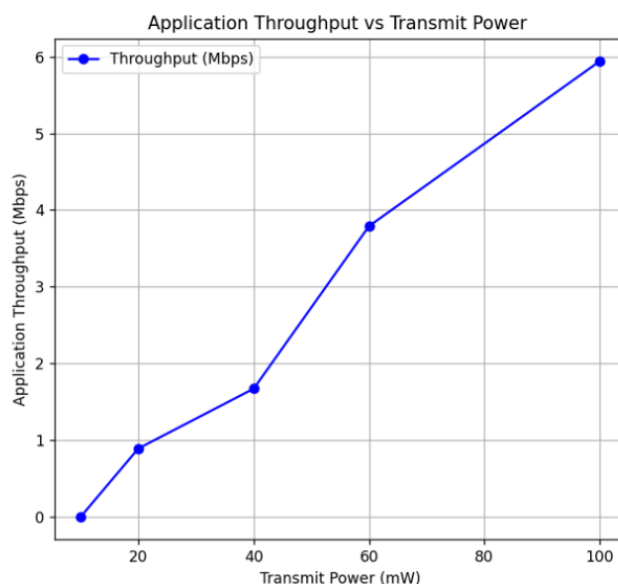


Рис. 2.2 – Залежність пропускної здатності Wi-Fi-мережі від потужності передавача

На рис. 2.2 показано моделювання, виконаного в середовищі NetSim, що показують залежність пропускної здатності мережі Wi-Fi від потужності передачі. Згідно з графіком, зі збільшенням потужності від 10 до 100 мВт пропускна здатність збільшується від нуля до майже 6 Мбіт/с. Це підтверджує, що збільшення потужності дозволяє забезпечити стабільніший прийом сигналу, що, у свою чергу, покращує умови зв'язку та ефективність передачі даних.

2.4 Взаємозв'язок параметрів мережі та показників QoS

Якість обслуговування (QoS) у комп'ютерних мережах — це сукупність характеристик, що визначають здатність мережі забезпечувати стабільну та ефективну передачу даних для різних типів трафіку. У контексті мереж Wi-Fi, QoS охоплює ключові показники, такі як пропускна здатність, затримка, втрата пакетів та джиттер.

У бездротовому середовищі ці показники суттєво залежать від фізичних та логічних параметрів мережі, включаючи пропускну здатність, потужність передачі, коефіцієнт ослаблення сигналу, а також вибраний стандарт Wi-Fi та транспортний протокол.

Як показано в попередніх розділах, збільшення пропускну здатності дозволяє підвищити швидкість передачі, але водночас підвищує вразливість до перешкод. Аналогічно, збільшення потужності передачі покращує дальність зв'язку, але може спричинити перешкоди в щільних мережах. Ослаблення сигналу безпосередньо впливає на рівень прийнятого сигналу та, зрештою, на якість з'єднання.

Окрім фізичних факторів, на якість обслуговування суттєво впливає тип переданих даних. UDP, який не використовує підтвердження доставки (ACK), забезпечує вищу пропускну здатність та меншу затримку, що особливо важливо для відео- та голосових дзвінків. Натомість TCP забезпечує контроль над доставкою, але створює більше накладних витрат, збільшуючи затримку та зменшуючи пропускну здатність.

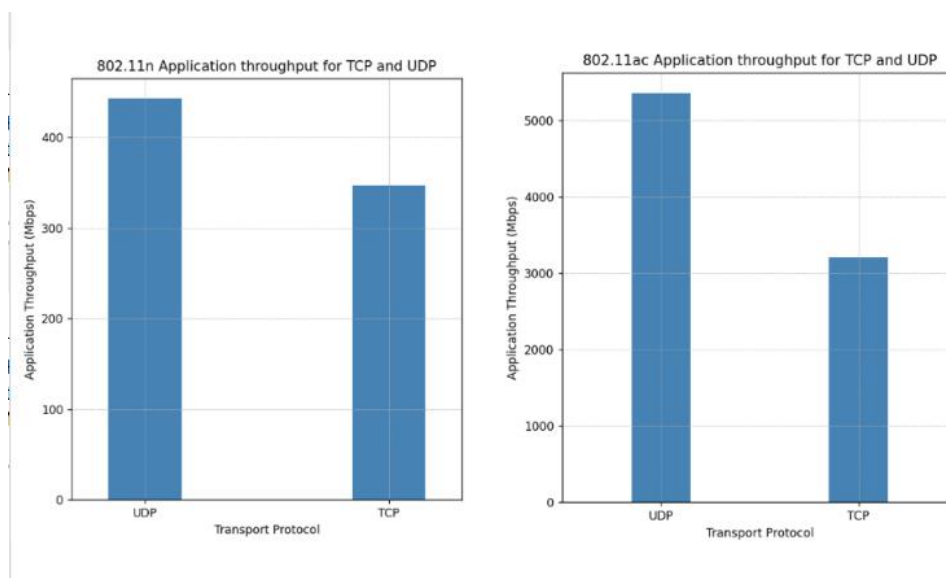


Рис 2.3 – Порівняння пропускну здатності для TCP і UDP у мережах 802.11 n та 802.11 ac

На рисунку 2.3 показано результати моделювання NetSim з використанням нового методу передачі протоколів TCP та UDP у двох різних стандартах: 802.11n та 802.11ac. Звичайно, UDP дозволяє використовувати TCP незалежно від стандарту та демонстраційного методу модуляції 802.11ac.

Тому, під час проектування бездротової мережі важливо не лише враховувати технічні параметри фізичного рівня, але й адаптувати мережу до специфіки передачі даних. Наприклад, у системах відеоспостереження рекомендується використовувати протокол UDP з мінімальною затримкою, а для обміну файлами або перегляду веб-сторінок – протокол TCP з перевіркою цілісності. Поєднуючи відповідні мережеві налаштування та розуміючи специфіку мережевого трафіку, можна досягти високого рівня QoS навіть у складних умовах експлуатації.

2.5 Висновки

У розділі 2 було проаналізовано:

- 1) Представлено теоретичні основи пропускної здатності бездротових каналів у мережах Wi-Fi.
- 2) Були проаналізовані моделі ослаблення сигналу: модель вільного простору та модель логарифмічної відстані.
- 3) Було виявлено, що зі збільшенням коефіцієнта згасання (показника ступеня втрат) пропускна здатність мережі значно зменшується.
- 4) Доведено, що збільшення потужності передачі покращує якість зв'язку та розширює дальність зв'язку, але вимагає ретельного налаштування.

5) Було виявлено, що тип транспортного протоколу (TCP або UDP) впливає на продуктивність мережі: UDP забезпечує вищу швидкість з меншою затримкою.

6) Новіші стандарти Wi-Fi (наприклад, 802.11ac) забезпечують вищу продуктивність завдяки вищій пропускній здатності та сучасним технологіям.

7) Отримані теоретичні результати складають основу для подальшого моделювання в середовищі NetSim.

РОЗДІЛ 3 ОПИС СЕРЕДОВИЩА МОДЕЛЮВАННЯ NetSim

3.1 Призначення та можливості середовища NetSim

NetSim [4] — це професійне програмне середовище для моделювання комп'ютерних мереж, розроблене компанією Tetcos. Програмний пакет підтримує моделювання мережевих протоколів на різних рівнях моделі OSI та дозволяє вивчати поведінку мережі зі зміною параметрів, трафіку та середовища.

NetSim широко використовується в освітніх та дослідницьких цілях для аналізу локальних мереж (LAN), бездротових мереж (WLAN), стільникових мереж (MANET), сенсорних мереж (WSN) та інших типів мереж. Однією з головних переваг NetSim є візуальна побудова топологій та можливість автоматичної генерації звітів, графіків та таблиць з результатами моделювання.

Під час цієї роботи NetSim використовується для:

- Створення моделей бездротових мереж Wi-Fi стандарту IEEE 802.11;
- Налаштування параметрів передачі: смуга пропускання, потужність передачі, коефіцієнт загасання;
- Варіації умов розташування точок доступу та клієнтів;
- Збору статистичних даних щодо пропускну здатності, затримки, втрат та ефективності протоколу.

3.2 Структура інтерфейсу NetSim та робоче середовище

Програмне середовище NetSim має зручний та функціональний інтерфейс, що дозволяє виконувати повний цикл моделювання мережі: від

створення топології до завантаження та аналізу результатів. Інтерфейс програми розділений на кілька логічних частин, які взаємодіють одна з одною в єдиному візуальному середовищі.

Центральним елементом є робоча область створення топології, де користувач створює структуру мережі, додаючи вузли, маршрутизатори, точки доступу, сервери, клієнтів, комутатори та інші компоненти до робочої області. Кожен елемент можна вільно розташовувати та комбінувати з іншими, а його параметри можна змінювати залежно від вимог експерименту. Завдяки підтримці технології Wi-Fi IEEE 802.11, можливо моделювати як прості, так і складні бездротові сценарії.

Ліворуч або праворуч (залежно від версії) є вікно властивостей, де можна налаштувати параметри вибраного пристрою або каналу. Для кожної точки доступу або клієнта можна вказати тип протоколу (TCP або UDP), обсяг трафіку, потужність передачі (TX power) та пропускну здатність (смугу пропускання), а також змінити модель середовища, вибравши коефіцієнт ослаблення сигналу (показник ступеня втрат сигналу). Завдяки гнучкій системі параметризації користувач може створювати точні та контрольовані умови для виконання моделювання.

Після створення мережі та запуску моделювання користувач отримує доступ до вікна результатів, яке містить детальну статистику для кожного вузла та каналу. NetSim автоматично генерує графіки, що показують зміни пропускну здатності, затримки, втрати пакетів тощо, а також дозволяє експортувати ці дані в табличному форматі для подальшого аналізу. Інтерфейс дозволяє створювати діаграми на основі вибраних індикаторів, що спрощує візуалізацію результатів.

Крім того, NetSim реалізував модуль, що містить попередньо налаштовані сценарії (приклади симуляцій), які можна налаштувати відповідно до ваших потреб. Доступні шаблони включають, наприклад, ті,

що моделюють залежність продуктивності від потужності передачі, відстані між вузлами, типу трафіку, стандарту WLAN тощо.

NetSim забезпечує повний цикл моделювання бездротової мережі — від побудови топології до отримання результатів — у візуальному інтерфейсі користувача, який ідеально підходить для досліджень, навчання та технічного аналізу характеристик зв'язку Wi-Fi.

3.3 Реалізація моделей і сценаріїв у NetSim

Для проведення практичної частини дослідження в програмному середовищі NetSim було створено серію сценаріїв, що дозволяють дослідити вплив окремих параметрів бездротових мереж IEEE 802.11ac на основні показники якості обслуговування (QoS). Сценарії розроблені таким чином, щоб можна було змінювати лише один параметр, а всі інші залишати незмінними, що дозволяє об'єктивно порівнювати результати.

Усі симуляції базувалися на одній топології, що складається з сервера, маршрутизатора, точки доступу та клієнтської станції (STA), підключеної до точки доступу через бездротовий інтерфейс. Передача даних здійснювалася за протоколом TCP, а як стандарт бездротового зв'язку використовувався IEEE 802.11ac. Тип трафіку – CBR (постійна бітрейт), що дозволяє чітко відстежувати зміни продуктивності за однакових умов навантаження.

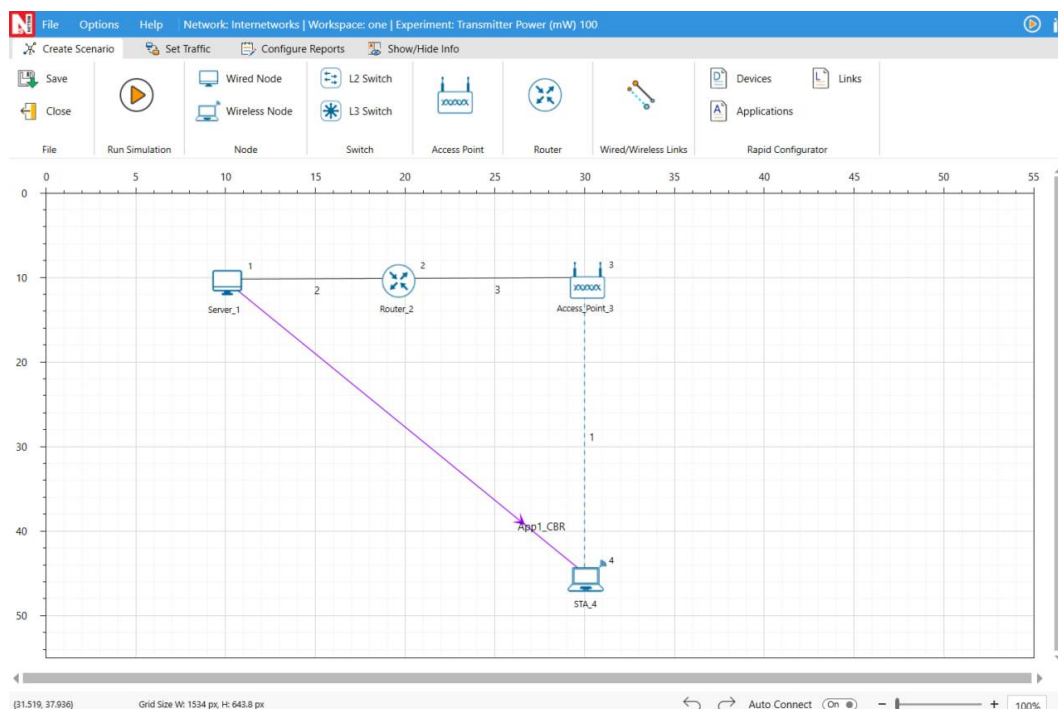


Рис 3.1 - Єдина топологія, що використовувалась у всіх серіях симуляцій з варіацією параметрів

У дослідженні було проведено три незалежні серії експериментів, кожна з яких була зосереджена на одному з ключових параметрів мережі Wi-Fi:

3.3.1 Вплив потужності передавача (Transmitter Power)

Параметр «потужність передавача» коливався від 10 до 100 мВт. Дослідження мало на меті з'ясувати, як збільшення потужності впливає на якість зв'язку, зокрема на швидкість передачі, стабільність сигналу, затримку та втрати.

Усі показники оцінювалися динамічно – за допомогою графіків, що залежать від часу, що дозволяло не лише відображати середні значення, але й виявляти можливі коливання результатів.

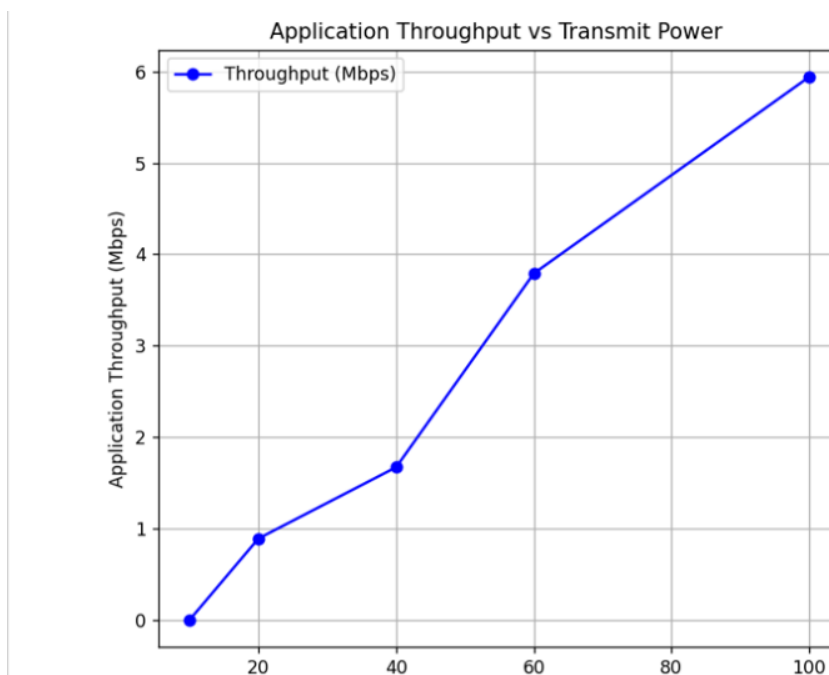


Рис. 3.2 - Залежність пропускної здатності від потужності передавача у мережі Wi-Fi

На рисунку 3.2 показано результати моделювання зміни смуги пропускання як функції рівня потужності передачі.

Як видно, зі збільшенням потужності передачі від 10 до 100 мВт пропускна здатність зростає майже лінійно та досягає 5,94 Мбіт/с. Це означає кращу якість з'єднання та менші втрати сигналу зі збільшеною потужністю передачі.

3.3.2 Вплив ширини смуги пропускання (Bandwidth)

Пропускна здатність варіювалася між 20, 40, 80 та 160 МГц. Було досліджено зміну показників QoS з різними значеннями цього параметра. Очікувано, що пропускна здатність зросте з розширенням каналу, але також можуть бути негативні наслідки у вигляді схильності до перешкод.

Використовуючи графіки функції часу, ми можемо оцінити не лише пік, але й стабільність кожної конфігурації.

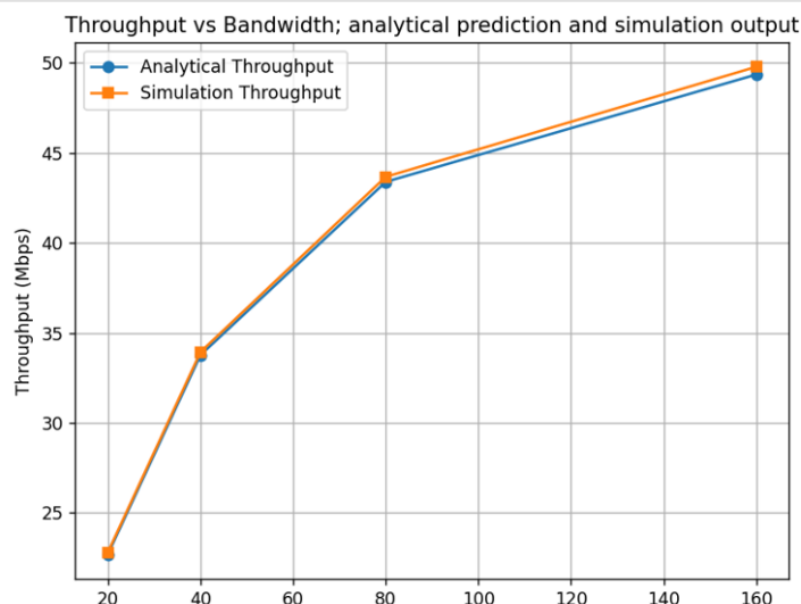


Рис. 3.3 - Залежність пропускної здатності від ширини смуги пропускання (Bandwidth)

На рисунку 3.3. показано графік, що порівнює теоретично очікувану та змодельовану пропускну здатність Wi-Fi як функцію пропускної здатності.

Видно, що зі збільшенням смуги пропускання від 20 до 160 МГц пропускна здатність зростає майже лінійно.

Дані моделювання практично узгоджуються з аналітичними розрахунками, що підтверджує коректність моделі та достовірність експерименту.

3.3.3 Вплив коефіцієнта згасання сигналу (Pathloss Exponent)

У цьому сценарії досліджувався вплив параметра, що описує ступінь ослаблення радіосигналу під час його поширення в середовищі. Змінюючи значення коефіцієнта затухання, можна умовно моделювати різні типи середовищ – від відкритого простору до густо забудованих територій з численними перешкодами.

Мета цього сценарію — оцінити, як ступінь ослаблення сигналу впливає на стабільність з'єднання, пропускну здатність, затримку та інші показники якості зв'язку.

На основі результатів було створено графіки, що ілюструють зміни найважливіших параметрів QoS з часом. Вони дозволяють виявити загальні тенденції погіршення продуктивності мережі зі збільшенням втрати сигналу в складніших умовах навколишнього середовища.

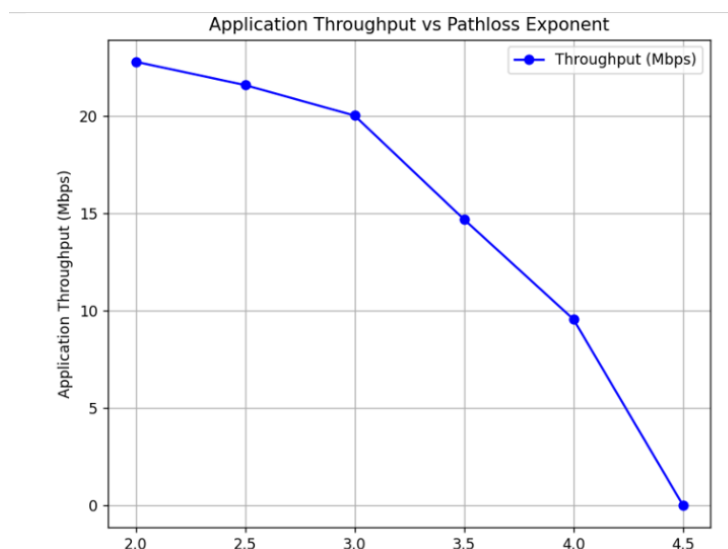


Рис. 3.4 – Вплив коефіцієнта згасання сигналу на пропускну здатність Wi-Fi-мережі

На рисунку 3.4. показано результати моделювання, в яких змінювався коефіцієнт ослаблення сигналу.

Графік показує, що зі збільшенням параметра n пропускну здатність мережі падає, що свідчить про погіршення умов передачі.

Цей зв'язок відображає типову ситуацію, що виникає під час переходу з відкритого простору до кімнати з численними перешкодами або укриттями.

Під час моделювання для кожного сценарію були зібрані результати, які відображали зміну продуктивності мережі після зміни окремих

параметрів конфігурації. Всі дані представлені у вигляді графіків і таблиць, що дозволяє чітко зрозуміти вплив таких факторів, як потужність передачі, пропускна здатність і коефіцієнт ослаблення сигналу. Отримані результати є репрезентативними та дозволяють зробити попередні висновки щодо загальних тенденцій у якості комунікації.

Графіки в цьому розділі показують типові закономірності: продуктивність зростає зі збільшенням потужності або пропускної здатності та зменшується зі збільшенням ослаблення сигналу. Ці дані показують, наскільки важливо правильно встановити параметри конфігурації під час налаштування бездротової мережі.

3.4. Вхідні параметри та умови симуляції

Для забезпечення достовірності та об'єктивності результатів моделювання, у кожному експерименті в середовищі NetSim змінювався лише один параметр, тоді як інші залишалися незмінними. Завдяки такому підходу можна точно визначити вплив кожного тестованого фактора на загальну якість з'єднання в бездротовій мережі IEEE 802.11ac.

Усі симуляції виконувалися на основі єдиної топології, що складається з сервера, маршрутизатора, точки доступу та клієнтської станції. Передача даних здійснювалася через TCP з постійною бітовою швидкістю (CBR). Всі експериментальні результати представлені у вигляді графіків та таблиць, що містять такі дані: пропускна здатність, середня затримка, тремтіння, втрата пакетів та загальна кількість втрачених кадрів.

У таблиці 3.1 наведено змінні параметри, їх перевірені значення та рамкові умови, які не змінювалися під час моделювання.

Таблиця 3.1 – Вхідні параметри для симуляцій у NetSim

№	Змінний параметр	Досліджувані значення	Фіксовані умови
1	Потужність передавача	10, 20, 40, 60, 100 мВт	Bandwidth = 20 МГц Pathloss = постійне
2	Ширина смуги пропускання	20, 40, 80, 160 МГц	Tx Power = 100 мВт Pathloss = постійне
3	Коефіцієнт загасання сигналу	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5	Tx Power = 100 мВт Bandwidth = 20 МГц

Усі симуляції виконувалися зі стабільним рухом, постійною топологією та однорідними початковими умовами, тому отримані результати можна вважати репрезентативними для цілей цього дослідження. Змінюючи лише один параметр у кожному експерименті, можна було чітко зрозуміти залежність найважливіших показників якості обслуговування від певного фактора. Це дає змогу робити обґрунтовані висновки та рекомендації щодо оптимізації конфігурації WLAN.

Кожен із протестованих параметрів – потужність передачі, пропускна здатність та коефіцієнт ослаблення сигналу – відіграє важливу роль у формуванні якості бездротового з'єднання. Їхній вплив може суттєво відрізнитися залежно від умов експлуатації, щільності забудови, наявності перешкод, типу обладнання та типу дорожнього руху. З цієї причини, моделювання систем за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, NetSim — це ефективний інструмент для попереднього аналізу та проектування бездротових мереж різного розміру.

Всі зібрані дані будуть використані в наступному розділі для створення графіків, аналізу поведінки мережі за різних умов та вибору найефективніших конфігурацій. Такий підхід дозволяє не лише виявляти загальні тенденції, але й приймати обґрунтовані технічні рішення під час впровадження або оптимізації систем Wi-Fi в реальних умовах.

3.5 Висновки

У цьому розділі детально описано середовище моделювання NetSim та реалізовані в ньому сценарії, які лягли в основу практичного дослідження. Було створено єдину тестову топологію, яка дозволила нам підтримувати базові умови постійними та зосередитися на впливі окремих параметрів на показники якості бездротового зв'язку.

Було проведено три незалежні серії моделювань, кожна з яких змінювала лише один параметр – потужність передачі, смугу пропускання або коефіцієнт ослаблення сигналу. Інші умови, включаючи тип трафіку, стандарт Wi-Fi та розташування вузла, залишалися незмінними, що забезпечувало точність та достовірність аналізу. Для кожного експерименту збиралася статистика щодо пропускну здатності, затримки, джиттера та втрати пакетів.

Отримані графіки, ілюструють зміни показників, підтверджують доцільність використання NetSim як інструменту для моделювання та оцінки якості мереж Wi-Fi. Ці результати забезпечують краще розуміння закономірностей впливу технічних параметрів на продуктивність мережі та забезпечують основу для комплексного аналізу в наступному розділі.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ Wi-Fi МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ З'ЄДНАННЯ

У цьому розділі представлено результати дослідження поведінки бездротової мережі IEEE 802.11ac після зміни ключових параметрів конфігурації. Для цього в середовищі NetSim було проведено серію симуляцій зі зміною таких метрик, як потужність передачі, пропускна здатність і коефіцієнт загасання сигналу [11].

Моделювання проводилося з фіксованою топологією і трафіком даних, тому ми змогли отримати чисті результати щодо впливу кожного параметра на якість з'єднання. Для кожного сценарію були зібрані дані про найважливіші метрики QoS - пропускну здатність, середню затримку, джиттер і втрату пакетів.

Всі результати представлені у вигляді графіків, що показують динаміку зміни параметрів у часі. Це дає можливість не тільки оцінити пікові або середні значення, але й відстежити стабільність роботи мережі під час моделювання. Графіки згруповані за окремими змінними параметрами з відповідним описом умов, за яких проводилося дослідження.

У наступних підрозділах результати моделювання представлені окремо для кожного з досліджуваних параметрів.

4.1. Моделювання впливу ширини смуги пропускання на параметри якості з'єднання

У цьому моделюванні я досліджувала, як зміна смуги пропускання впливає на продуктивність бездротової мережі Wi-Fi [9]. Було

змодельовано чотири сценарії зі смугами пропускання 20, 40, 80 і 160 МГц. Інші параметри конфігурації залишалися незмінними: Потужність передачі - 100 мВт, коефіцієнт загасання - постійний.

Для кожного варіанту були зібрані дані про пропускну здатність, затримку, джиттер і динаміку їх зміни в часі. Всі результати представлені у вигляді графіків, які дозволяють оцінити характер змін та узгодженість поведінки мережі в часі.

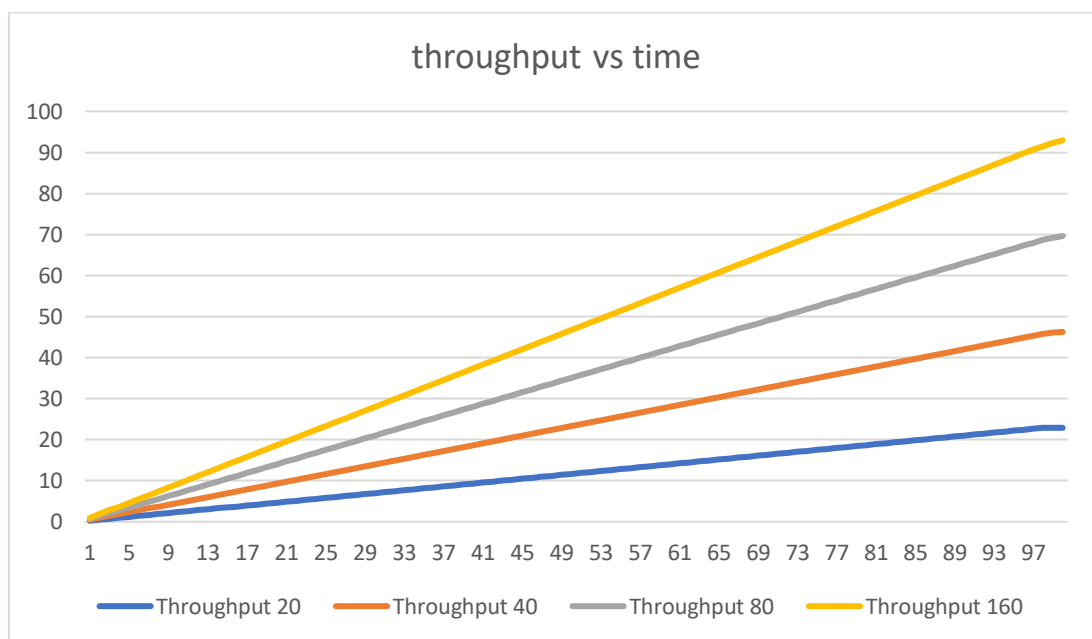


Рис. 4.1 – графік зміни пропускну здатності (Throughput) у часі при зміні ширини смуги пропускання

На рисунку 4.1 показано, як обсяг переданих даних зростає в залежності від часу для кожного значення пропускну здатності.

Смуга 20 МГц демонструє найнижчий темп зростання пропускну здатності, тоді як смуга 160 МГц досягає найвищої пропускну здатності.

Криві майже лінійні, що свідчить про стабільну передачу даних протягом всього моделювання. Відстань між кривими збільшується зі збільшенням смуги пропускання, що візуально підтверджує залежність пропускну здатності від смуги пропускання.

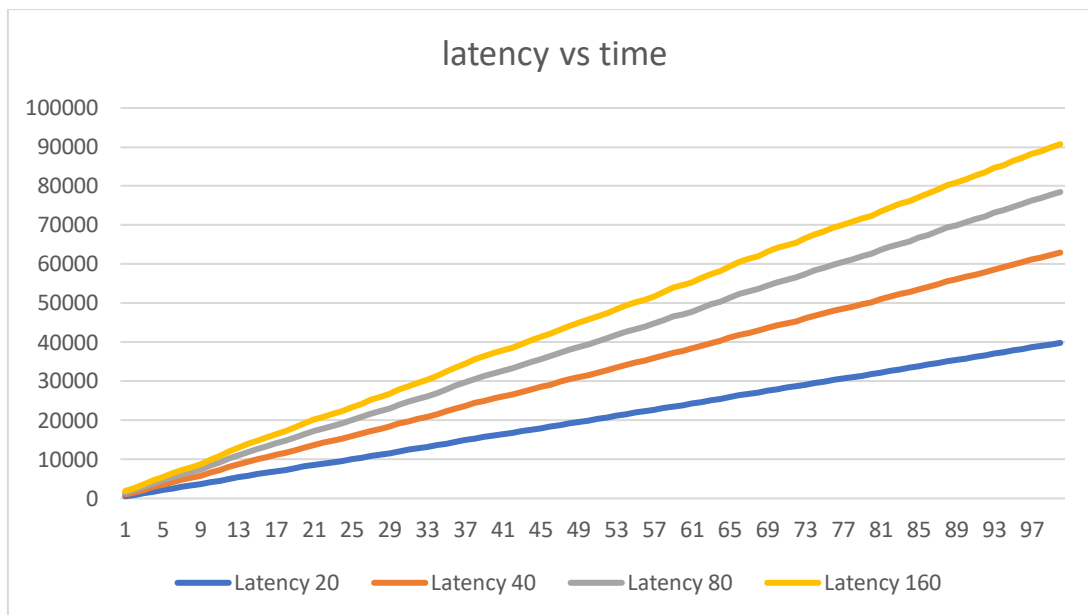


Рис. 4.2 - Графік зміни затримки (Latency) у часі при зміні ширини смуги пропускання

На рисунку 4.2 показано збільшення кумулятивної затримки пакетів для кожного варіанту смуги пропускання. Видно, що при використанні вузької смуги пропускання (20 МГц) затримка зростає набагато швидше порівняно з більш широкими каналами. Така поведінка пов'язана з обмеженою пропускнуою здатністю каналу, що призводить до накопичення пакетів у черзі, збільшуючи час передачі.

Чим менша пропускна здатність каналу, тим більша затримка спостерігається в системі. Це особливо важливо для чутливих до затримок додатків, таких як голосовий і відеозв'язок у реальному часі. На противагу цьому, при ширині 160 МГц спостерігається стійке і відносно повільне зростання затримки, що свідчить про достатню швидкість обробки вхідного трафіку і низьке навантаження на мережу при тих же умовах трафіку.

Можна зробити висновок, що між шириною смуги пропускання і затримкою існує чітка зворотна залежність: чим ширший канал, тим менша затримка передачі пакетів. Цей ефект є логічним і очікуваним в

контексті теорії мереж, а його підтвердження за допомогою симуляції NetSim лише підкреслює достовірність отриманих результатів.

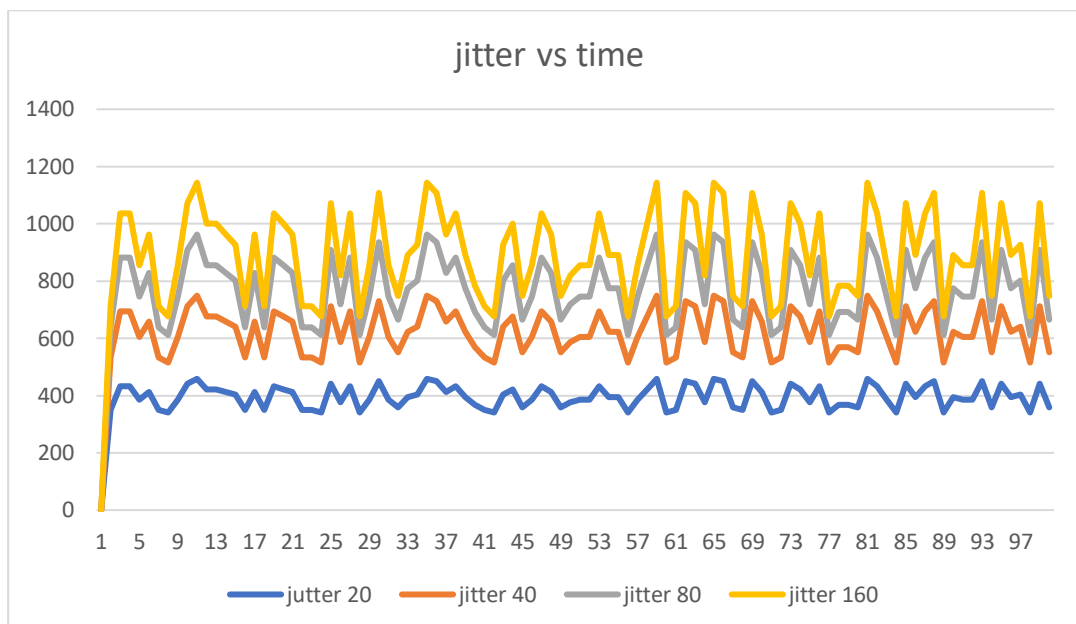


Рис. 4.3 - Графік зміни джиттеру (Jitter) у часі при зміні ширини смуги пропускання

На рисунку 4.3 показано динаміку джиттера - зміни затримки пакетів у часі - для кожної смуги пропускання. Джиттер є критично важливим показником для якості послуг реального часу, таких як VoIP, відеоконференції та онлайн-ігри, де рівномірність доставки пакетів має безпосередній вплив на користувацький досвід.

Аналіз кривих показує, що найменші зміни затримки спостерігаються при вузькому каналі (20 МГц), тоді як джиттер зростає при збільшенні смуги пропускання до 160 МГц. Це може бути пов'язано з більшим обсягом даних, що передаються, і пов'язаною з цим більшою ймовірністю коливань часу обробки пакетів у мережі. Всі графіки показують характерну «розбіжність» кривих, яка збільшується зі збільшенням пропускну здатності.

Незважаючи на те, що джиттер залишається в допустимих межах, його динаміка демонструє чітку залежність від ширини каналу. Цей ефект необхідно враховувати при налаштуванні бездротових мереж для мультимедійних додатків, де навіть невеликі нестабільності передачі можуть призвести до погіршення якості обслуговування з точки зору користувача.

4.2. Моделювання впливу потужності передавача на параметри якості з'єднання

У цьому варіанті досліджується, як зміна потужності передачі точки доступу впливає на якість з'єднання в бездротовій мережі IEEE 802.11ac [10]. Було проведено серію симуляцій зі значеннями потужності передачі 20, 40, 60 і 100 мВт. Інші параметри залишалися незмінними - зокрема, смуга пропускання становила 20 МГц, коефіцієнт загасання сигналу залишався незмінним, а трафік передавався між вузлами за протоколом TCP.

На початковому етапі було виявлено, що на мінімальній потужності (10 мВт) на приймач не надходило жодного пакета, тому жоден з показників не фіксувався. Це пояснюється тим, що сигнал не доходив до клієнтського вузла (STA) в топології. Починаючи з 20 мВт передача стала стабільною, що дозволило нам продовжити тест з коректною генерацією даних.

Нижче на рисунку 4.4 наведено динаміки зміни основних параметрів QoS у часі для кожного з протестованих рівнів потужності.

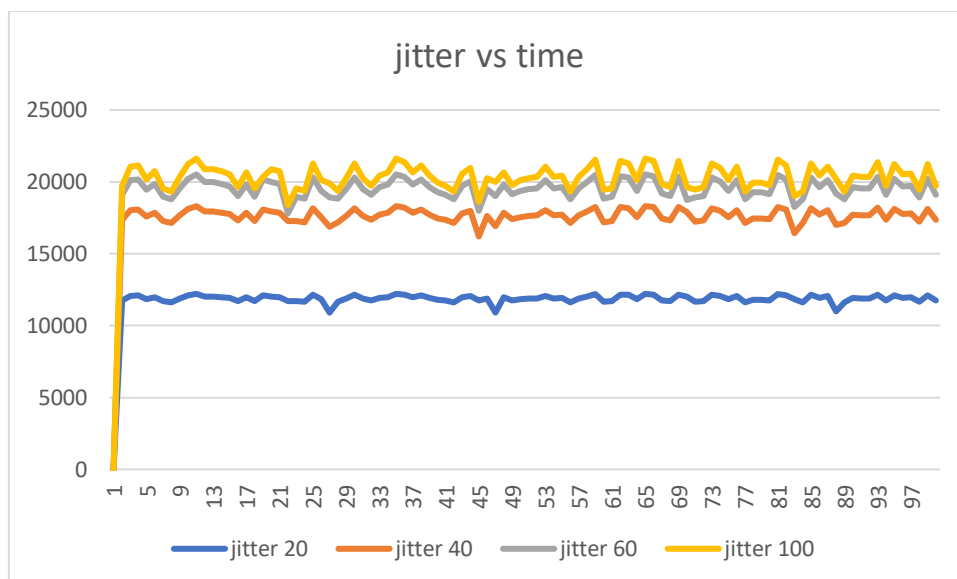


Рис. 4.4 – Зміна джитеру у часі при різній потужності передавача

Джитер демонструє чіткий розподіл на всіх рівнях потужності: найвища амплітуда коливань спостерігається при 100 мВт, тоді як найнижчі значення залишаються на рівні 20 мВт. Це може бути пов'язано з тим, що при більшому обсязі відправлень ймовірність змін у термінах доставки окремих посилок вища.

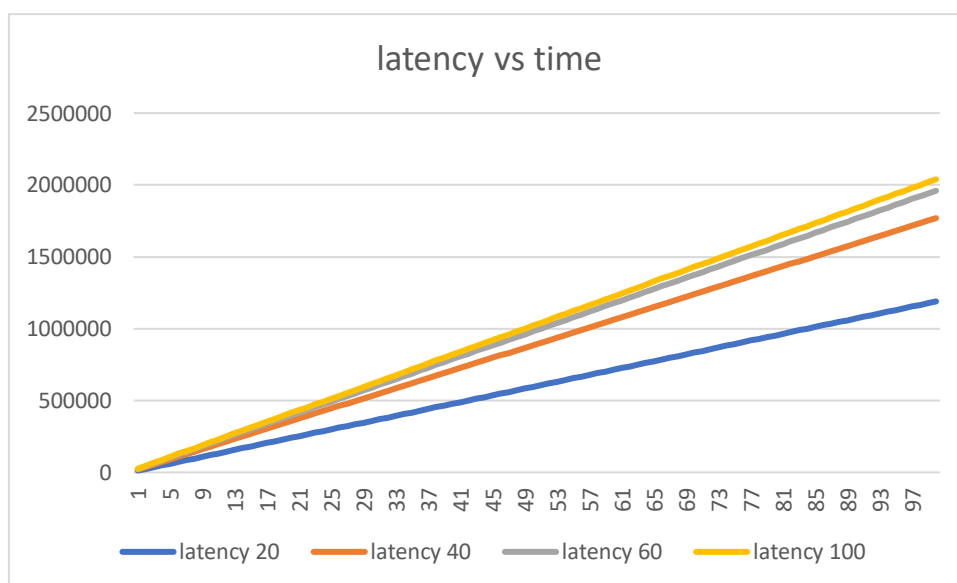


Рис. 4.5 – зміна затримки у часі при різній потужності передавача

Рис 4.5 показує, як змінюється загальна кумулятивна затримка для кожного значення потужності передавача. Як ви можете бачити, затримка зростає набагато швидше для конфігурацій з меншою потужністю. Це пов'язано з тим, що слабший сигнал спричиняє більше спроб повторної передачі, затримки в черзі і втрату частини трафіку.

І навпаки, при більшій потужності передачі затримка зростає повільніше і трафік обробляється з меншими перешкодами. Криві показують стійке лінійне зростання, але нахил цих ліній значно варіюється, що дозволяє оцінити ефективність кожної конфігурації з точки зору затримки передачі.

Таким чином, затримка може слугувати надійним показником якості з'єднання в умовах обмеженої пропускної здатності, що має вирішальне значення для послуг у режимі реального часу.

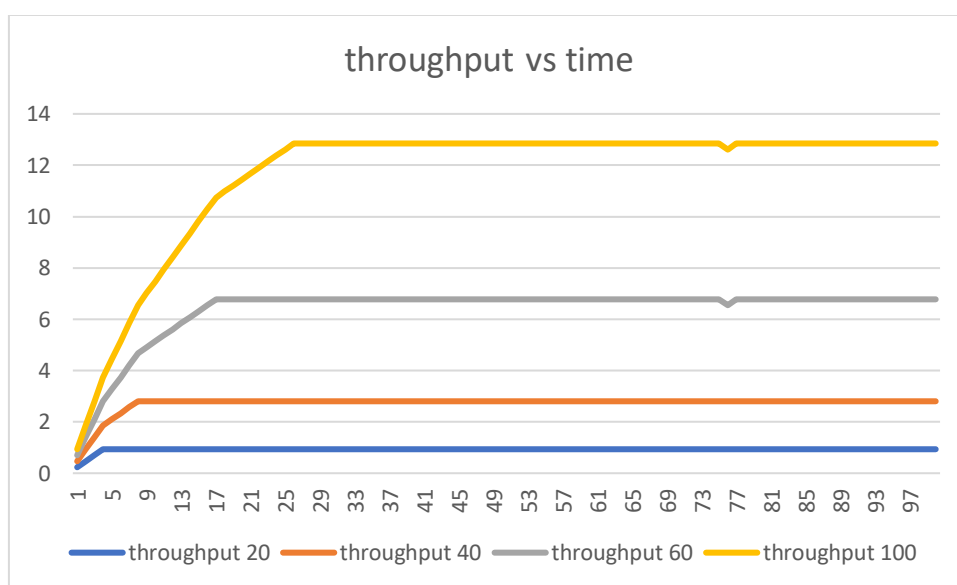


Рис 4.6 – зміна пропускної здатності у часі при різній потужності передавача

На рисунку 4.6 показано зміну обсягу переданих даних з часом для кожного варіанту потужності передачі. Криві показують стабілізацію

пропускної здатності після початкової фази прискорення, яка триває приблизно до 20-30 секунд. Потім кожна конфігурація досягає умовного «плато» з відносно постійним рівнем пропускної здатності.

При 100 мВт спостерігається найвищий результат, коли передача стабілізується на рівні понад 13 Мбіт/с, що в кілька разів вище, ніж при 20 мВт (приблизно 1,4 Мбіт/с). Також спостерігається чітка градація кривих: зі збільшенням потужності зростає пропускна здатність і стабільність з'єднання. Невеликі спади на 73-й секундні можуть свідчити про короточасні перевантаження або збої, але суттєво не впливають на загальний характер графіка.

4.3 Моделювання впливу коефіцієнта загасання сигналу на параметри якості з'єднання

У цьому випадку я досліджувала вплив коефіцієнта загасання сигналу на якість Wi-Fi з'єднання. Значення цього параметра варіювалися від 2,0 до 4,5, що дозволило змоделювати умови від відкритого простору до складного середовища з великою кількістю перешкод (наприклад, бетонні стіни, офісні перегородки тощо). Інші параметри, такі як потужність передачі (100 мВт), смуга пропускання (20 МГц) і тип трафіку (TCP) були збережені.

Дані про пропускну здатність, затримку та джиттер у часі були зібрані для п'яти значень n - від 2.0 до 4.0. При $n=4.5$ статистику зібрати не вдалося, оскільки сигнал був повністю ослаблений і жоден з пакетів не дійшов до місця призначення. Це типова ситуація з високим загасанням, яка підтверджує обмеження продуктивності бездротової мережі при постійній потужності.

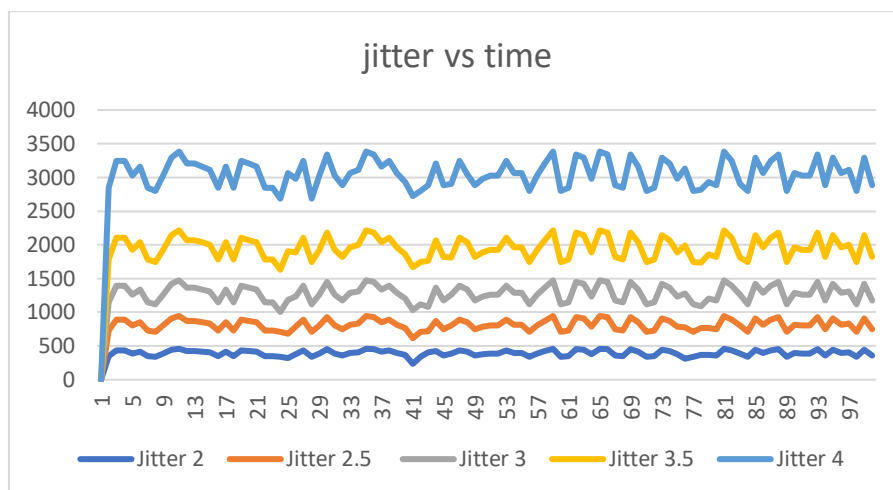


Рис. 4.7 - Зміна джитеру у часі при різних значеннях коефіцієнта загасання

Рисунок 4.7, який зображає графік джитеру чітко показує різницю між різними рівнями n . Найменша зміна затримки спостерігається при $n=2,0$, тоді як при $n=4,0$, амплітуда коливань найбільша. Це вказує на нестабільність з'єднання через сильне ослаблення сигналу. При високому n частота та рівень джитеру значно зростають, що має вирішальне значення для послуг у режимі реального часу.

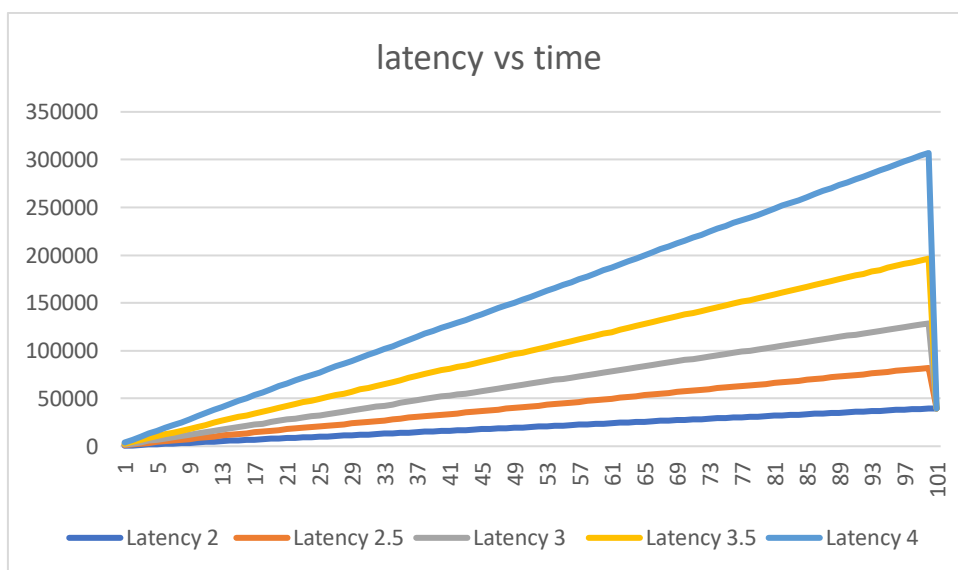


Рис. 4.8 - Зміна затримки у часі при різних значеннях коефіцієнта загасання

На рисунку 4.8 показано зростання загальної затримки зі збільшенням n -фактора. Видно, що затримка досягає найбільших значень в умовах більшого загасання, що свідчить про складність передачі сигналу, більшу кількість ретрансляцій і накопичення перевантажень в мережі.

Зменшення значення експоненти втрат на шляху забезпечує стабільно низький рівень затримки протягом усього моделювання.

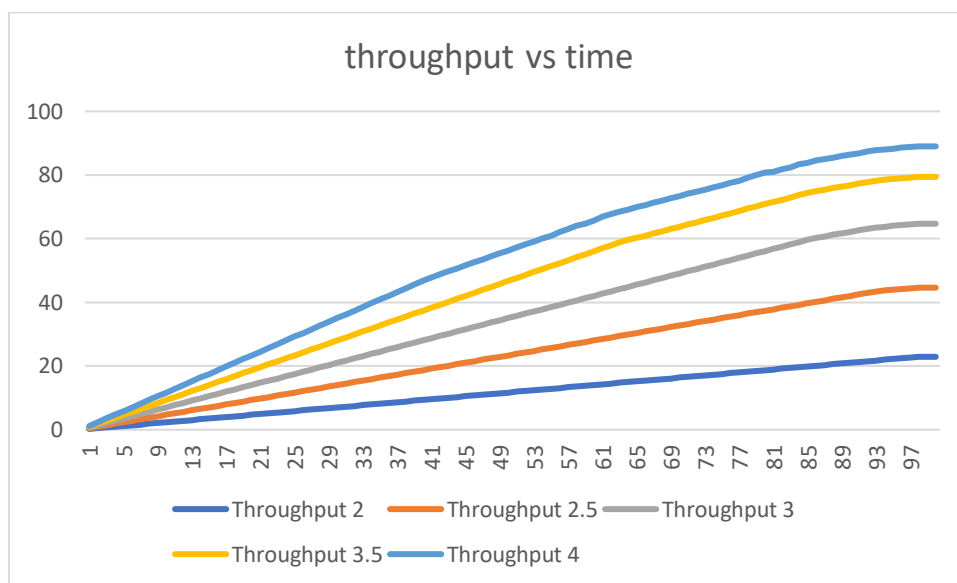


Рис. 4.9 - Зміна пропускної здатності у часі при різних значеннях коефіцієнта загасання

Рисунок 4.9. показує характер зміни обсягу переданих даних для різних значень показника втрат. Варто зазначити, що чим менше значення n , тим вища пропускна здатність, оскільки сигнал втрачає менше енергії під час поширення.

Криві демонструють чітку градацію – збільшення коефіцієнта загасання призводить до поступового зниження швидкості передачі даних. Це підтверджує, що фізичне середовище є ключовим фактором, що впливає на продуктивність мережі Wi-Fi.

4.4 Висновки

У цьому розділі представлені результати моделювання продуктивності бездротової мережі Wi-Fi при зміні основних параметрів конфігурації. Дослідження проводилося в середовищі NetSim, змінюючи параметр за фіксованих умов, що дозволило виокремити вплив кожного фактору на основні показники якості з'єднання.

Для кожного сценарію були створені графіки, що показують зміну пропускної здатності, затримки, джиттера і втрати пакетів в часі, що дозволило оцінити не тільки середні значення, але і динамічну стабільність мережі.

Було виявлено, що

- майже всі параметри QoS покращуються зі збільшенням пропускної здатності;
- збільшення потужності передачі може значно покращити продуктивність, особливо при слабкому сигналі
- збільшення коефіцієнта загасання сигналу негативно впливає на всі показники, а при занадто високих значеннях зв'язок взагалі не встановлюється.

Результати моделювання підтвердили існування закономірностей, які відповідають теоретичним уявленням про роботу Wi-Fi мереж. Отримані графіки слугують основою для подальшого аналізу в наступному розділі, в якому порівнюється ефективність параметрів та надаються рекомендації щодо оптимальної конфігурації бездротової мережі.

РОЗДІЛ 5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ WI-FI МЕРЕЖ

На основі моделювання, проведеного в попередньому розділі, ми системно проаналізували вплив основних параметрів конфігурації бездротової мережі на показники якості зв'язку.

Моделювання дозволило не тільки зафіксувати середні значення ключових показників (пропускна здатність, затримка, джиттер, втрата пакетів), але й відстежити їх динаміку в часі. Це дало змогу отримати більш повне уявлення про вплив параметрів на стабільність та продуктивність з'єднання [12].

На основі аналізу отриманих графіків були розроблені рекомендації щодо оптимальної конфігурації Wi-Fi мереж для забезпечення високої продуктивності та стабільності з'єднання. Ці рекомендації можуть бути застосовані як в домашніх умовах, так і в бізнес-середовищі або офісі, де потрібна надійність, мінімізація затримок і висока пропускна здатність.

5.1. Порівняння ефективності параметрів конфігурації

1. Ширина смуги пропускання

Моделювання показало чітку кореляцію між шириною каналу та якістю з'єднання. Збільшення смуги пропускання з 20 до 160 МГц може значно підвищити пропускну здатність, що важливо при роботі з великими обсягами даних (стрімінг, онлайн-сервіси, відеоконференції). Однак при максимальному значенні (160 МГц) спостерігається збільшення джиттера, що може негативно вплинути на роботу сервісів у режимі реального часу.

Рекомендація: Використовуйте 80 МГц як компромісне рішення - вона забезпечує високу швидкість з відносно стабільним джиттером і затримкою.

2. Потужність передавача

Моделювання показало, що якщо потужність занадто низька (10 мВт), трафік даних взагалі не досягає клієнтського пристрою. Це особливо актуально, якщо між точкою доступу та кінцевим пристроєм є перешкоди або велика відстань. Зі збільшенням потужності пропускна здатність значно підвищується, час затримки зменшується і з'єднання стабілізується.

Рекомендація: Для забезпечення високої якості зв'язку рекомендується використовувати потужність від 60 до 80 мВт. Потужність понад 100 мВт може бути ефективною, але повинна враховувати нормативні обмеження та можливі взаємні перешкоди, спричинені шумом у густонаселених мережах.

3. Коефіцієнт загасання сигналу

Коефіцієнт втрат є одним з найважливіших параметрів для побудованих бездротових мереж. Його значення безпосередньо залежить від типу середовища: вільний простір має низький коефіцієнт (близько 2,0), тоді як забудовані офіси або промислові об'єкти мають набагато більше значення (до 4,5). При високих значеннях n , навіть при достатній потужності передавача, якість з'єднання швидко погіршується і сигнал може не дійти до приймача.

Рекомендація: У складних середовищах слід враховувати показник втрати сигналу під час розміщення точок доступу. Щоб гарантувати покриття, ми рекомендуємо використовувати підсилювачі сигналу та ретранслятори або розміщувати точки доступу ближче одна до одної.

5.2 Практичні рекомендації щодо оптимізації Wi-Fi-мереж

Беручи до уваги результати моделювання, представлені в попередніх розділах, можна сформулювати ряд практичних рекомендацій, які слід враховувати під час побудови або налаштування бездротових мереж IEEE 802.11. Ці рекомендації ґрунтуються на аналізі впливу ключових

параметрів, таких як пропускна здатність, потужність передачі та коефіцієнт ослаблення сигналу, на показники якості з'єднання, включаючи пропускну здатність, затримку, джиттер та втрату пакетів.

1. Використання діапазону 80 МГц як оптимального рішення. Як показують результати моделювання, збільшення пропускної здатності сприяє значному збільшенню пропускної здатності [9]. Слід, однак, зазначити, що використання максимальної ширини (160 МГц) не завжди виправдане – така конфігурація, хоча й характеризується найвищою швидкістю, також несе більший ризик нестабільності, зокрема підвищеного джиттера та більшої схильності до перешкод. Для типових домашніх та офісних застосувань оптимальним значенням є 80 МГц, що забезпечує високу пропускну здатність та стабільну роботу без суттєвих коливань продуктивності. Таке значення також дозволяє уникнути непотрібних радіоперешкод і забезпечує більшу енергоефективність під час використання мобільних пристроїв.

2. Уникнення недостатньої потужності передачі. Під час моделювання були зафіксовані ситуації, в яких після зниження потужності до критичних значень (10 мВт) відбувалася повна втрата сигналу і передача даних не відбувалася. Це говорить про те, що хоча занадто мала потужність зменшує електромагнітне випромінювання, вона також призводить до повного порушення цілісності з'єднання. У більшості робочих сценаріїв – як у невеликих офісах, так і в домашніх мережах – рекомендується встановлювати потужність у діапазоні 60-80 мВт, що забезпечує як достатню дальність, так і прийнятну якість передачі без суттєвого збільшення перешкод для сусідніх мереж.

3. Проєктуйте з урахуванням фактичного коефіцієнта ослаблення сигналу. У складних середовищах з численними фізичними перешкодами (стіни, меблі, вікна, пристрої) коефіцієнт ослаблення сигналу може досягати 3,5–4,5, що суттєво впливає на продуктивність мережі.

Результати моделювання показують, що значення $n=4,5$: Сигнал може повністю зникнути, не досягши приймача. Важливо не лише встановлювати точки доступу в межах прямої видимості, але й використовувати підсилювачі сигналу, ретранслятори або повторювачі та визначати зони зі слабким сигналом за допомогою карт покриття.

4. Врахування вимог до послуг у режимі реального часу (VoIP, відеозв'язок, ігри). Сервіси, що потребують передачі даних у режимі реального часу, особливо чутливі до коливань пропускну здатності, затримки та втрати пакетів. Навіть за високої пропускну здатності перевищення допустимих рівнів затримки може призвести до переривання з'єднання, спотворення голосу або затримок відображення зображення. Тому під час налаштування мереж для таких сценаріїв рекомендується пріоритезувати стабільність над максимальною швидкістю, тобто для обмеження джиттера [3] та втрат слід вибирати конфігурації з помірною пропускну здатністю та середньою потужністю.

5. Регулярні перевірки та тести мережі. Навіть якщо початкові налаштування оптимальні, якість з'єднання може з часом змінюватися через зміни в навколишньому середовищі (нові перешкоди, переміщення пристроїв, додавання пристроїв). У цьому контексті доцільно регулярно проводити аналіз продуктивності мережі за допомогою віртуальних симуляцій (NetSim) та реальних інструментів моніторингу (наприклад, iPerf, Wireshark, NetSpot). Це дозволяє адаптивно реагувати на зміни та підтримувати стабільну роботу мережі в довгостроковій перспективі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Дослідження характеристик мереж Wi-Fi стандарту IEEE 802.11: Головною метою бакалаврської роботи було ретельне вивчення та аналіз ключових параметрів, які безпосередньо впливають на якість бездротового з'єднання Wi-Fi, а потім розробка практичних рекомендацій щодо їх оптимізації з метою підвищення загальної продуктивності мережі.

2. Детальний аналіз архітектури та стандартів Wi-Fi: У роботі наведено детальний опис архітектури та принципів роботи бездротових мереж. Особлива увага приділялася основним стандартам сімейства IEEE 802.11 (наприклад, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax) та типовим характеристикам каналів передачі даних, що є основою для розуміння поведінки радіосигналу.

3. Моделювання впливу ключових параметрів у середовищі NetSim: Використання ефективного середовища моделювання NetSim дозволило провести низку контрольованих експериментів. Це дозволило дослідити вплив таких параметрів, як пропускна здатність, потужність передавача та коефіцієнт ослаблення сигналу, на продуктивність мережі.

4. Комплексна оцінка показників якості з'єднання (QoS): Було проаналізовано вплив конкретних параметрів на ключові показники якості обслуговування. До них належать пропускна здатність (швидкість передачі даних), затримка (час передачі пакетів), джиттер (зміна затримки, важлива для потокового відео та VoIP) та втрата пакетів, які безпосередньо відображають надійність з'єднання.

5. Побудова та аналіз часових графіків: На основі результатів моделювання було побудовано детальні часові графіки, які візуалізують динаміку зміни параметрів з часом. Це дозволило нам чітко визначити

зв'язок між конфігурацією мережі та її фактичною продуктивністю, надаючи кількісні докази впливу кожного параметра.

6. Розробка практичних рекомендацій щодо конфігурації мережі Wi-Fi: На основі результатів комплексного аналізу було розроблено конкретні та практичні рекомендації щодо оптимальної конфігурації мережі Wi-Fi. Ці рекомендації можуть бути використані системними адміністраторами, інженерами зв'язку та дослідниками для значного покращення продуктивності та надійності бездротового зв'язку в реальних умовах.

7. Підтвердження важливості раціонального вибору параметрів: Результати, отримані під час дослідження, переконливо підтверджують вирішальну важливість раціонального та обґрунтованого вибору параметрів під час проектування та впровадження бездротових мереж. Це підкреслює необхідність врахування всіх факторів для досягнення оптимальної продуктивності.

8. Повне досягнення мети та виконання робочих завдань: Таким чином, поставлена в роботі мета була повністю досягнута, а всі визначені завдання були повністю виконані. Це доводить успішне завершення дослідження та його важливість для розвитку знань та оптимізації бездротового зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] LanMarket [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://lanmarket.ua/ua/stats/evolyutsiya-standartov-wifi-802-11/>.

[2] Базилевич В. Analysis of methods of protection from cyberthreats in IEEE 802.11 networks / Базилевич В. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://jrnlnau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/11901>.

[3] Arxiv [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://arxiv.org/abs/1307.2661>.

[4] Симулятор NetSim [Електронний Ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.tetcos.com/> .

[5] Malik A., Junaid Q., Basharat A. QoS in IEEE 802.11-based wireless networks: A contemporary review. *Journal of Network and Computer Applications*. Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804515000892>

[6] Stallings W. Wireless Communications and Networks. – 2002. - 421с.

[7] Веб-сайт Кластер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://klaster.ua/ua/stati-i-obzory/sfery-primenenija-besprovodnykh-setei-preimushchestva-pri/>

[8] М. Васильківський та ін. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ МІМО НА ОСНОВІ 6G / Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-92-101>

[9] Ekahau – Wi-Fi Planning and Optimization [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ekahau.com/>.

[10] Cisco [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise-networks/solution-listing.html>.

[11] Zhang Y., Psounis K., Rogalin R. Performance modeling of next-generation WiFi networks. Computer Networks. – Режим доступа до ресурсу: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.05.024>

[12] Jiri Milos, Ladislav Polak, Martin Slanina. Performance analysis of IEEE 802.11ac/ax WLAN technologies under the presence of CFO. 2017 27th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). - Режим доступа до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7937579>

[13] NetSpot [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.netspotapp.com/>