ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «СИСТЕМА АНАЛІЗУ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ КЛЮЧОВИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 123 Комп'ютерної інженерії
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ *Тарас ІЖЕВСЬКИЙ*
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. КСДМ-62
Тарас ІЖЕВСЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник: Наталія ЛАЩЕВСЬКА
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Рецензент: _____
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра 123 Комп'ютерної інженерії
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 123 Комп'ютерної інженерії
Освітньо-професійна програма Комп'ютерні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою Наталія ЛАЩЕВСЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
«_____» _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Іжевський Тарас Богданович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система аналізу методів вимірювання ключових показників продуктивності бездротових мереж
керівник кваліфікаційної роботи Наталія ЛАЩЕВСЬКА,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» 10 2025р. № 467
2. Строк подання кваліфікаційної роботи «_____» _____ 2025р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково-технічна література, методи системного аналізу для класифікації стандартів зв'язку, методи математичного для дослідження алгоритмів адаптації швидкості та емпіричні методи вимірювання для оцінки параметрів реального радіоефіру.
Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Дослідження еволюції протоколів wi-fi та факторів, що визначають ефективність обміну даними
2. Обґрунтування методологічного та інструментального забезпечення для імітації бездротових систем
3. Імітаційне моделювання функціонування бездротових систем та аналіз показників пропускної здатності
4. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
5. Дата видачі завдання «_____» _____ 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних	25.09-24.10.2025	Виконано
2	Обробка матеріалу	25.10-05.11.2025	Виконано
3	Розробка теоретичної частини	06.11-10.11.2025	Виконано
4	Розробка системи	11.11-15.11.2025	Виконано
5	Висновки за результатами аналізу	15.11-19.11.2025	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	19.11-21.11.2025	Виконано
7	Розробка презентації	21.11-29.11.2025	Виконано
8	Передзахист	01.12-02.12.2025	Виконано
9	Здача в деканат	15.12-18.12.2025	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Тарас ІЖЕВСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 67 стор., 25 рис., 2 табл., 21 джерело.

Мета дослідження – підвищення якості проектування та обслуговування бездротових мереж шляхом створення системи аналізу методів вимірювання продуктивності, яка поєднує теоретичне моделювання та інструментальний моніторинг.

Об'єкт дослідження – технології та процеси інформаційного обміну в бездротових мережах сімейства IEEE 802.11.

Предмет дослідження – алгоритми оцінки пропускної здатності, методи вимірювання рівня сигналу та інструменти діагностики радіочастотного середовища.

Короткий зміст роботи: У роботі здійснено огляд сучасних стандартів Wi-Fi та проаналізовано фактори, що впливають на швидкість передачі даних. Обґрунтовано вибір програмних комплексів MATLAB та NetSpot як базових інструментів дослідження. Розроблено імітаційну модель адаптивного керування модуляцією залежно від стану каналу з урахуванням шумів та завмирань. Проведено серію експериментів із генерації еталонних сигналів та моделювання їх проходження через канал TGac. Виконано натурне дослідження Wi-Fi покриття в реальному приміщенні, побудовано карти розподілу сигналу та проаналізовано вплив інтерференції.

Результати: Розроблена методика дозволяє з високою точністю прогнозувати пропускну здатність мережі та ідентифікувати причини зниження продуктивності. Експериментально підтверджено ефективність адаптивних алгоритмів зміни модуляції при флуктуаціях SNR.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: WI-FI, IEEE 802.11, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, MATLAB, NETSPOT, RSSI, SNR, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, АДАПТАЦІЯ ШВИДКОСТІ, MCS.

ABSTRACT

Textual part of the Master's thesis: 67 pages, 25 figures, 2 tables, 21 references.

The aim of the study is to improve the quality of wireless network design and maintenance by creating a system for analyzing performance measurement methods that combines theoretical modeling and instrumental monitoring.

The object of the study is the technologies and information exchange processes in IEEE 802.11 wireless networks.

The subject of the study encompasses throughput estimation algorithms, signal level measurement methods, and radio frequency environment diagnostic tools.

Summary of the work: The paper reviews modern Wi-Fi standards and analyzes the factors affecting data transmission speed. The choice of MATLAB and NetSpot software suites as the basic research tools is substantiated. A simulation model for adaptive modulation control based on channel conditions, considering noise and fading, has been developed. A series of experiments involving the generation of reference signals and the simulation of their transmission through a TGac channel was conducted. An on-site study of Wi-Fi coverage in a real premise was performed, signal distribution maps were constructed, and the impact of interference was analyzed.

Results: The developed methodology allows for high-precision forecasting of network throughput and identification of the causes of performance degradation. The efficiency of adaptive modulation change algorithms under SNR fluctuations has been experimentally confirmed.

KEYWORDS: WI-FI, IEEE 802.11, THROUGHPUT, MATLAB, NETSPOT, RSSI, SNR, SIMULATION MODELING, RATE ADAPTATION, MCS.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Іжевський Т. Б. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерні системи та мережі
(назва)
на тему: «Система аналізу методів вимірювання ключових показників продуктивності бездротових мереж».
Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІ _____ Катерина НЕСТЕРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Іжевський Т. Б. показав відмінну теоретичну підготовку, уміння володіти та розуміння новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.
Все це дозволяє оцінити кваліфікаційну роботу студента Іжевського Тараса Богдановича на оцінку «відмінно», та присвоїти їй кваліфікацію «магістр з комп'ютерної інженерії».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«_» _____ 2025 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач *Іжевський Т. Б.* допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою Комп'ютерної інженерії _____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Іжевський Тарас Богданович
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему: «Система аналізу методів вимірювання ключових показників продуктивності бездротових мереж»

Актуальність:

Магістерська робота присвячена вирішенню важливого завдання у сфері телекомунікацій — аналізу та вдосконаленню методів оцінки продуктивності бездротових мереж. В умовах масового переходу на стандарти Wi-Fi 6 та очікування Wi-Fi 7, вимоги до якості з'єднання зростають експоненціально. Робота пропонує системний підхід до діагностики мереж, що дозволяє нівелювати розрив між теоретичними можливостями обладнання та реальними показниками швидкості, які часто страждають від інтерференції та архітектурних особливостей приміщень.

Позитивні сторони:
1. Автор продемонстрував глибоке розуміння фізичних основ передачі даних, детально описавши механізми модуляції та кодування в сучасних протоколах. Використання професійного інструментарію MATLAB для генерації сигналів та моделювання каналу TGac свідчить про високий технічний рівень дослідження.
2. Цінним є практичний аспект роботи, зокрема розробка алгоритму імітаційного моделювання адаптивного керування швидкістю, що враховує динаміку SNR та параметри гістерезису. Це дозволяє досліджувати поведінку мережі в динаміці, а не лише в статичному стані.
3. . Комплексність підходу підтверджується проведенням натурних вимірювань за допомогою NetSpot, що дозволило верифікувати теоретичні розрахунки та наочно продемонструвати розподіл зон покриття (теплові карти) у реальних умовах.

Недоліки:
1. У розробленій математичній моделі припущено, що зворотний зв'язок про зміну MCS є миттєвим та ідеальним, без урахування затримок на передачу службових кадрів, що є певним спрощенням реальних фізичних процесів.
2. При проведенні натурних вимірювань дослідження фокусувалося переважно на діапазоні 2.4 ГГц, хоча сучасні стандарти орієнтовані на використання діапазонів 5 ГГц та 6 ГГц, які мають інші характеристики поширення хвиль.

Висновок: *кваліфікаційна бакалаврська робота заслуговує оцінку " відмінно", а здобувач Іжевський Т. Б. заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з комп'ютерної інженерії.*

Рецензент: _____ _____
науковий ступінь, вчене звання *підпис* *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

ЗМІСТ

ВСТУП.....10
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВОЛЮЦІЇ ПРОТОКОЛІВ WI-FI ТА ФАКТОРІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБМІНУ ДАНИМИ.....12
1.1 Фундаментальні основи функціонування та ключові параметри бездротових мереж.....12
1.2 Виклики в управлінні IT-інфраструктурою.....16
1.3 Огляд еволюції нормативних специфікацій та поколінь бездротових локальних мереж.....20
1.4 Огляд програмно-апаратного комплексу для імітаційного моделювання та діагностики бездротових систем.....24
2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЧНОГО ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ.....27
2.1 Характеристика та критерії відбору програмних комплексів для дослідження параметрів радіомережі.....27
2.2 Методологія імітаційного моделювання адаптивних алгоритмів керування швидкістю передачі даних.....34
2.3 Алгоритмізація процесу моделювання пропускної здатності бездротового каналу.....37
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ ТА АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ.....43
3.1 Методика синтезу еталонних сигналів стандарту IEEE 802.11 з використанням інструментарію WLAN Waveform Generator.....43
3.2 Програмна реалізація алгоритмів адаптації та конфігурація каналу передачі.....51
3.3 Експериментальна оцінка пропускної здатності та покриття Wi-Fi мережі в умовах забудови.....55
ВИСНОВКИ.....62

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....64
Додаток А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....67

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку інформаційного суспільства технології бездротової передачі даних знаходять надзвичайно широке застосування, стаючи фундаментом для функціонування Інтернету речей (IoT) та забезпечуючи мобільність користувачів. Однак, незважаючи на постійну еволюцію стандартів IEEE 802.11 та зростання теоретичних швидкостей передачі даних, фактична продуктивність мереж у реальних умовах часто суттєво відрізняється від заявлених максимумів. Це зумовлено впливом фізичних перешкод, інтерференцією та складністю архітектури приміщень, що робить задачу точного вимірювання та прогнозування параметрів мережі критично важливою.

Традиційні підходи до розгортання мереж без попереднього моделювання часто призводять до виникнення «мертвих зон» та нестабільного з'єднання. Це зумовлює необхідність застосування комплексних систем аналізу, які поєднують імітаційне моделювання фізичних процесів та натурні вимірювання ключових показників ефективності (KPI).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування бездротових мереж шляхом розробки та апробації системи аналізу методів вимірювання їх ключових показників продуктивності, що базується на поєднанні математичного моделювання та інструментального моніторингу.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати еволюцію протоколів Wi-Fi та факторів, що визначають ефективність обміну даними.

2. Обґрунтувати вибір програмно-апаратного забезпечення для імітаційного моделювання та діагностики бездротових систем, провівши порівняльний аналіз існуючих інструментів (MATLAB, NetSpot, Wireshark).

3. Розробити методику синтезу еталонних сигналів та імітаційну модель адаптивного керування швидкістю передачі даних в умовах частотно-селективного каналу.

4. Алгоритмізувати процес моделювання пропускної здатності каналу з урахуванням зміни схеми модуляції та кодування залежно від співвідношення сигнал/шум.

5. Провести експериментальну оцінку покриття та пропускної здатності реальної Wi-Fi мережі в умовах забудови з використанням побудови теплових карт.

Об’єкт дослідження – процеси передачі даних у бездротових локальних мережах стандартів IEEE 802.11.

Предмет дослідження – методи, моделі та інструментальні засоби вимірювання та аналізу показників продуктивності (пропускна здатність, RSSI, SNR) бездротових мереж.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для класифікації стандартів зв'язку, методи математичного для дослідження алгоритмів адаптації швидкості та емпіричні методи вимірювання для оцінки параметрів реального радіоефіру.

Практичне значення. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати поведінку бездротової мережі, виявляти проблемні зони на етапі планування та оптимізувати налаштування точок доступу для забезпечення максимальної продуктивності.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВОЛЮЦІЇ ПРОТОКОЛІВ WI-FI ТА ФАКТОРІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБМІНУ ДАНИМИ

1.1 Фундаментальні основи функціонування та ключові параметри бездротових мереж

На сучасному етапі розвитку інформаційного суспільства технології бездротової передачі даних знаходять надзвичайно широке застосування, забезпечуючи суттєві переваги у найрізноманітніших сферах людської діяльності. Головною цінністю впровадження таких рішень є надання користувачам повної свободи переміщення, оскільки зникає залежність від стаціонарних фізичних комунікацій та кабельних з'єднань. Цей аспект набуває критичного значення при експлуатації портативної обчислювальної техніки, до якої належать сучасні смартфони, планшетні комп'ютери та ноутбуки. Відсутність необхідності у фізичній комутації значно спрощує процедури розгортання мережевої інфраструктури, налаштування обладнання та його подальшу експлуатацію. Зокрема, технології на кшталт Wi-Fi дозволяють оперативно інтегрувати нові пристрої в локальні обчислювальні мережі та забезпечувати їх стабільним доступом до глобальної мережі Інтернет.

Окремо варто відзначити роль бездротових комунікацій як фундаментального компонента в архітектурі Інтернету речей (IoT). Саме завдяки бездротовим каналам зв'язку стає можливим підключення широкого спектра сенсорів та розумних пристроїв, які автономно збирають інформацію та здійснюють обмін даними між собою. Крім того, технології бездротового зв'язку, зокрема супутникові системи, вирішують проблему цифрової нерівності, забезпечуючи комунікацію у географічно віддалених регіонах або місцевостях зі складним рельєфом, де прокладання традиційних кабельних магістралей є економічно недоцільним або технічно неможливим. Таким чином, бездротові

мережі гарантують швидкий та безбар'єрний доступ до інформаційних ресурсів незалежно від локації, що позитивно впливає на якість комунікації та швидкість поширення інформації. Важливою характеристикою таких технологій, як Wi-Fi та Bluetooth, є їхня висока масштабованість, що дозволяє без зайвих зусиль збільшувати кількість абонентів у мережі [1]. Узагальнюючи викладене, можна стверджувати, що бездротові технології є невіддільним елементом повсякденного життя, який суттєво підвищує ефективність робочих процесів та комфорт користування цифровими сервісами.

У сфері телекомунікацій існує велика кількість різновидів бездротових інтерфейсів, які адаптовані під конкретні галузеві потреби. Серед усього різноманіття рішень, домінуючою топологією для організації локального доступу на сьогодні залишається технологія Wi-Fi, що базується на сімействі стандартів IEEE 802.11. Цей стандарт регламентує порядок об'єднання пристроїв у межах певної зони покриття для спільного доступу до мережевих ресурсів. За час існування технології інженерами було розроблено значну кількість специфікацій стандарту IEEE 802.11, які маркуються латинськими літерами від «a» до «w». Незважаючи на велику кількість розроблених версій, масового комерційного успіху та широкого розповсюдження серед виробників мережевого обладнання набули лише чотири базові модифікації: 802.11a, 802.11b, 802.11g та 802.11n. Інші літерні індекси, як правило, позначають специфічні доповнення, покращення безпеки або технічні корективи вже існуючих протоколів, які не стали окремими споживчими стандартами. Водночас індустрія не стоїть на місці, і на ринку активно впроваджуються новітні покоління зв'язку, такі як 802.11ac та 802.11ax (Wi-Fi 6). Ці сучасні ітерації характеризуються значно вищими показниками пропускної здатності та більш раціональним використанням частотного спектра, що дозволяє обслуговувати більшу кількість клієнтів одночасно [3].

Деталізовані параметри та специфікації згаданих протоколів наведені у наступному ілюстративному матеріалі.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика технічних параметрів основних поколінь стандарту Wi-Fi

Параметри стандарту / Версія протоколу	**IEEE 802.11a**	**IEEE 802.11b**	**IEEE 802.11g**	**IEEE 802.11n**
Рік затвердження Wi-Fi Alliance	1999	1999	2003	2009
Робочий частотний спектр, ГГц	5,15–5,24; 5,67–5,85	2,4–2,48	2,4–2,48	2,4–2,48; 5,14–5,25; 5,67–5,85
Методологія доступу до середовища	CSMA-CA	CSMA-CA	CSMA-CA	CSMA-CA
Ємність каналу (кількість абонентів)	64	64	64	64
Гранична швидкість передачі	54 Мбіт/с	11 Мбіт/с	54 Мбіт/с	600 Мбіт/с
Експлуатаційна (реальна) швидкість	23 Мбіт/с	4 Мбіт/с	20 Мбіт/с	120 Мбіт/с
Смуга пропускання каналу	20 МГц	22 МГц	20 МГц	40 МГц
Тип модуляції сигналу	OFDM	BPSK, CCK	OFDM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Радіус покриття (у приміщенні), м	10–20	20–100	20–50	10–20

Окрему увагу в контексті розвитку бездротових технологій слід приділити новітнім розробкам, зокрема стандарту, відомому як Wi-Fi 7 (або IEEE 802.11be). Експертне середовище прогнозує, що теоретична межа пропускної

здатності для цього покоління сягатиме вражаючого показника у тридцять гігабіт на секунду, що відкриває принципово нові можливості для передачі надважкого контенту. Процес стандартизації є тривалим і складним: станом на березень дві тисячі двадцять третього року активна фаза розробки специфікацій 802.11be все ще тривала, а офіційна публікація фінальної версії протоколу та його ратифікація очікувалися у весняний період дві тисячі двадцять четвертого року.

Окрім часових рамок та швидкісних показників, сімейство стандартів IEEE 802.11 характеризується низкою фундаментальних властивостей, що визначають логіку їх роботи. Ключовим параметром є використання певних частотних смуг. Традиційно функціонування мереж Wi-Fi базується на двох основних радіочастотних діапазонах: два цілих і чотири десятих гігагерца та п'ять гігагерців. Водночас, еволюція технологій, зокрема впровадження стандарту 802.11ax та його наступників, передбачає освоєння частотного спектра, що перевищує п'ять гігагерців (зокрема, діапазон шість гігагерців), що дозволяє розвантажити ефір та забезпечити додаткову ємність каналів.

Важливою характеристикою є варіативність швидкості передачі інформації. Цей показник еволюціонував від кількох мегабіт на секунду у ранніх версіях протоколів до значень, що вимірюються кількома гігабітами на секунду у сучасних реалізаціях, забезпечуючи потреби найвимогливіших сервісів. Ще однією визначальною рисою є гнучкість мережевої інфраструктури. Архітектура Wi-Fi передбачає два основні режими роботи: режим прямого з'єднання «точка-точка» (Ad-hoc), коли пристрої комунікують безпосередньо, та інфраструктурний режим, який є більш поширеним і передбачає наявність центрального вузла — точки доступу. Саме цей елемент виконує функції координатора, керуючи підключенням клієнтських терміналів та розподілом ресурсів.

Для ефективного управління трафіком та запобігання конфліктам при передачі даних технологія використовує складні алгоритми множинного доступу. Основним методом є протокол CSMA/CA, який розшифровується як

множинний доступ з контролем носійної частоти та уникненням колізій. Цей механізм дозволяє пристроям «слухати» ефір перед початком трансляції, мінімізуючи ймовірність накладання сигналів. Беззаперечною перевагою технології є забезпечення мобільності користувачів. Абоненти мають змогу вільно пересуватися в межах радіуса дії точки доступу без втрати з'єднання з бездротовою мережею, що є критично важливим для сучасних портативних гаджетів. Насамкінець, варто зазначити роль Wi-Fi як фундаментальної технології для екосистеми Інтернету речей (IoT). Завдяки своїй універсальності, вона дозволяє об'єднувати в єдину інформаційну мережу величезну кількість різнорідних пристроїв та датчиків, забезпечуючи безперервний обмін даними між ними.

1.2 Виклики в управлінні IT-інфраструктурою

У даному підрозділі детально розглядається специфікація стандарту IEEE 802.11. Подібно до інших нормативних документів серії IEEE 802, цей стандарт базується на архітектурі, що охоплює два нижні рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем (OSI): фізичний рівень та канальний рівень (Data Link Layer). Своєю чергою, канальний рівень структурно розділений на два функціональні підрівні. Верхній підрівень, відомий як управління логічним каналом (Logical Link Control — LLC), є універсальним і регламентується окремим стандартом IEEE 802.2. Натомість стандарт IEEE 802.11 фокусується виключно на нижньому підрівні — управлінні доступом до середовища (Medium Access Control — MAC). Цей поділ означає, що на фізичному рівні визначаються методи модуляції сигналів, швидкості передачі та специфіка взаємодії з радіоефіром. Рівень MAC відповідає за алгоритми використання спільного частотного ресурсу, процедури реєстрації пристроїв у

мережі, процеси автентифікації користувачів, а також механізми захисту інформації від несанкціонованого доступу [2].

Оскільки концепція IEEE 802.11 розроблялася як бездротова альтернатива технології Ethernet, вона успадкувала принцип пакетної передачі даних із використанням сорокавосьмибітних адрес, аналогічних тим, що застосовуються у дротових мережах. Комітет зі стандартизації IEEE 802 приділив значну увагу питанням сумісності, завдяки чому бездротові та традиційні кабельні сегменти мереж можуть безперешкодно взаємодіяти в межах єдиної інформаційної системи.

Згідно зі стандартом, існують дві фундаментальні топології побудови локальної мережі: децентралізована мережа (режим Ad-hoc) та централізована (інфраструктурна) мережа. Схематичне зображення цих топологій наведено на рис.1.1.

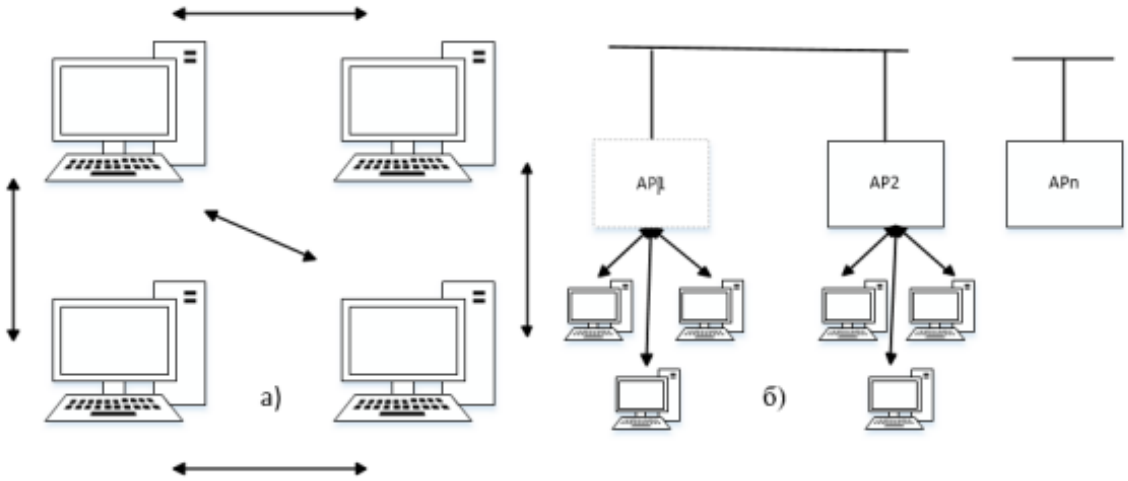


Рисунок 1.1 – Топологічні схеми організації бездротових мереж: а) децентралізований режим прямого з’єднання (Ad-hoc); б) інфраструктурний режим із точкою доступу

У першому варіанті (Ad-hoc) обмін інформацією відбувається безпосередньо між клієнтськими станціями без залучення адміністративного обладнання. У другому випадку, який на практиці став домінуючим стандартом для побудови корпоративних та домашніх мереж, ключовим

елементом виступає точка доступу (Access Point — AP). Це стаціонарний пристрій, що працює на фіксованому частотному каналі та виконує роль комутатора: увесь трафік між клієнтами проходить виключно через нього. Крім того, точка доступу забезпечує шлюз до зовнішніх дротових магістралей. У масштабах великих об’єктів мережа може складатися з множини точок доступу, об’єднаних через Ethernet, що створює стільникову структуру з зонами покриття, які перекриваються. Це дозволяє реалізувати функцію безшовного роумінгу, коли клієнтський пристрій переміщується від однієї базової станції до іншої без розриву з’єднання, гарантуючи мобільність користувача.

Для запобігання колізіям стандарт IEEE 802.11 використовує комбінацію двох механізмів оцінки стану каналу: фізичного та віртуального. Фізичний механізм реалізується апаратно і полягає у вимірюванні рівня електромагнітного сигналу в антені: якщо рівень перевищує встановлений поріг, канал вважається зайнятим. Віртуальний механізм базується на аналізі службової інформації. Кадри даних, а також службові пакети підтвердження (ACK) та запити на передачу (RTS/CTS), містять дані про прогнозовану тривалість зайнятості каналу для передачі поточного блоку інформації. Усі пристрої в зоні досяжності зчитують цю інформацію і встановлюють таймер затримки, знаючи наперед, скільки часу ефір буде недоступним.

Обмін інформацією в мережах IEEE 802.11 здійснюється виключно за допомогою дискретних блоків — кадрів (frames). Їхня внутрішня структура чітко розмежовує дані фізичного рівня та рівня управління доступом. Формування кадру відбувається на MAC-рівні, після чого до нього додається заголовок фізичного рівня (PLCP) для передачі в ефір. Дані надходять на MAC-рівень від вищих протоколів прикладного рівня. У випадку, якщо розмір вхідного пакета перевищує максимально допустиме значення стандарту, ініціюється процедура фрагментації: великий масив даних розбивається на серію менших фрагментів, які передаються за спеціальним алгоритмом.

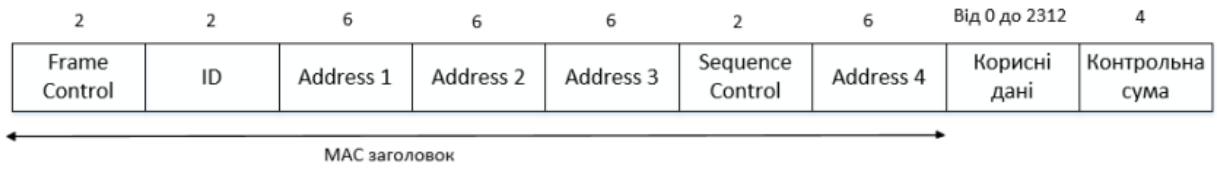


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення структури кадру на рівні управління доступом до середовища (MAC)

Класифікація кадрів, що регулюють доступ до середовища, включає три основні групи: інформаційні кадри (що несуть дані користувача), контрольні кадри (наприклад, підтвердження ACK, запити RTS/CTS) та кадрів управління мережею (зокрема, сигнальні кадри Beacon). Незалежно від типу, вони мають уніфіковану структуру, показану на рисунку 1.2. Кожен кадр складається із заголовка MAC, тіла кадру (Frame Body) та контрольної суми CRC для перевірки цілісності. Заголовок містить вичерпний набір метаданих: версію протоколу, тип і підтип кадру, параметри шифрування та енергозбереження (поле Frame Control), ідентифікатор тривалості зайнятості каналу (Duration/ID), а також MAC-адреси (до чотирьох полів, що дозволяє передавати пакети між різними сегментами мережі). Також присутнє поле контролю послідовності (Sequence Control) для складання фрагментованих пакетів. Поле даних має змінну довжину і може бути відсутнім у службових кадрах, які виконують виключно управлінські функції.

Варто також згадати еволюцію швидкісних показників. Швидкість у п'ятдесят чотири мегабіти на секунду була вперше реалізована в стандарті 802.11a. Хоча розробка цієї специфікації розпочалася раніше за інші, її фіналізація відбулася пізніше. Досягнення такої пропускної здатності стало можливим завдяки використанню складної модуляції, де кожен символ кодує шістдесят чотири рівні. Цей стандарт працює у частотному діапазоні п'ять гігагерців із шириною каналу двадцять мегагерців.

На відміну від стандартів 802.11 та 802.11b, особливістю діапазону п'ять гігагерців є критична чутливість до інтерференції: навіть незначне перекриття спектрів сусідніх каналів може призвести до значних помилок передачі. Проте

позитивним аспектом є те, що у цьому діапазоні стандартизована відстань між центрами каналів також становить двадцять мегагерців, що спрощує планування мережі. Подальшим розвитком став стандарт 802.11g, який, хоч і не приніс революційного зростання пікових швидкостей, виконав важливу роль інтегратора. Фактично, він переніс технологічні досягнення стандарту 802.11a (високошвидкісну модуляцію) у більш поширений діапазон два цілих і чотири десятих гігагерца, забезпечуючи підтримку швидкостей обох попередніх поколінь та зворотну сумісність.

1.3 Огляд еволюції нормативних специфікацій та поколінь бездротових локальних мереж

Фундаментом функціонування сучасних бездротових екосистем є сувора стандартизація. Протоколи Wi-Fi виступають ключовим регуляторним механізмом, який визначає архітектуру бездротових мереж та встановлює набір критичних технічних параметрів. Саме ці специфікації регламентують методи кодування інформації, ширину смуги пропускання та принципи взаємодії пристроїв у радіоефірі, що, своєю чергою, безпосередньо впливає на показники швидкості передачі даних та загальну ефективність каналу зв'язку.

йство стандартів IEEE 802.11 характеризується динамічним розвитком та постійним технологічним вдосконаленням. Це зумовлено необхідністю задовольняти зростаючі вимоги до пропускної здатності та щільності підключень. Еволюційний шлях цієї технології прийнято поділяти на окремі генерації, що дозволяє структурувати зміни у технічних можливостях обладнання. Узагальнена класифікація та відповідність комерційних назв технічним специфікаціям наведена у табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Хронологія розвитку та порівняльні технічні параметри поколінь стандарту Wi-Fi

Маркетингова назва покоління	**Специфікація IEEE**	**Рік впровадження**	**Гранична пропускна здатність (Мбіт/с)**	**Робочі частотні діапазони (ГГц)**
Wi-Fi 7	802.11be	Очікується (2024)	≤ 46 120	2,4 / 5 / 6
Wi-Fi 6E	802.11ax	2020	≤ 9 608	6
Wi-Fi 6	802.11ax	2019	≤ 9 608	2,4 / 5
Wi-Fi 5	802.11ac	2014	≤ 6 933	5
Wi-Fi 4	802.11n	2008	≤ 600	2,4 / 5
(Wi-Fi 3)	802.11g	2003	≤ 54	2,4
(Wi-Fi 2)	802.11a	1999	≤ 54	5
(Wi-Fi 1)	802.11b	1999	≤ 11	2,4
(Wi-Fi 0)	802.11	1997	≤ 2	2,4

Значним еволюційним стрибком у розвитку бездротових мереж стала поява стандарту IEEE 802.11n. Його впровадження дозволило досягти теоретичної швидкості передачі даних до шестисот мегабіт на секунду, що стало кардинальним покращенням у порівнянні з попередніми поколіннями. Ключовою інновацією цієї специфікації стала інтеграція технології MIMO (Multiple Input Multiple Output). Суть цього методу полягає у використанні багатоантенних систем як на стороні передавача, так і на стороні приймача, що суттєво підвищує пропускну здатність каналу та стабільність з’єднання. Окрім того, стандарт передбачає роботу з каналами шириною двадцять та сорок мегагерців. Використання розширеної смуги у сорок мегагерців дозволяє значно наростити швидкість обміну даними, хоча в умовах щільної забудови це може призводити до конфліктів у радіочастотному спектрі через його перевантаженість. Також у стандарті реалізовано методи посилення сигналу,

які спрямовані на збільшення радіуса дії мережі та покращення якості зв’язку на значних відстанях. Важливою характеристикою є повна зворотна сумісність із застарілими протоколами 802.11a/b/g, що гарантує безпроблемну інтеграцію різнорідного обладнання. Питання кібербезпеки вирішуються шляхом підтримки надійних криптографічних протоколів, таких як WPA та WPA2.

Наступним етапом розвитку став стандарт IEEE 802.11ac, який отримав комерційну назву Wi-Fi 5 і був представлений спільноті у дві тисячі тринадцятому році. На сьогодні він залишається одним із найбільш поширених рішень. Швидкісні показники цього протоколу сягають одного цілого і трьох десятих гігабіта на секунду у першій хвилі реалізації (Wave 1), а в пристроях другої хвилі (Wave 2) ці значення є ще вищими, що демонструє суттєвий прогрес порівняно з версією 802.11n. Технічна перевага забезпечується вдосконаленою технологією MIMO, яка підтримує більшу кількість антен (зазвичай три і більше), що підвищує стійкість до завад. Для досягнення надвисокої пропускної здатності стандарт використовує канали шириною вісімдесят і навіть сто шістдесят мегагерців. Іншою важливою технологією, впровадженою у Wi-Fi 5, є Beamforming (формування променю). Вона дозволяє точці доступу фокусувати радіосигнал безпосередньо у напрямку клієнтського пристрою, замість того щоб розсіювати його у всіх напрямках, що оптимізує зону покриття. Специфікація Wave 2 також привнесла підтримку технології MU-MIMO, завдяки якій мережа може одночасно обмінюватися даними з кількома користувачами, що критично важливо для підвищення загальної продуктивності. Звісно, збережено зворотну сумісність з усіма попередніми версіями (a/b/g/n) та підтримку сучасних стандартів шифрування.

Найновішим із масових стандартів є IEEE 802.11ax, відомий як Wi-Fi 6, ратифікований у дві тисячі дев’ятнадцятому році. Головною метою його розробки стало не лише збільшення швидкості, а й кардинальне підвищення ефективності роботи мережі в умовах високої щільності клієнтських пристроїв та значних обсягів трафіку. Теоретична межа швидкості для Wi-Fi 6 перевищує дев’ять гігабіт на секунду. Досягнення таких показників стало можливим

завдяки комплексу технологічних інновацій. Зокрема, технологія OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) дозволяє дробити частотний канал на дрібніші піднесучі, які можуть паралельно використовуватися різними пристроями, що ліквідує черги передачі даних. Високопродуктивна версія MU-MIMO тепер працює як на завантаження, так і на вивантаження, обслуговуючи ще більше абонентів одночасно.

Для боротьби з інтерференцією сусідніх мереж впроваджено технологію BSS Coloring, яка маркує пакети «своєї» мережі цифровим кольором, дозволяючи ігнорувати чужий трафік на тій самій частоті. Енергоефективність мобільних пристроїв покращено завдяки функції TWT (Target Wake Time), що дозволяє гаджетам узгоджувати розклад виходу в ефір і решту часу перебувати в режимі сну. Також збільшено щільність кодування інформації завдяки використанню квадратурної амплітудної модуляції вищого порядку (1024-QAM). Стандарт є повністю сумісним з попередніми поколіннями Wi-Fi.

Окремо варто розглянути спеціалізований стандарт IEEE 802.11ay, презентований у дві тисячі двадцятому році, який є розширенням сімейства Wi-Fi у міліметровому діапазоні хвиль (шістдесят гігагерців). Його ключовою особливістю є феноменальна швидкість передачі даних, яка може досягати двадцяти гігабіт на секунду, що робить його одним із найшвидших бездротових протоколів. Робота на такій високій частоті дозволяє використовувати надширокі канали. Сфера застосування 802.11ay охоплює специфічні сценарії, такі як бездротова передача відео надвисокої чіткості, організація зв’язку у великих конференц-залах або створення високошвидкісних мостів на відкритих просторах. Проте слід враховувати фізичні обмеження міліметрових хвиль: вони мають вкрай низьку здатність проникати крізь стіни та інші перешкоди, тому реальна ефективність цього стандарту критично залежить від наявності прямої видимості між пристроями.

Підсумовуючи, слід зазначити, що фактична швидкість передачі даних у реальних умовах завжди відрізняється від теоретичних максимумів. Вона залежить від безлічі факторів: архітектури приміщення, наявності

радіочастотних завад, кількості активних абонентів та відстані до точки доступу. Тим не менш, індустрія інформаційно-комунікаційних технологій продовжує безперервний розвиток, регулярно випускаючи оновлені специфікації для задоволення зростаючих потреб людства у швидкому та надійному доступі до інформації.

1.4 Огляд програмно-апаратного комплексу для імітаційного моделювання та діагностики бездротових систем

Процес проектування та експлуатації сучасних телекомунікаційних систем неможливий без попереднього моделювання та постійного моніторингу. Імітаційне моделювання мереж Wi-Fi є критично важливим етапом, який передбачає створення цифрового двійника або віртуальної абстракції реальної мережевої інфраструктури. Основною метою цього процесу є детальне вивчення поведінки системи в різних умовах, прогнозування характеристик та оптимізація параметрів без необхідності розгортання дорогого фізичного обладнання на початкових етапах. Для реалізації цих завдань інженери та науковці використовують широкий спектр спеціалізованого програмного забезпечення та апаратних засобів [4].

Серед провідних рішень для системного моделювання варто виділити програмний комплекс OPNET Modeler, який після ребрендингу відомий як Riverbed Modeler. Це середовище є потужним інструментом для дискретно-подієвого моделювання, що надає розробникам можливість глибоко досліджувати різноманітні метрики мережі Wi-Fi, такі як пропускна здатність каналів, часові затримки передачі пакетів та рівень джитера. Іншим важливим інструментом є платформа QualNet, яка спеціалізується на високоточному відтворенні роботи бездротових мереж у режимі реального часу. Функціонал QualNet дозволяє емулювати роботу різних версій протоколів бездротового

зв'язку, що є незамінним для проведення експериментів з оцінки продуктивності та тестування алгоритмів оптимізації. У навчальному процесі та для базового проектування широкої популярності набув симулятор Cisco Packet Tracer. Цей програмний продукт від компанії Cisco дозволяє візуалізувати логічну топологію мережі та відпрацьовувати сценарії налаштування бездротового обладнання.

Особливе місце в наукових дослідженнях займає середовище MATLAB разом із пакетом розширень Simulink [6]. Цей інструментарій використовується для фундаментального математичного моделювання фізичних процесів передачі сигналів. Він дозволяє розробляти та тестувати нові алгоритми модуляції, кодування та обробки сигналів на рівні фізичного шару протоколів Wi-Fi, що робить його незамінним для розробників нових стандартів.

Окрім моделювання, важливим аспектом є діагностика та аналіз вже розгорнутих мереж. Для цих цілей застосовується інший клас інструментів — мережеві аналізатори та сканери. Еталоном у сфері аналізу пакетних даних є Wireshark — відкрите програмне забезпечення, що дозволяє перехоплювати трафік у реальному часі. За допомогою Wireshark фахівці можуть детально розбирати структуру кадрів Wi-Fi, аналізувати заголовки протоколів та виявляти аномалії на найнижчому рівні обміну даними. Для професійного планування радіопокриття часто використовують комерційний продукт Ekahau Site Survey. Він дозволяє створювати детальні теплові карти приміщень, візуалізуючи зони покриття, рівні сигналу та потенційні "мертві зони". Схожі завдання вирішує інструмент AirMagnet WiFi Analyzer, який надає розширені можливості для аудиту якості обслуговування (QoS), перевірки стабільності з'єднання та виявлення джерел інтерференції. Також варто згадати програмне забезпечення Acrylic Wi-Fi, яке спеціалізується на аналізі параметрів сигналу, оцінці співвідношення сигнал/шум та моніторингу завантаженості каналів.

Окремою категорією є засоби для спектрального аналізу, необхідні для оцінки радіочастотного середовища та виявлення фізичних перешкод, які не

пов'язані з Wi-Fi пристроями (наприклад, мікрохвильові печі або бездротові камери). До цієї групи належать програмно-апаратні комплекси на кшталт MetaGeek Chanalyzer або Ekahau Spectrum Analyzer. Вони візуалізують спектр частот, дозволяючи інженеру побачити невидимі перешкоди та оцінити рівень зашумленості ефіру. Більш спеціалізованим рішенням є AirMagnet Spectrum XT, який автоматично ідентифікує та класифікує джерела не-Wi-Fi інтерференції. Для лабораторних вимірювань високої точності застосовуються апаратні спектральні аналізатори серії Keysight (раніше Agilent) X-Series, що здатні працювати у надширокому діапазоні частот.

Провівши комплексний порівняльний аналіз існуючих методів та засобів, для подальшого виконання дослідження в рамках цієї роботи було обрано наступний інструментарій: для математичного моделювання процесів та генерації тестових сигналів буде використано середовище MATLAB, а для проведення натурних вимірювань та аналізу параметрів реальної мережі — програмний засіб WiFi Analyzer.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЧНОГО ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ

2.1 Характеристика та критерії відбору програмних комплексів для дослідження параметрів радіомережі

Спираючись на результати комплексного огляду програмних рішень та апаратних засобів для аналізу і моделювання, проведеного у попередньому розділі, було сформовано оптимальний набір інструментів для виконання практичної частини дослідження. Для реалізації поставлених завдань було прийнято рішення застосувати комбінований підхід, що включає використання двох ключових програмних продуктів: для проведення натурних вимірювань та аналізу швидкості функціонування реальної мережі обрано програмний комплекс NetSpot, а для виконання математичного моделювання та теоретичних розрахунків параметрів Wi-Fi мережі – середовище MATLAB.

У цьому підрозділі детально розглядаються функціональні можливості, архітектурні особливості та прикладні інструменти обраного програмного забезпечення, які будуть безпосередньо залучені для досягнення цілей наукової роботи.

Першим розглянутим інструментом є NetSpot. Це професійне програмне рішення, розроблене для всебічного аудиту, дослідження та оптимізації бездротових мереж, яке функціонує під управлінням операційних систем сімейства Windows [5]. Цей продукт позиціюється як потужний аналізатор Wi-Fi спектра, здатний перетворити звичайний портативний комп’ютер на професійну станцію моніторингу. Головною умовою функціонування є наявність у ноутбуці (під управлінням Windows 7, 8, 10 або 11) мережевого адаптера, сумісного зі стандартами 802.11a/b/g/n/ac. Програмне забезпечення

повністю підтримує роботу у двох основних частотних діапазонах — два цілих чотири десятих гігагерца та п'ять гігагерців, а також коректно обробляє канали різної ширини, включаючи смуги у двадцять, сорок, вісімдесят та сто шістдесят мегагерців.

Ключовою особливістю NetSpot є здатність у реальному часі сканувати радіоефір, збирати вичерпну інформацію про всі виявлені бездротові мережі та консолідувати ці дані у зручному для сприйняття форматі. Як продемонстровано на рис. 2.1, інтерфейс програми візуалізує параметри точок доступу у вигляді інтерактивної таблиці, що дозволяє досліднику миттєво оцінювати ситуацію. Такий підхід значно спрощує процес діагностики мережевої інфраструктури, надаючи інструменти для аналізу зон покриття, вимірювання реальної пропускної здатності та загальної продуктивності системи. Крім того, програма дозволяє перевіряти коректність конфігурації точок доступу, моніторити рівні корисного сигналу, а також виявляти джерела електромагнітних перешкод та фонового шуму, що є критично важливим для забезпечення стабільного зв'язку.

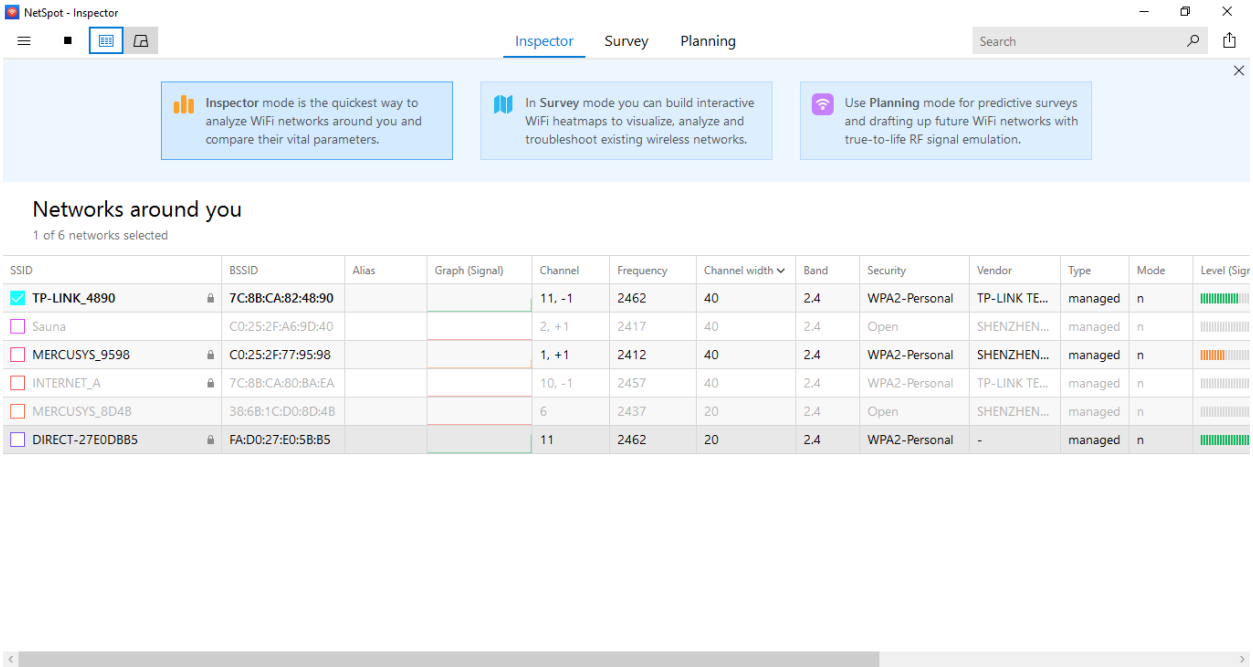


Рисунок 2.1 – Інтерфейс програмного комплексу для моніторингу та візуалізації параметрів бездротових мереж

Важливою складовою функціоналу аналізатора NetSpot є спеціалізований модуль проектування, відомий як інструмент «Planning». Цей режим надає інженеру можливість завантажити або створити деталізований план приміщення, на якому віртуально розміщуються точки доступу. Такий підхід дозволяє змоделювати поширення радіосигналу з урахуванням фізичних перешкод, таких як стіни, двері чи меблі, та виконати прогнозну оцінку швидкості передачі даних у різних точках об'єкта. Головною метою цього процесу є виявлення так званих «мертвих зон» або ділянок із критично низьким рівнем покриття ще на етапі планування. Інтерфейс цього режиму відображено на рис.2.2.

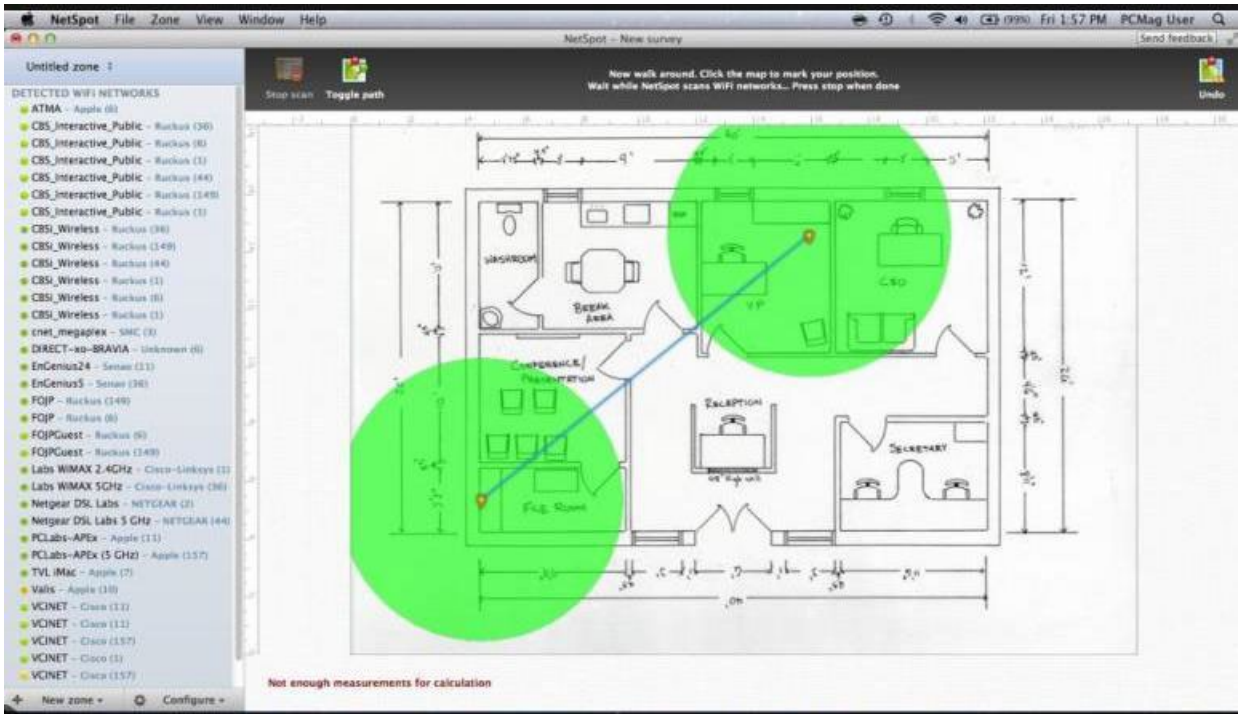


Рисунок 2.2 – Інтерфейс модуля просторового моделювання «Planning» у середовищі NetSpot

Для детального моніторингу стабільності з’єднання використовується інший компонент програми — інструмент аналізу рівня сигналу («Signal level»). Ця функція, візуалізація якої наведена на рис.2.3, дозволяє не лише фіксувати поточні значення потужності радіосигналу (RSSI), але й будувати динамічні графіки зміни цих параметрів у часі. Це дає змогу оцінити

стабільність ефіру та виявити короткочасні падіння сигналу, які можуть бути непомітними при миттєвому вимірюванні.



Рисунок 2.3 – Графічне відображення динаміки рівня сигналу в модулі «Signal level»

Наступним кроком у дослідженні методів моделювання є перехід від інструментів натурного моніторингу до засобів глибокого математичного аналізу. Для цих цілей обрано програмне середовище MATLAB, яке за своїм функціональним наповненням та обчислювальною потужністю значно перевершує можливості моніторингових утиліт на кшталт NetSpot.

Центральним елементом інтерфейсу MATLAB для доступу до спеціалізованих інструментів є вкладка «Apps» (Додатки), представлена на рис.2.4. Вона відкриває доступ до широкого спектра генераторів та інтегрованих наборів інструментів (toolboxes), призначених для синтезу, обробки та дослідження характеристик сигналів різної природи.

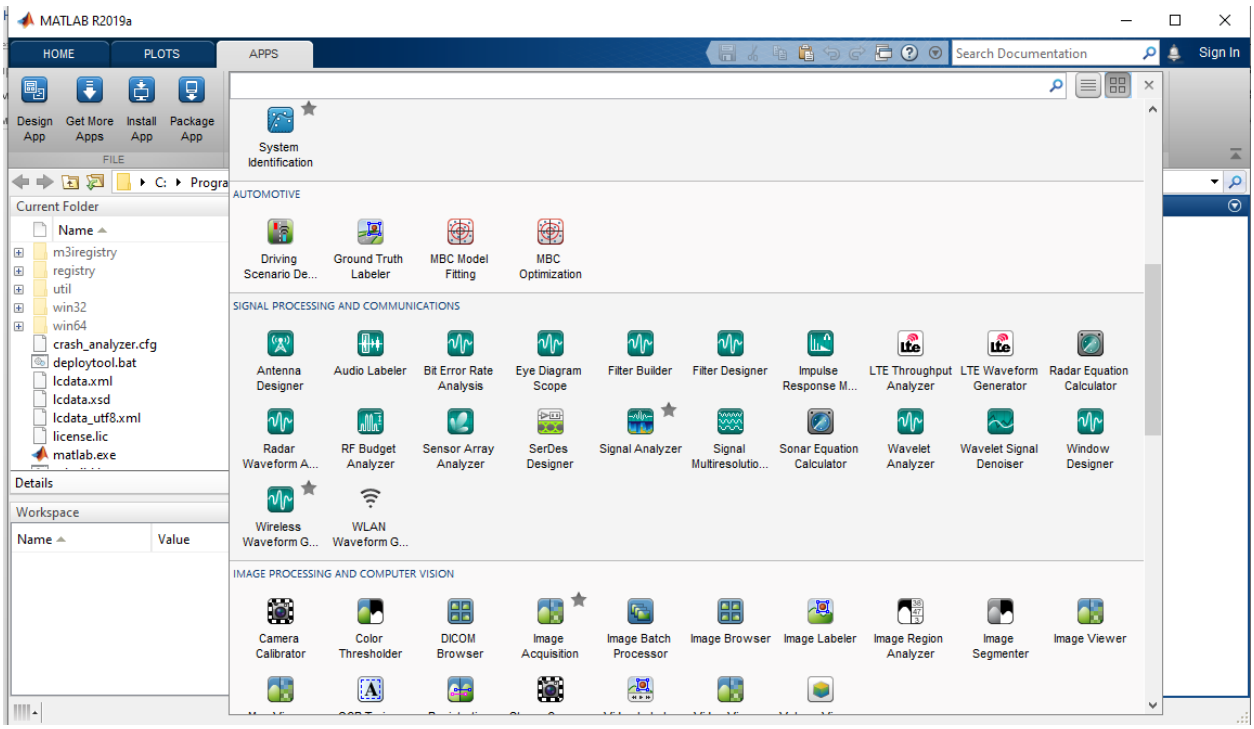


Рисунок 2.4 – Панель навігації за бібліотеками додатків у середовищі MATLAB

Структура бібліотек MATLAB є ієрархічною та охоплює різноманітні галузі науки і техніки. Серед доступних категорій можна виділити інструменти для машинного та глибокого навчання, модулі для математичних обчислень, статистики та вирішення оптимізаційних задач. Окремі групи присвячені проектуванню систем автоматичного керування, автомобільним системам, а також, що найбільш актуально для даної роботи, обробці сигналів та телекомунікаціям. Окрім того, середовище містить засоби для комп'ютерного зору, фінансового моделювання, обчислювальної біології, генерації та верифікації програмного коду, а також інструменти для роботи з базами даних та створення звітності.

З метою реалізації завдань цього дослідження, з великого переліку доступних компонентів групи «Обробка сигналів та зв'язок» було відібрано два ключові інструменти: Wireless Waveform Generator (Генератор бездротових сигналів) та WLAN Waveform Generator (Генератор сигналів локальної мережі). Інтерфейс першого з них продемонстровано на рис.2.5.

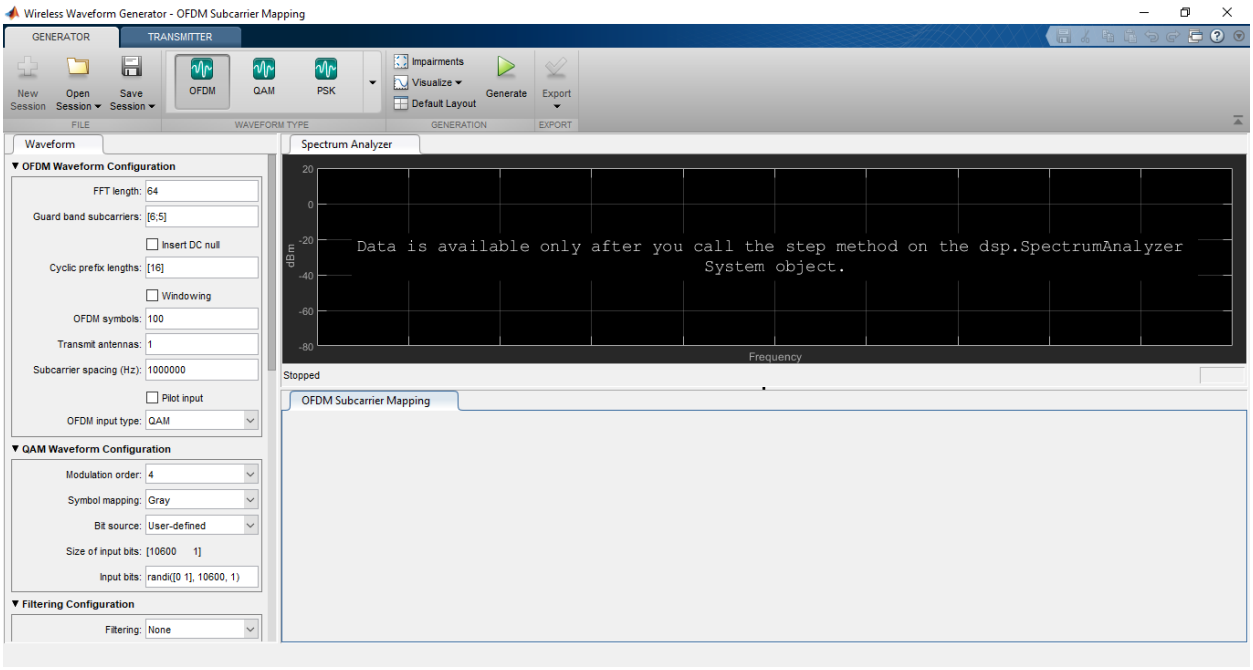


Рисунок 2.5 – Робоче вікно додатка Wireless Waveform Generator

Програма Wireless Waveform Generator є універсальним засобом, що дозволяє не лише створювати модульовані сигнали, але й імітувати їх погіршення під впливом зовнішніх факторів, візуалізувати спектральні характеристики та експортувати отримані дані для подальшого використання. Для генерації сигналів, що відповідають специфікаціям стандарту IEEE 802.11 (WLAN), цей додаток використовує функціональні можливості спеціалізованої бібліотеки WLAN Toolbox.

Бібліотека WLAN Toolbox є комплексним набором функцій, що забезпечують повну відповідність стандартам при проектуванні, симуляції та тестуванні бездротових локальних мереж. Вона дозволяє моделювати фізичний рівень системи, налаштовувати параметри передавача, каналу зв’язку та приймача. Функціонал включає алгоритми канального кодування, різні типи модуляції, просторове відображення потоків та реалізацію технології MIMO. Крім того, інструментарій містить готові еталонні проекти, що дозволяють проводити як моделювання на рівні базової смуги частот, так і комплексні системні симуляції. Користувач отримує можливість генерувати та аналізувати кадри MAC-рівня, вимірювати потужність каналу, перевіряти

спектральну маску та оцінювати зайняту смугу пропускання. Важливим аспектом є можливість дослідження впливу радіочастотних трактів та інтерференції на загальну продуктивність мережі, а також підтримка роботи з апаратними платформами (SDR) для перевірки розроблених алгоритмів у реальному ефірі.

Спеціалізований додаток WLAN Waveform Generator, рис.2.6 фокусується на створенні, спотворенні та аналізі сигналів, специфічних для стандартів родини IEEE 802.11.

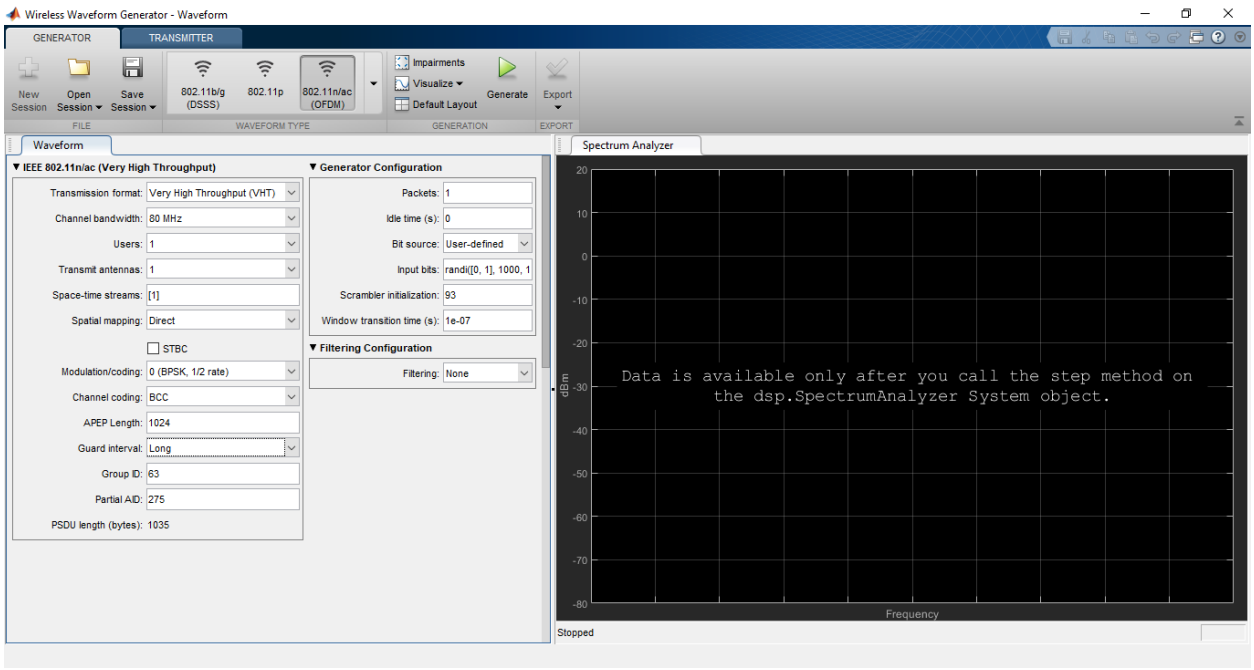


Рисунок 2.6 – Інтерфейс додатка WLAN Waveform Generator

Цей інструмент базується на можливостях Wireless Waveform Generator, але попередньо налаштований саме для генерації WLAN-сигналів. Його функціонал дозволяє синтезувати сигнали широкого спектра стандартів, включаючи застарілі 802.11b/g/a та сучасні 802.11n/ac/ax, а також специфічні версії 802.11ad/ah/p. Згенеровані параметри можуть бути експортовані у вигляді скриптів MATLAB або блоків для середовища Simulink. Для глибокого аналізу передбачено різноманітні засоби візуалізації: осцилограми у часовій області, спектральні аналізатори, діаграми сузір’я (Constellation Diagram) та

графіки інтегральної функції розподілу (CCDF). Для новітніх стандартів, таких як 802.11ax, доступна візуалізація розподілу ресурсних одиниць (RU) та піднесучих частот. Особливу цінність для дослідника становить можливість наближення моделі до реальних умов шляхом додавання радіочастотних спотворень. До них належать адитивний білий гаусів шум (AWGN), фазові та частотні зміщення, зміщення постійної складової (DC offset), дисбаланс квадратурних складових (IQ imbalance) та ефекти нелінійності підсилювачів. Окрім віртуального моделювання, створені сигнали можуть бути фізично передані через підключені генератори сигналів або радіопередавачі.

2.2 Методологія імітаційного моделювання адаптивних алгоритмів керування швидкістю передачі даних

У рамках виконання магістерської роботи було визначено стратегію математичного моделювання, ключовою метою якої є аналіз швидкісних характеристик бездротової мережі Wi-Fi. Модель базується на дослідженні взаємозалежності трьох фундаментальних параметрів: пропускної здатності каналу, робочої частоти та співвідношення сигнал/шум (SNR). Основний акцент у дослідженні зроблено на моделюванні механізму динамічного керування швидкістю (Rate Control), що реалізується через адаптивну зміну схеми модуляції та кодування (Modulation and Coding Scheme — MCS). Цей процес розглядається в умовах функціонування частотно-селективного каналу, який піддається впливу багатопроменевого завмирання сигналу, що є типовим для реальних умов експлуатації.

Специфікація стандарту IEEE 802.11 передбачає можливість динамічної адаптації швидкості шляхом вибору оптимального індексу MCS для кожного окремого пакета даних, спираючись на поточний стан радіоканалу. Оскільки умови розповсюдження радіохвиль постійно змінюються внаслідок фізичного

переміщення об'єктів або абонентів, а також через інтерференційні явища, максимізація пропускної здатності вимагає миттєвої реакції системи. Варто зазначити, що стандарт не регламентує конкретний алгоритм адаптації швидкості (Rate Control Algorithm — RCA), залишаючи вибір конкретної реалізації за виробниками обладнання. У даному науковому дослідженні застосовано модель із замкнутим контуром керування. Суть методу полягає в тому, що приймальна сторона розраховує рекомендоване значення MCS, яке стає доступним передавачу миттєво, без урахування затримок на передачу службової інформації, що є припустимим спрощенням для математичної моделі. У реальних фізичних системах цей процес відбувається через обмін спеціальними кадрами керування. Таким чином, індекс MCS коригується для кожного наступного пакета, реагуючи на флуктуації потужності шуму та зміни умов у каналі.

Алгоритм моделювання передбачає проходження сформованої хвильової форми через модель каналу типу TGac з додаванням шумової складової. На приймальній стороні відбувається синхронізація та декодування пакета для відновлення блоку даних служби протоколу (PSDU). На цьому етапі здійснюється оцінка SNR, отримане значення порівнюється із заданими пороговими рівнями, що дозволяє визначити найбільш ефективну схему модуляції для наступної транзакції. Логіка обробки даних візуалізована на схемі алгоритму.

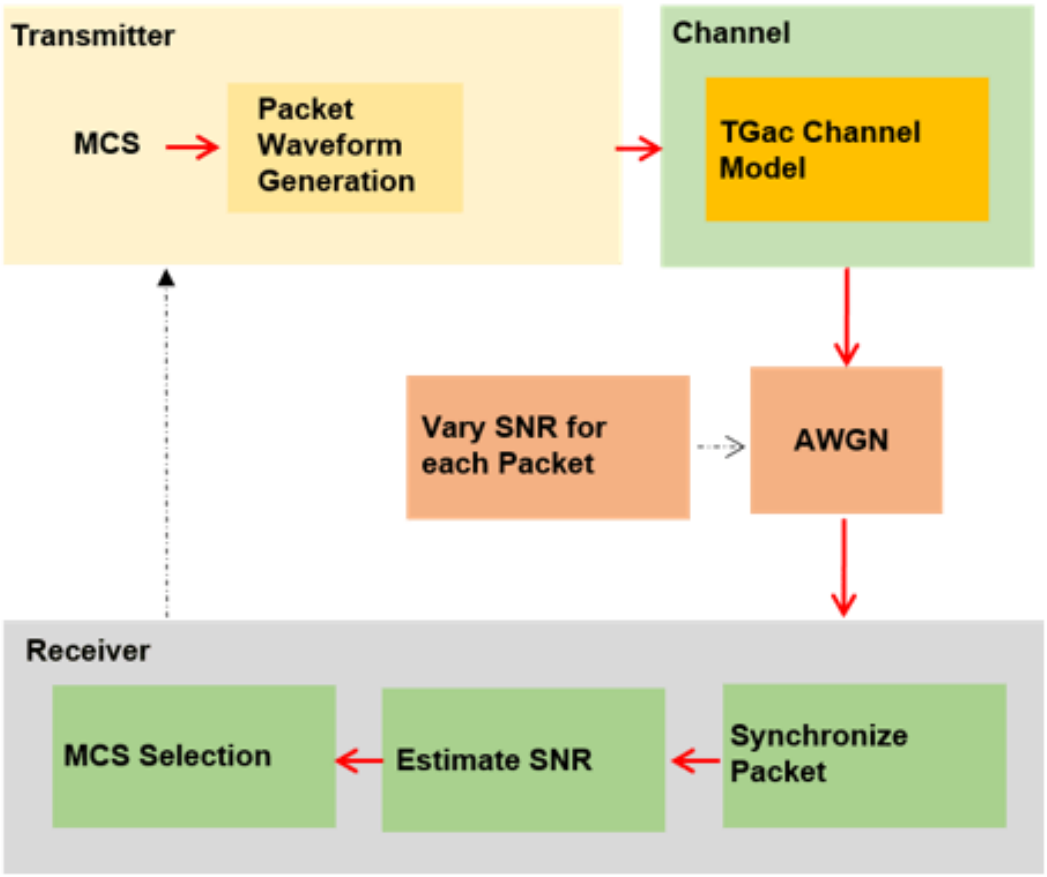


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритму покрокової обробки пакетів у середовищі моделювання

Процедура обробки інформаційного потоку є циклічною і складається з послідовності взаємопов'язаних етапів, які в моделі реалізовані як безперервний процес. На початковому етапі генерується та кодується блок PSDU, що формує сигнал окремого пакета. Для імітації реального трафіку між послідовними пакетами вводиться фіксований інтервал простою. Далі сигнал проходить через емульований канал TGac, параметри якого динамічно змінюються в часі. Для наближення умов до реальності до сигналу додається адитивний білий гаусів шум (AWGN), рівень якого розраховується таким чином, щоб забезпечити цільове середнє значення SNR на кожну активну піднесучу після процедури OFDM-демодуляції.

Центральним елементом обробки є спеціалізована локальна функція, яка емулює проходження сигналу через канал, виконує операції приймача та розраховує параметри якості сигналу. Із прийнятої хвильової форми

виокремлюється поле довгого навчального поля надвисокої пропускної здатності (VHT-LTF). Після його демодуляції здійснюється оцінка характеристик каналу передачі. Наступним кроком є екстракція поля даних VHT із синхронізованого сигналу. Використовуючи пілот-сигнали з демодульованих даних та попередню оцінку каналу, система розраховує рівень шуму. Фінальний етап циклу полягає у порівнянні розрахованого SNR з пороговими значеннями адаптації, на основі чого приймається рішення про корекцію MCS для наступного пакета, після чого блок PSDU повністю відновлюється з поля даних.

Логічним продовженням моделювання є етап практичної генерації сигналів, що відповідають специфікаціям IEEE 802.11. У подальших розділах роботи буде детально продемонстровано методику використання інструментарію WLAN Waveform Generator для створення еталонних сигналів. Цей процес необхідний для отримання хвильових форм із чітко детермінованими характеристиками, які базуються на результатах попередніх вимірювань та розрахунків. До переліку критично важливих параметрів, що задаються при генерації, належать робоча частота, номер каналу, тип модуляції та алгоритм кодування, що дозволяє верифікувати теоретичні моделі на практиці.

2.3 Алгоритмізація процесу моделювання пропускної здатності бездротового каналу

Процес побудови адекватної математичної моделі для оцінки швидкісних характеристик мережі стандарту 802.11 є багатокомпонентним завданням, яке вимагає чіткої послідовності дій. Структурно цей процес можна розділити на чотири ключові етапи, кожен з яких відповідає за налаштування окремої підсистеми моделі.

Першочерговим етапом є конфігурація параметрів сигналу. Логіка цього процесу візуалізована у вигляді алгоритму на рис.2.8. На цьому кроці здійснюється детальне налаштування фізичних властивостей бездротової передачі, що є необхідним для максимізації продуктивності системи, гарантування безпеки даних та загальної оптимізації з'єднання. Сюди входить вибір стандарту (наприклад, 802.11ac або ax), визначення ширини смуги пропускання, типу захисного інтервалу та формату кадру.



Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритму налаштування параметрів тестового сигналу

Наступна фаза моделювання стосується конфігурації каналу передачі даних, принцип реалізації якої відображено на рисунку 2.9. У контексті імітаційного моделювання, конфігурація каналу виходить за межі простого вибору частотного діапазону. Вона передбачає визначення радіочастотного середовища, через яке відбувається трансляція сигналів між точкою доступу (маршрутизатором) та абонентськими терміналами. На цьому етапі задаються математичні моделі загасання, багатопроменевого поширення та часових затримок, що дозволяє емулювати реальні фізичні умови ефіру.

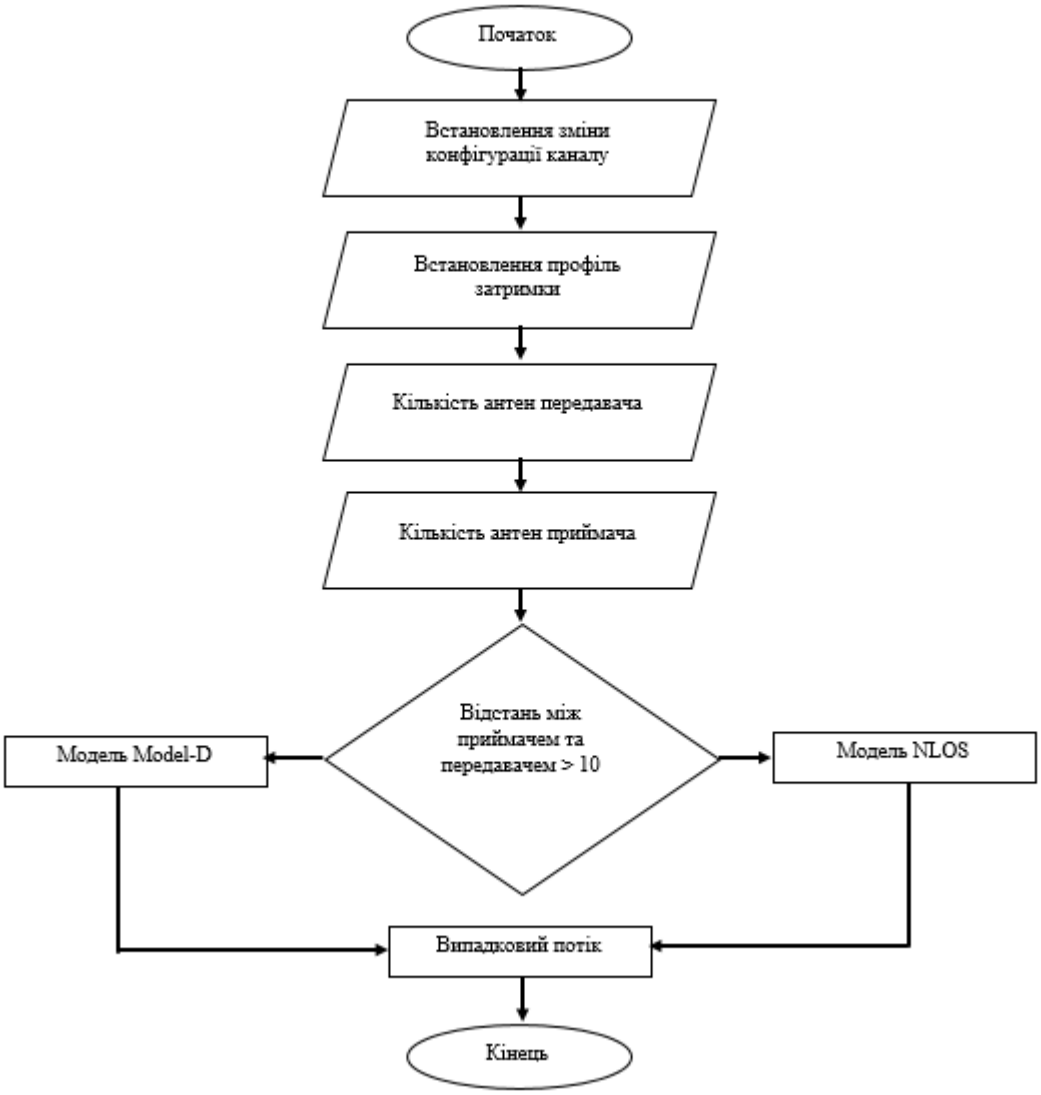


Рисунок 2.9 – Алгоритм визначення характеристик каналу поширення радіохвиль

Третім важливим кроком є встановлення параметрів механізму керування швидкістю (Rate Control). Відповідний алгоритм налаштування представлено на рисунку 2.10. Цей етап відповідає за логіку адаптації системи до змін у каналі, визначаючи порогові значення співвідношення сигнал/шум (SNR), при яких відбувається перемикання між різними схемами модуляції та кодування (MCS). Правильне налаштування цих параметрів є критичним для забезпечення балансу між швидкістю передачі та надійністю з’єднання.

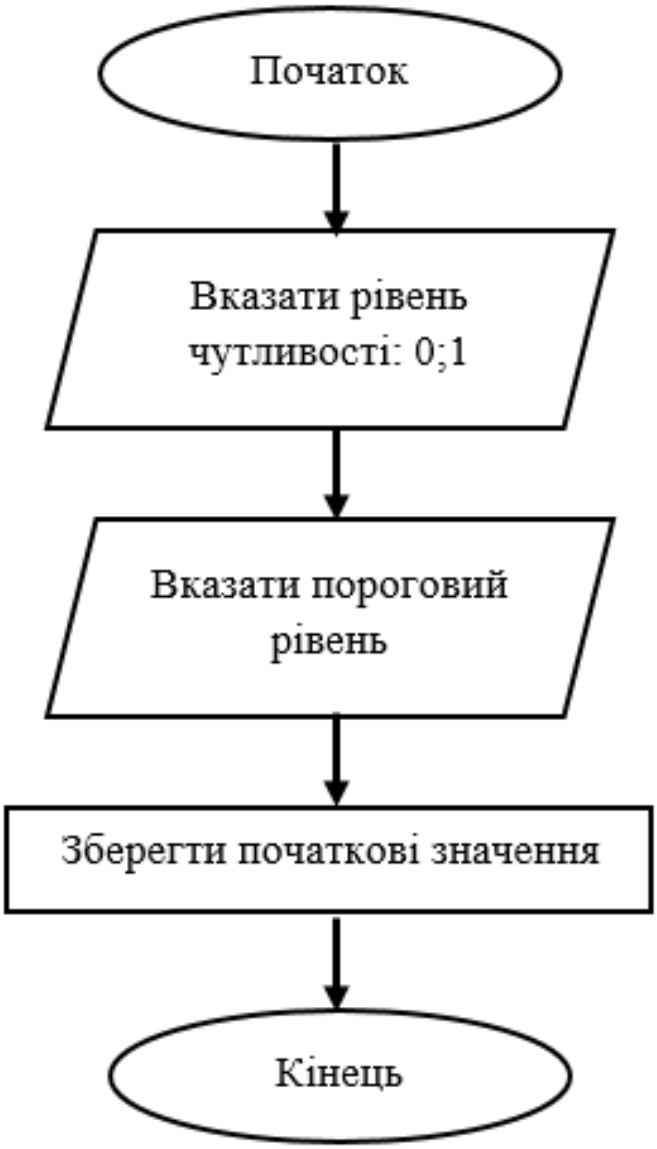


Рисунок 2.10 – Схема алгоритму ініціалізації параметрів адаптивного керування швидкістю

Завершальним етапом підготовки є вибір глобальних параметрів моделювання, алгоритм якого наведено на рисунку 2.11. Ці параметри визначають загальні специфікації експерименту, такі як тривалість симуляції, кількість пакетів для передачі, розмір корисного навантаження та умови зупинки моделювання. Вони слугують основою для оптимізації дослідження, дозволяючи оцінити ефективність, безпеку та продуктивність мережі у конкретному змодельованому середовищі.



Рисунок 2.11 – Алгоритм вибору сценаріїв та параметрів імітаційного процесу

Саме на основі послідовної реалізації цих чотирьох кроків будуть побудовані комплексні моделі швидкості роботи мережі, результати яких наведені у наступних розділах. Для верифікації отриманих теоретичних даних та порівняння їх з реальними показниками, також передбачено проведення серії натурних вимірювань. За допомогою програмного аналізатора NetSpot буде здійснено заміри реальної швидкості та параметрів Wi-Fi мережі у різних просторових позиціях досліджуваного об'єкта, що дозволить оцінити коректність роботи розроблених математичних моделей.

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ ТА АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ

3.1 Методика синтезу еталонних сигналів стандарту IEEE 802.11 з використанням інструментарію WLAN Waveform Generator

У даному підрозділі детально описується процес формування тестового радіосигналу, що відповідає специфікаціям стандарту IEEE 802.11. Для реалізації цього завдання застосовано спеціалізований програмний модуль WLAN Waveform Generator, який входить до складу середовища MATLAB. Процедура генерації еталонного сигналу є критично важливим етапом дослідження, оскільки вона дозволяє змоделювати умови передачі даних та оцінити потенційну ефективність мережі без необхідності розгортання фізичного обладнання на початкових стадіях. Такий підхід дає можливість визначити граничні показники пропускної здатності та швидкодії системи, імітуючи різні сценарії експлуатації, включаючи передачу даних на значні відстані та вплив канальних ефектів.

Для початку роботи з інструментом необхідно у головному вікні середовища MATLAB перейти на вкладку додатків («Apps») та у відповідній секції локалізувати і запустити додаток WLAN Waveform Generator. Цей процес ілюструється на рис.3.1. Зазначений інструмент попередньо сконфігурований розробниками для коректного синтезу сигналів бездротових локальних мереж.

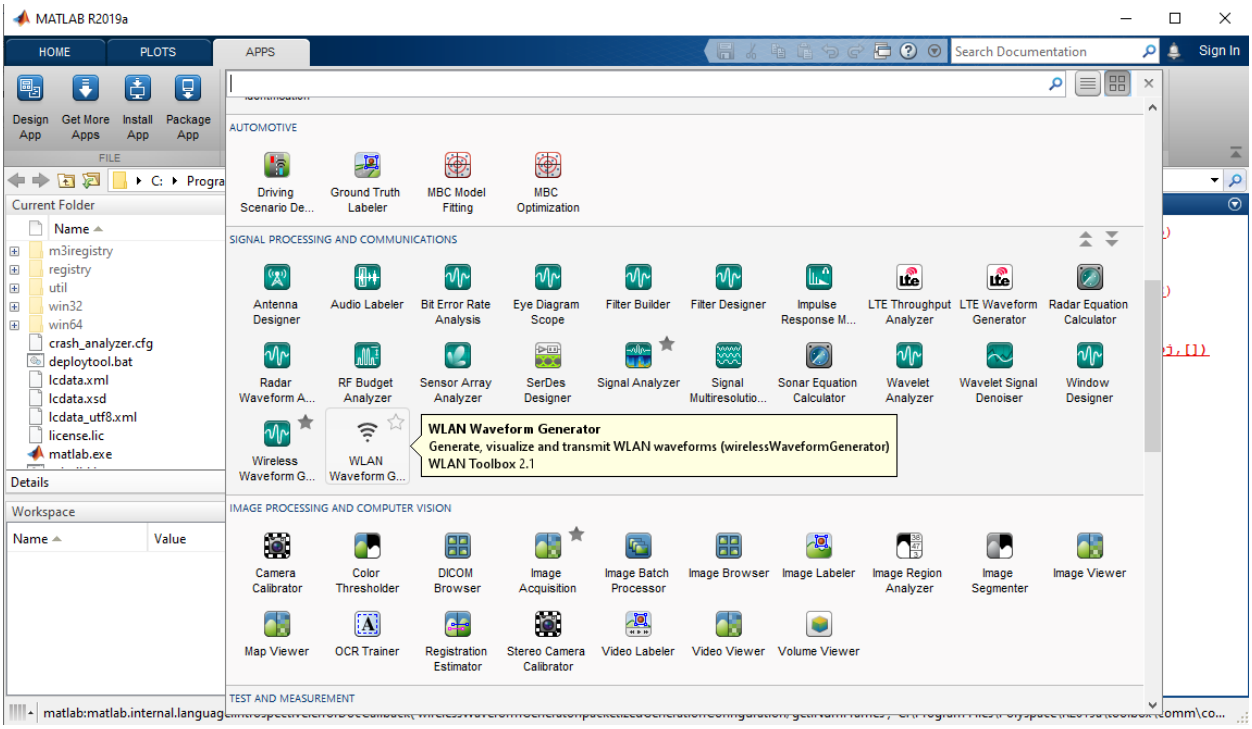


Рисунок 3.1 – Локалізація та запуск додатка WLAN Waveform Generator у середовищі MATLAB

Інтерфейс програми, що відкривається після запуску, має складну структуру, розділену на кілька функціональних зон, кожна з яких відповідає за налаштування окремих параметрів моделі. Центральне місце займає область спектрального аналізу, візуалізована на рис.3.2, яка дозволяє контролювати частотні характеристики вихідного сигналу в реальному часі.

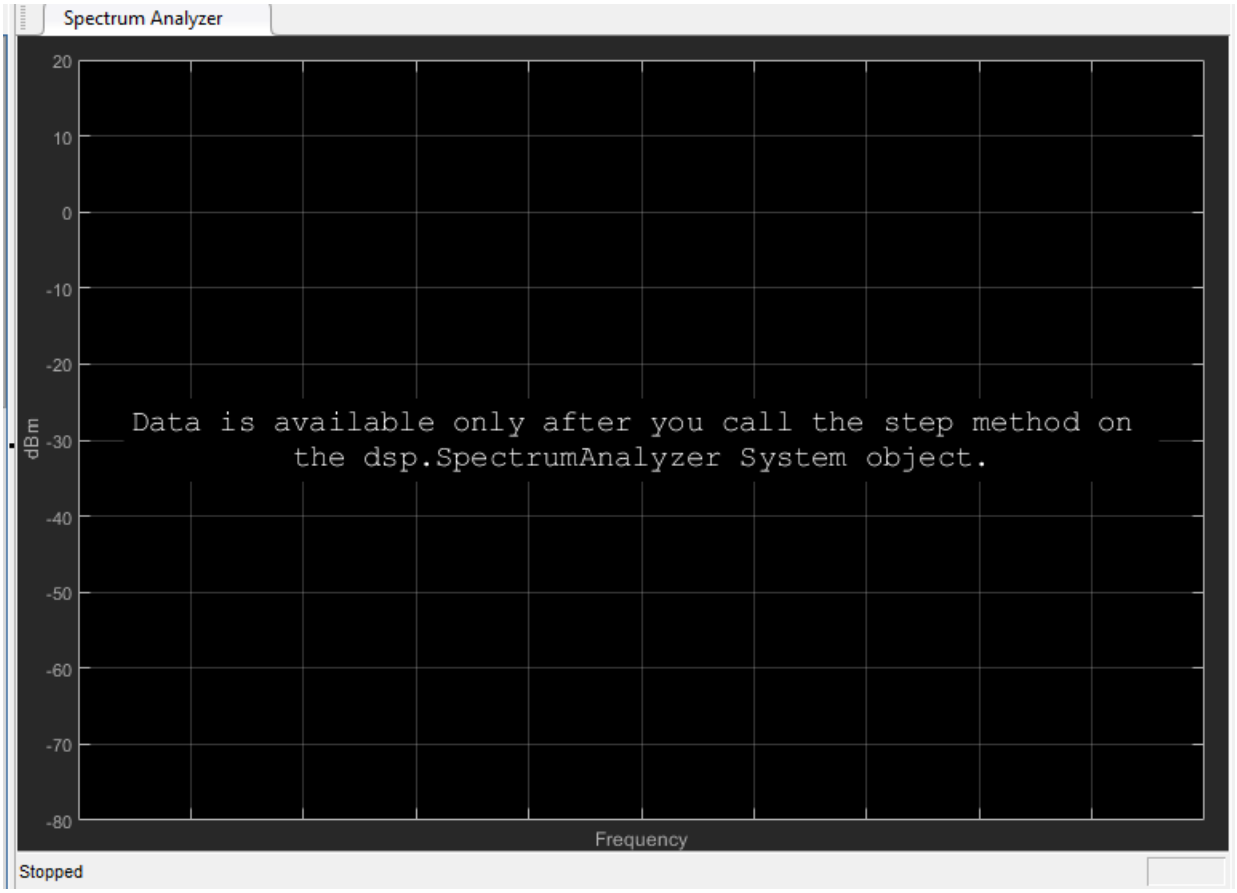


Рисунок 3.2 – Область візуалізації спектральних характеристик сигналу (Spectrum Analyzer)

Наступним важливим блоком є модуль конфігурації фільтрів, рис.3.3, який дозволяє налаштовувати параметри фільтрації для формування необхідної спектральної маски.

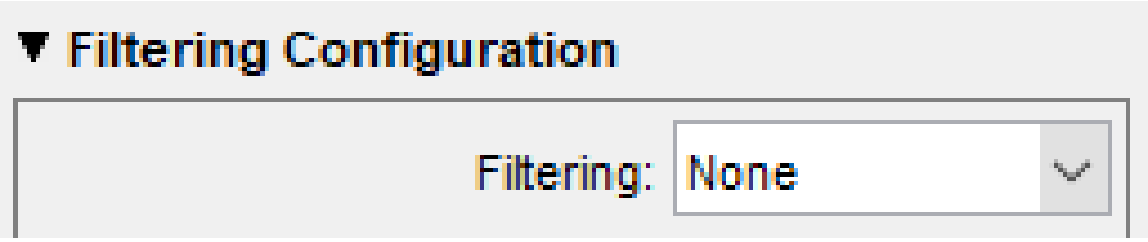


Рисунок 3.3 – Модуль конфігурації фільтрів

Окремої уваги заслуговує генератор конфігурацій, рис.3.4. Цей блок інтерфейсу відповідає за часові та кількісні параметри передачі. У ньому користувач визначає загальну кількість пакетів у черзі, тривалість пауз між

ними (час простою), а також джерело бітів даних (наприклад, псевдовипадкова послідовність). Тут також задаються вхідні бітові послідовності, початкове значення для ініціалізації скремблера, що забезпечує рандомізацію даних, та час переходу вікна, що впливає на спектральні властивості сигналу.

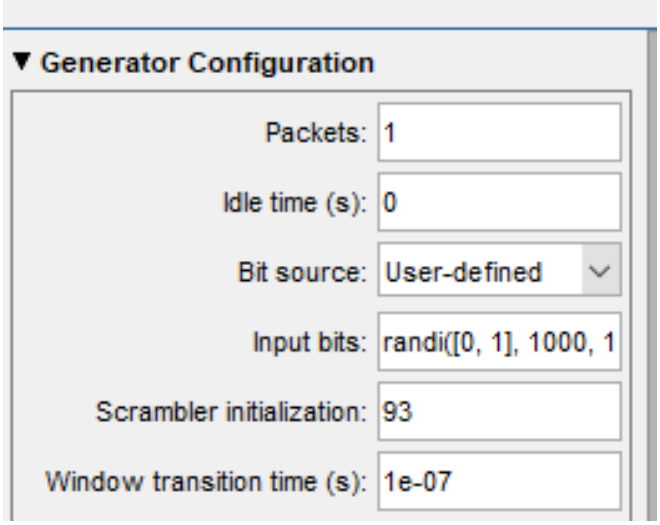


Рисунок 3.4 – Панель налаштування часових параметрів та конфігурації пакетів

Найбільш об’ємним за кількістю параметрів є поле введення характеристик фізичного рівня сигналу IEEE 802.11, представлене на рис.3.5. Ця секція дозволяє детально налаштувати формат кадру, вказати ширину смуги пропускання каналу, визначити кількість активних користувачів та кількість передавальних антен. Крім того, тут задаються параметри просторово-часових потоків, метод просторового відображення (наприклад, матриця перетворень), тип модуляції та схема кодування (MCS), алгоритм канального кодування (наприклад, BCC або LDPC). Також у цьому блоці регулюються довжина поля APEP, тип захисного інтервалу (Guard Interval), ідентифікатор групи, параметри часткової допомоги (Partial AID) та розмір блоку даних служби протоколу (PSDU) у байтах.

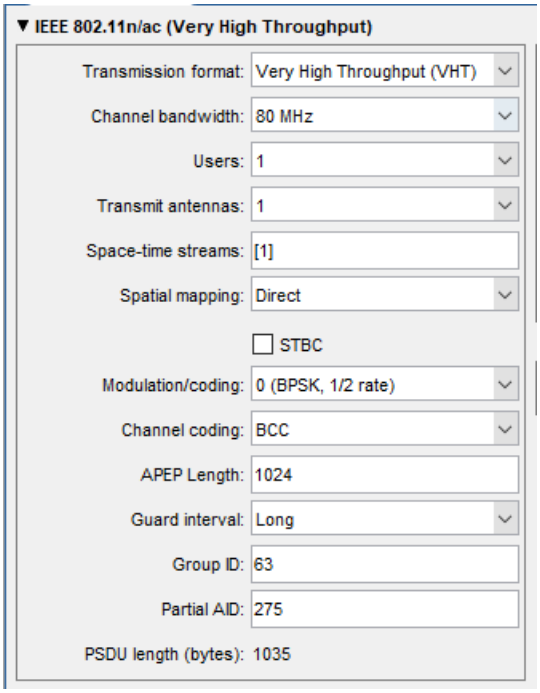


Рисунок 3.5 – Інтерфейс конфігурації фізичних параметрів каналу та формату кадру IEEE 802.11

Верхня панель інструментів, зображена на рис.3.6, містить елементи керування для вибору конкретної специфікації стандарту. Користувач може обрати один із підтримуваних типів сигналів, таких як новітні 802.11ax/ah/ad, поширені 802.11n/ac, або застарілі, але все ще актуальні для певних задач 802.11a/b/g/p.

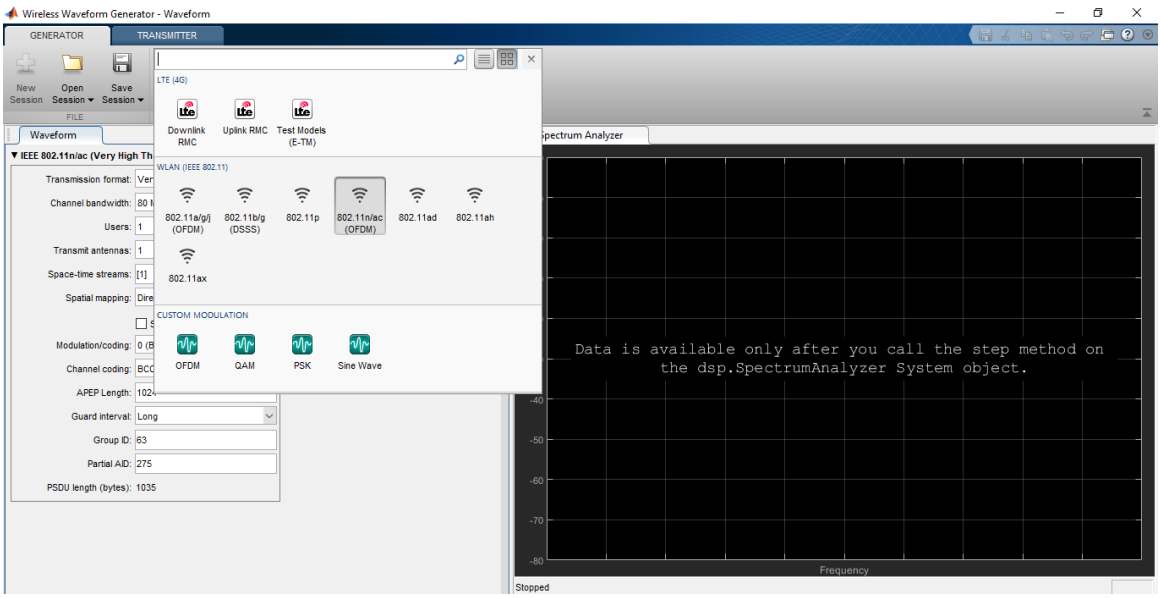


Рисунок 3.6 – Меню вибору сімейства стандартів бездротового зв’язку

Для глибшого аналізу синтезованого сигналу програма надає можливості розширеної візуалізації. У розділі налаштувань відображення можна активувати додаткові діагностичні інструменти. Зокрема, встановлення відповідних прапорців ініціює появу двох додаткових вікон: осцилографа («Time Scope») для аналізу сигналу в часовій області та діаграми сузір'я («Constellation diagram») для оцінки якості модуляції. Загальний вигляд робочого простору з активованими засобами візуалізації продемонстровано на рис.3.7.

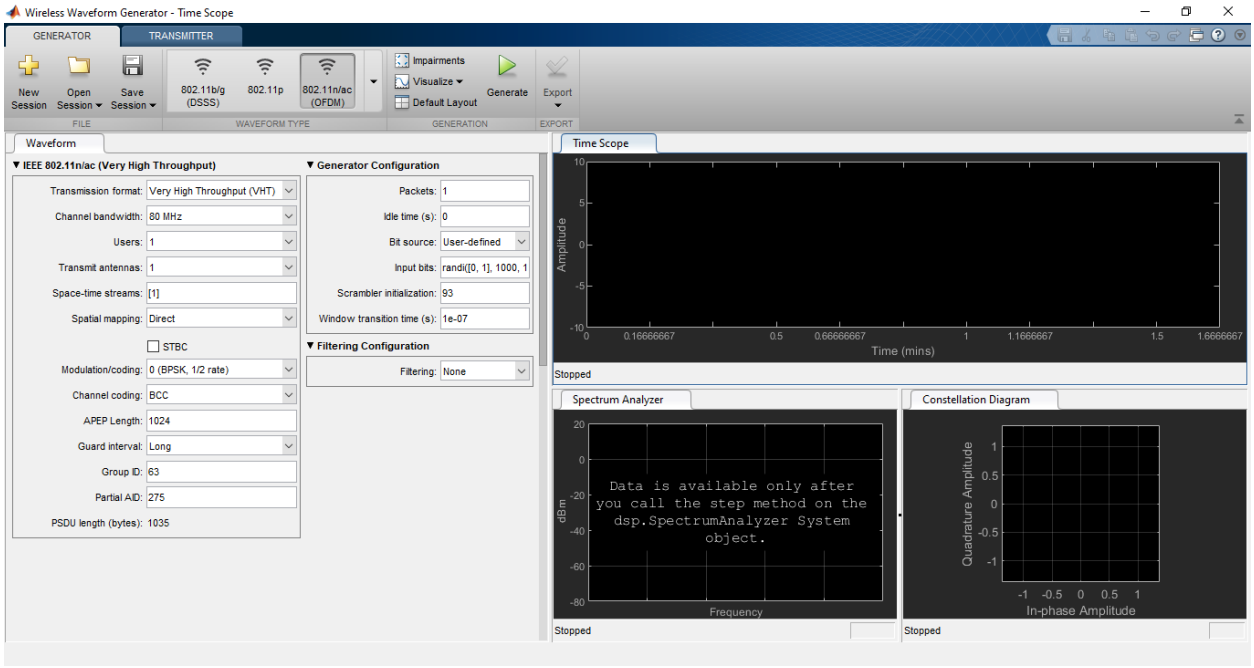


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд робочого простору програми з активованими вікнами візуалізації

Безпосередній процес дослідження розпочинається з вибору цільового стандарту. На панелі інструментів встановлюється PHY-формат сигналу типу IEEE 802.11n/ac, оскільки цей стандарт є оптимальним компромісом між поширеністю та продуктивністю для цілей даної роботи. Наступним етапом є точне налаштування параметрів передачі на лівій панелі у вкладці «Форма сигналу», а також додавання можливих спотворень та налаштування візуалізації у розділі «Generation».

Для проведення експерименту було задано наступні параметри: формат передачі обрано як High Throughput (VHT), що відповідає стандарту 802.11ac; ширина смуги пропускання встановлена на рівні 40 МГц. Конфігурація антенної системи передбачає використання двох передавальних антен при одному просторово-часовому потоці, без використання додаткових потоків розширення. Як метод просторового відображення обрано перетворення Фур'є. Схема модуляції та кодування (MCS) встановлена на індекс 0, що відповідає бінарній фазовій маніпуляції (BPSK) зі швидкістю кодування 1/2 та одним просторовим потоком. Захисний інтервал обрано довгим (Long GI) для підвищення стійкості до міжсимвольної інтерференції, тип канального кодування — згортковий код (BCC), а розмір корисного навантаження PSDU зафіксовано на рівні 1024 байти.

Параметри генератора пакетів налаштовано наступним чином: генерується серія з 10 пакетів без пауз (час простою дорівнює нулю). Як вхідні дані використовується псевдовипадкова послідовність бітів PN9. Початкове значення скремблера встановлено на 100, а час переходу вікна визначено як одна мікросекунда (1e-06 с), що дозволяє згладити переходи між символами.

Фіналізація процесу налаштування завершується натисканням кнопки «Generate» на панелі керування. Після цього програмний алгоритм розпочинає обробку вхідних даних та синтез цифрового сигналу. Результат генерації хвильової форми стандарту IEEE 802.11n/ac, готової для подальшого аналізу та проходження через модель каналу, відображено на рис.3.8.

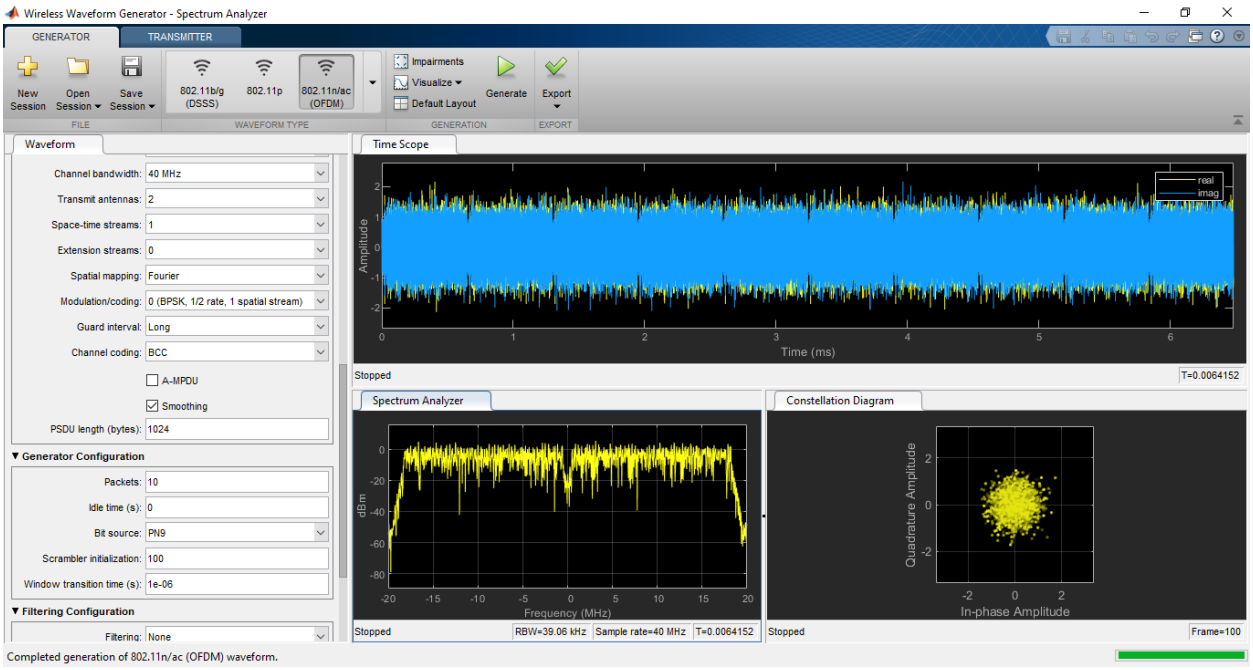


Рисунок 3.8 – Графічне представлення результатів генерації тестового сигналу стандарту IEEE 802.11n/ac

Результатом роботи алгоритму генерації є набір графічних залежностей, які дозволяють всебічно оцінити параметри синтезованого радіосигналу. Перша діаграма комплексу візуалізації демонструє розгортку сигналу в часовій області. Вікно спостереження на цьому графіку охоплює часовий інтервал тривалістю шість десятитисячних секунди (0,0006 с). Цей графік є фундаментальним для аналізу імпульсної природи передачі даних у мережах Wi-Fi, дозволяючи досліднику детально розглянути структуру пакетів, оцінити форму огинаючої сигналу, а також ідентифікувати захисні інтервали та преамбули, що передують корисному навантаженню.

Наступним критично важливим інструментом діагностики є вікно спектрального аналізатора («Spectrum Analyzer»). На цьому графіку відображається залежність енергетичних характеристик сигналу від частоти. Зокрема, візуалізується спектральна щільність потужності, де по вертикальній осі відкладається рівень потужності, виражений у децибел-міліватах (дБм), а по горизонтальній осі — частотний діапазон у мегагерцах (МГц). Таке представлення дає змогу перевірити відповідність згенерованого сигналу

спектральні масці стандарту, оцінити ширину займаної смуги частот, а також проаналізувати рівномірність розподілу енергії між ортогональними піднесучими частотами та рівень бічних пелюсток спектра.

Третій графічний інструмент — діаграма сузір’я («Constellation diagram») — слугує для візуалізації фазово-амплітудних параметрів модуляції на комплексній IQ-площині. Графік будується шляхом відображення відношення квадратурної складової амплітуди (вісь Y) до синфазної складової (вісь X). Кожна точка на цій діаграмі відповідає конкретному символу закодованої інформації. Важливо зазначити, що топологія цього графіка є динамічною і суттєво змінюється залежно від архітектури системи передачі: збільшення кількості передавальних антен або числа одночасних користувачів (у режимах MU-MIMO) призводить до ускладнення структури сузір’я. Чіткість розташування точок дозволяє візуально оцінити якість модуляції та рівень шумів у каналі ще до етапу демодуляції.

3.2 Програмна реалізація алгоритмів адаптації та конфігурація каналу передачі

Фундаментальним етапом у процесі оцінювання реальної швидкості передачі даних у мережах Wi-Fi є створення адекватної програмної моделі, яка враховує параметри сигналу стандарту VHT (Very High Throughput). У середовищі MATLAB цей процес розпочинається з ініціалізації об’єкта конфігурації wlanVHTConfig, який визначає ключові фізичні властивості передачі. У рамках даного дослідження базові налаштування передбачають використання смуги пропускання каналу шириною сорок мегагерців та однієї передавальної антени. Початкова схема модуляції та кодування (MCS) встановлюється на рівні індексу 1 (QPSK зі швидкістю кодування 1/2), проте важливою особливістю моделі є те, що цей параметр не є статичним: він

динамічно змінюється алгоритмом у процесі симуляції для кожного наступного пакета залежно від умов у каналі.

Наступним критично важливим кроком є математичний опис середовища поширення сигналу. Для наближення експерименту до реальних умов експлуатації використовується модель каналу TGac із профілем затримки Model-D. Ця модель специфічно розроблена для сценаріїв, де відстань між передавачем та приймачем становить десять метрів або більше, і при цьому відсутня пряма видимість між антенами (Non-Line-of-Sight, N-LOS). Такий підхід дозволяє врахувати ефекти багатопроменевого поширення та завмирання сигналу, що неминуче виникають у приміщеннях.

Для забезпечення адаптивності системи необхідно інтегрувати алгоритм керування швидкістю (Rate Control Algorithm — RCA). Традиційні алгоритми спираються на метрики якості каналу, такі як співвідношення сигнал/шум (SNR) або частота помилкових пакетів. У розробленій моделі застосовано підхід, що базується на оцінці SNR кожного прийнятого пакета. Логіка роботи полягає у порівнянні миттєвого значення SNR із заздалегідь визначеними пороговими рівнями. Якщо якість сигналу перевищує встановлений поріг, система приймає рішення про підвищення індексу MCS для наступної транзакції, що збільшує швидкість передачі. Для запобігання хаотичним перемиканням швидкості (так званому «тремтінню» параметрів) впроваджено механізм гістерезису за допомогою параметрів rcaAttack та rcaRelease. Підвищення схеми модуляції відбувається лише тоді, коли SNR перевищує суму порогового значення та параметра атаки, а зниження — коли SNR падає нижче різниці порогу та параметра спаду. У даному дослідженні налаштування обрано таким чином, щоб забезпечити консервативну стратегію підвищення швидкості та агресивну реакцію на погіршення умов, що мінімізує втрати пакетів.

Після налаштування базових алгоритмів визначаються глобальні параметри симуляції. Експеримент передбачає передачу фіксованої кількості пакетів (numPackets) через модельований канал TGac із введенням фіксованих

інтервалів простою між ними. Важливою деталлю є те, що стан каналу зберігається протягом усього часу моделювання, що забезпечує повільну, реалістичну еволюцію умов поширення хвиль. Це призводить до плавних змін кінцевого співвідношення сигнал/шум на стороні приймача.

Для дослідження стійкості алгоритму до флуктуацій шуму передбачено два режими роботи, які регулюються параметром walkSNR. У першому режимі (значення true) активується генератор випадкового блукання, який штучно варіює потужність шуму для кожного пакета, змушуючи SNR коливатися в діапазоні від чотирнадцяти до тридцяти трьох децибел. У другому режимі (значення false) потужність шуму залишається фіксованою, і варіації SNR обумовлені виключно фізичними процесами у каналі TGac (завмираннями).

Процес обробки кожного інформаційного пакета реалізовано як послідовний ланцюг операцій. Спочатку формується блок даних служби протоколу (PSDU), який кодується у відповідну хвильову форму. Між пакетами програмно додається час простою, що становить пів мілісекунди. Далі сигнал проходить крізь математичну модель каналу, що еволюціонує в часі. До спотвореного каналом сигналу додається адитивний білий гаусів шум (AWGN) необхідної потужності. Приймальна частина моделі, реалізована у функції processPacket, виконує синхронізацію та виділення довгого навчального поля (VHT-LTF) для оцінки параметрів каналу. На основі пілот-сигналів здійснюється оцінка рівня шуму та розрахунок поточного SNR. Саме це значення стає вхідним аргументом для алгоритму адаптації, який визначає MCS для наступного пакета. Завершується цикл відновленням переданої інформації з поля VHT-Data.

Варто зазначити, що модель містить низку спрощень: пропускна здатність і конфігурація антен залишаються незмінними, а зворотний зв’язок про зміну MCS вважається миттєвим та ідеальним, тобто передавач дізнається про нові параметри без затримок на передачу службових кадрів.

Фінальним етапом дослідження є візуалізація та аналіз отриманих метрик: індексу модуляції (MCS), співвідношення сигнал/шум (SNR), бітової помилки (BER) та ефективної пропускної здатності.

На підсумкових графіках чітко простежується кореляція між якістю каналу та обраною швидкістю передачі. Вибір схеми модуляції напряму залежить від оціненого SNR: при зростанні якості сигналу алгоритм перемикається на вищі індекси MCS, що максимізує пропускну здатність. Розрахунок реальної пропускної здатності здійснюється методом ковзного вікна довжиною у три пакети, що дозволяє згладити миттєві флуктуації. На графіках можна спостерігати характерні провали продуктивності, які виникають у двох випадках: при вимушеному зниженні індексу MCS через погіршення умов або при виникненні пакетних помилок.

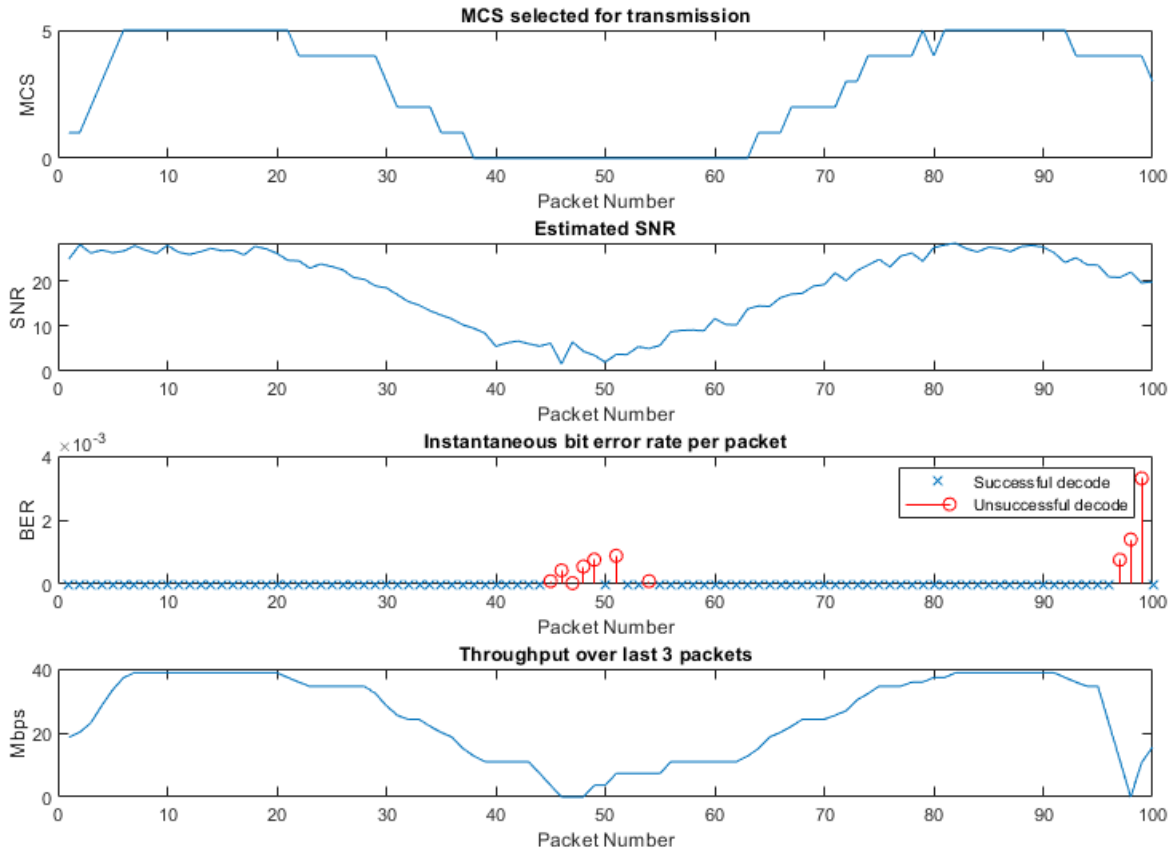


Рисунок 3.9 – Результати моделювання динаміки швидкості передачі даних у мережі Wi-Fi

Результати, наведені на рис.3.9, демонструють ефективність схеми керування із замкнутим контуром. Зміни MCS відбуваються синхронно зі змінами SNR, при цьому параметри гістерезису (rcaAttack та rcaRelease) ефективно фільтрують шум вимірювань, запобігаючи надто частим перемиканням. Експериментально встановлено, що збільшення параметра rcaRelease робить систему більш інертною: зниження швидкості при погіршенні умов відбувається повільніше, що, хоч і підтримує миттєву швидкість, призводить до зростання кількості помилок (BER).

Додатковий аналіз за допомогою діаграм сузір'я (при параметрі displayConstellation = true) підтверджує, що щільність точок модуляції змінюється в часі відповідно до обраного режиму MCS. Відключення штучної варіації шуму (walkSNR = false) дозволяє ізолювати вплив виключно канальних ефектів, підтверджуючи, що запропонована модель адекватно відтворює поведінку реальної мережі Wi-Fi в умовах багатопроменевого поширення сигналу.

3.3 Експериментальна оцінка пропускної здатності та покриття Wi-Fi мережі в умовах забудови.

Для проведення комплексного аналізу поширення радіосигналу в реальному фізичному середовищі, з урахуванням архітектурних перешкод та матеріалів стін, було використано спеціалізований програмний комплекс NetSpot. Цей інструмент є професійним рішенням для аудиту, візуалізації та оптимізації бездротових мереж, що підтримує роботу на базі операційних систем Windows та macOS. Вибір даного програмного забезпечення обумовлений його широким функціоналом, який дозволяє не лише пасивно сканувати ефір, але й будувати детальні карти покриття, виявляти зони інтерференції та прогнозувати поведінку мережі.

Функціональна архітектура NetSpot дозволяє вирішувати низку критичних завдань у процесі дослідження. По-перше, система забезпечує побудову візуальних карт розподілу електромагнітного поля (heatmap), які наочно демонструють рівень сигналу в кожній точці досліджуваного об'єкта. По-друге, програма здійснює безперервне сканування навколишнього радіочастотного середовища, вимірюючи енергетичні параметри сусідніх точок доступу, що є необхідним для вибору оптимального частотного каналу та фізичного розташування мережевого обладнання. Важливим аспектом є здатність програмного комплексу ідентифікувати так звані "мертві зони" — ділянки приміщення, де сигнал є критично слабким або повністю відсутнім, а також локалізувати джерела електромагнітних завад, що створюються побутовими приладами або стінами з високим коефіцієнтом поглинання. Окрім діагностики існуючих мереж, NetSpot надає інструменти для проектування (планування) нових інфраструктур, дозволяючи віртуально розміщувати маршрутизатори на плані приміщення та моделювати їхнє покриття. Усі зібрані дані архівуються, що дає змогу відстежувати динаміку змін якості зв'язку протягом тривалого часу.

Першим етапом практичного експерименту стало сканування ефіру для виявлення доступних бездротових мереж (SSID). Програма автоматично формує реєстр активних точок доступу з детальним описом їхніх параметрів, як це продемонстровано на рис.3.10.

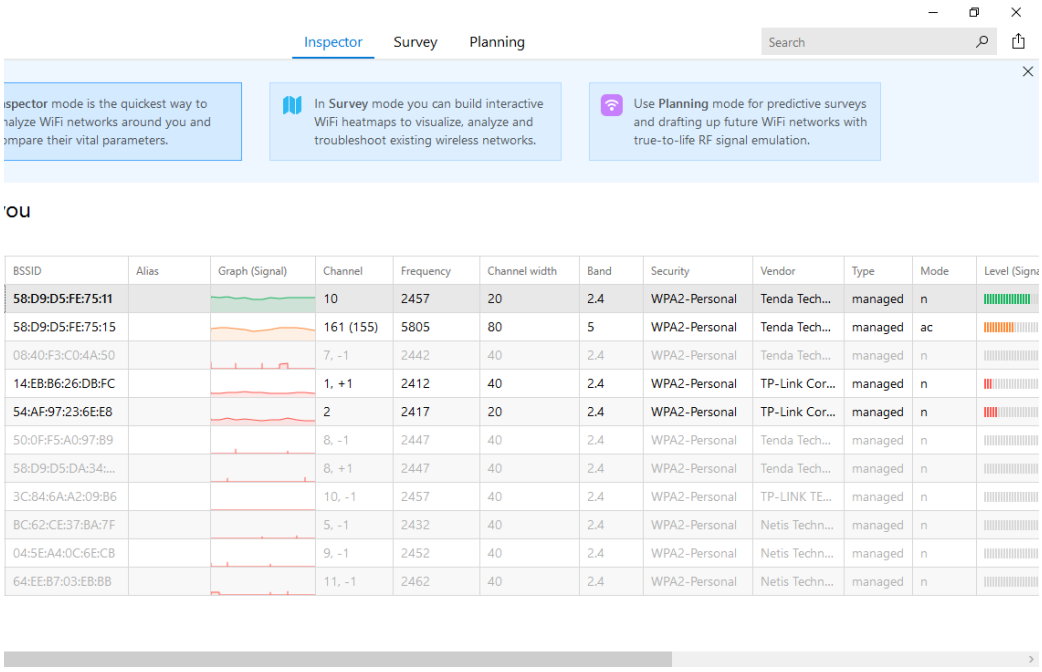


Рисунок 3.10 – Реєстр виявлених бездротових мереж та їх технічні специфікації

Для подальшого детального аналізу з отриманого переліку було обрано мережу з ідентифікатором «Taras», яка продемонструвала найкращі показники рівня сигналу та стабільності. Досліджувана мережа функціонує у частотному діапазоні два цілих і чотири десятих гігагерца. Наступним кроком став моніторинг динаміки швидкості та стабільності сигналу цієї мережі протягом годинного інтервалу. Отримані часові залежності відображено на рис.3.11.

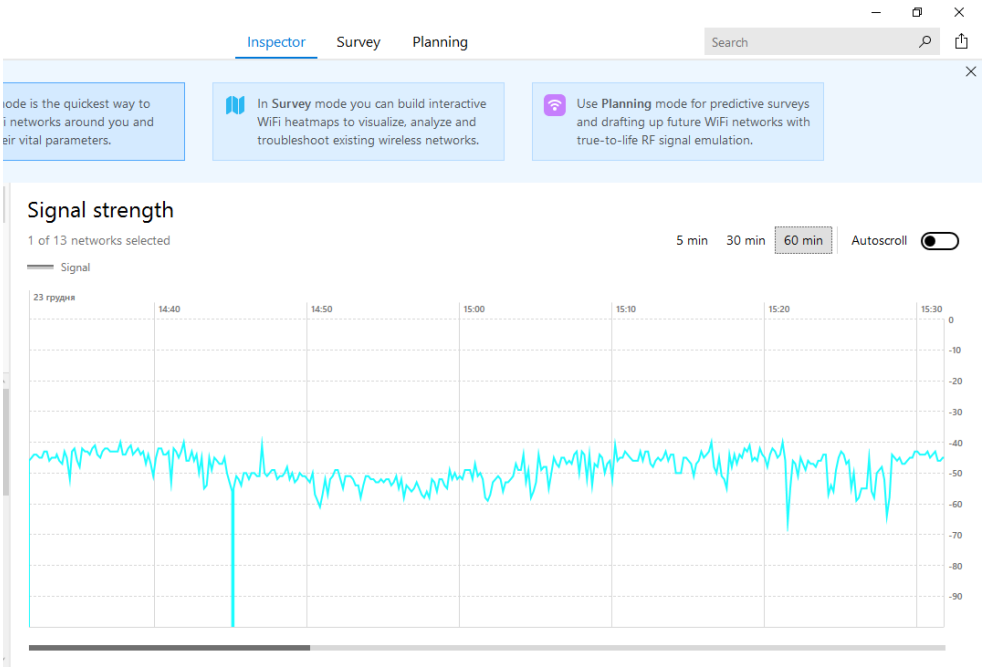


Рисунок 3.11 – Хронограма зміни швидкісних показників Wi-Fi з’єднання в мережі «Taras»

Інтерфейс програми надає можливість детального спектрального аналізу. На лівій панелі управління дослідник може обрати конкретну частотну смугу та візуалізувати розподіл каналів. Це дозволяє оцінити завантаженість радіоефіру та перевірити, чи не перетинається робочий канал обраної мережі з сусідніми, що могло б призвести до колізій та падіння швидкості. Графічна інтерпретація розподілу каналів наведена на рис.3.12.

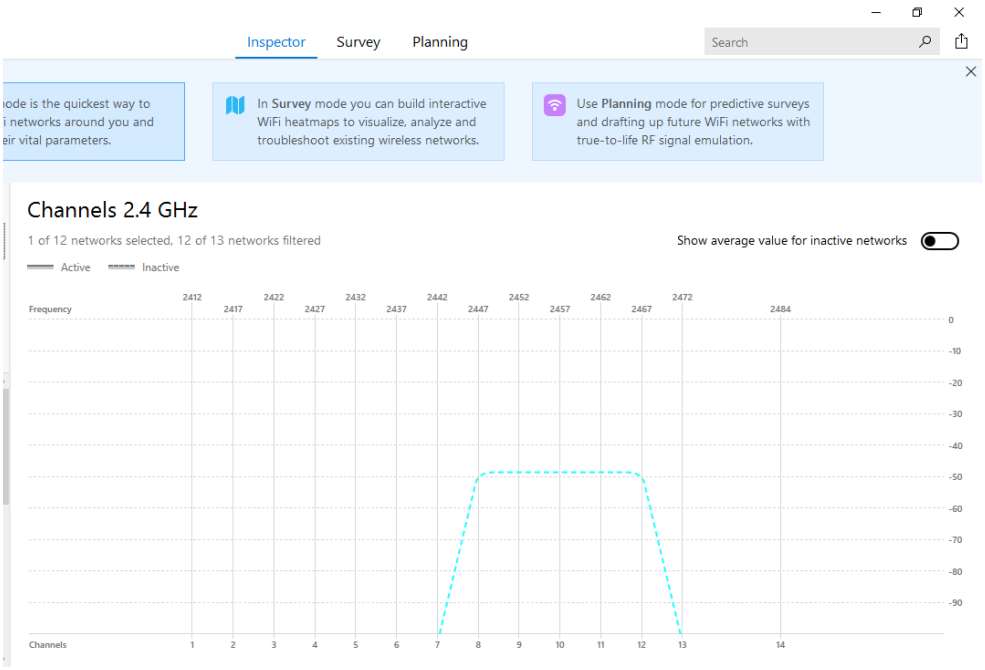


Рисунок 3.12 – Спектральна діаграма розподілу частотних каналів

Ключовим етапом дослідження стало просторове моделювання поширення сигналу з урахуванням фізичних перешкод. Для реалізації цього завдання у середовищі NetSpot було задіяно модуль «Planning». Процедура включала створення віртуальної моделі будинку з нанесенням стін та перегородок, після чого на план було додано віртуальну точку доступу. На основі закладених математичних алгоритмів програма виконала розрахунок зон покриття, генеруючи теплову карту, яка дозволяє чітко диференціювати області з високим рівнем сигналу та проблемні ділянки (сліпі зони). Результати цього моделювання представлені на рис.3.13.

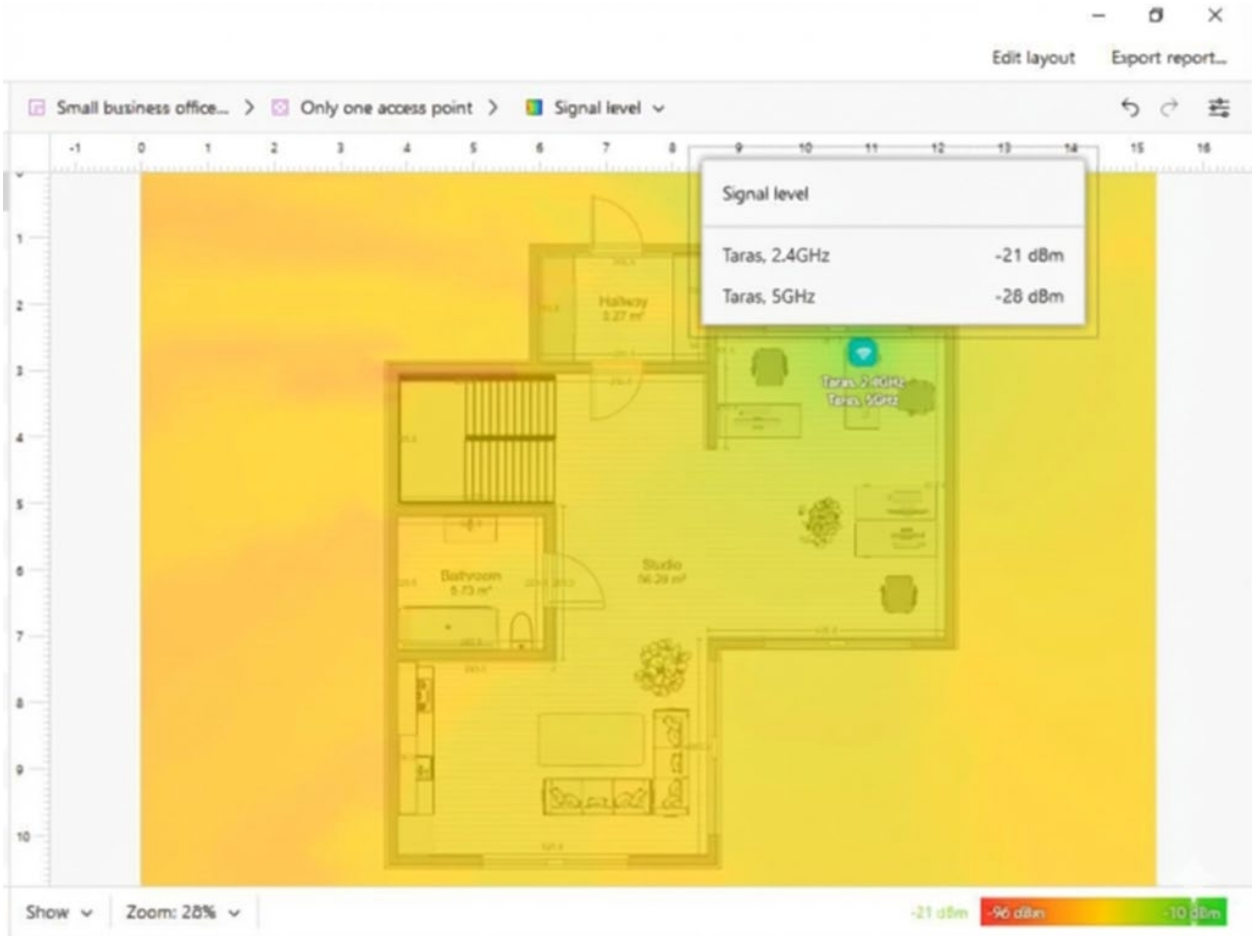


Рис.3.13 – Теплова карта розподілу рівня потужності Wi-Fi сигналу в приміщенні

Основним кількісним критерієм оцінки якості бездротового з’єднання в даному дослідженні виступає показник RSSI (Received Signal Strength Indicator — Індикатор сили прийнятого сигналу). Ця метрика відображає повну потужність сигналу, що надходить на вхід приймача, і вимірюється у логарифмічних одиницях — децибел-міліватах (дБм). Шкала RSSI є від'ємною і варіюється в діапазоні від нуля до мінус ста дБм, де значення, ближчі до нуля, свідчать про вищу потужність сигналу.

Для інтерпретації отриманих результатів прийнято використовувати наступну градацію якості зв'язку. Еталонним вважається сигнал, рівень якого знаходиться у межах від мінус тридцяти п'яти до мінус п'ятдесяти дБм — такі показники гарантують максимальну швидкість передачі даних. Рівень від мінус п'ятдесяти до мінус шістдесяти п'яти дБм класифікується як хороший і є

достатнім для стабільної роботи більшості сервісів. Поріг у мінус шістдесят п'ять дБм є критичним: значення в діапазоні від мінус шістдесяти п'яти до мінус сімдесяти п'яти дБм вважаються задовільними, проте вже можуть спостерігатися незначні затримки. Сигнал слабший за мінус сімдесят п'ять дБм (до мінус вісімдесяти п'яти) характеризується як поганий, що унеможливлює використання вимогливих до трафіку додатків. Значення, що наближаються до мінус ста дБм, свідчать про повну непридатність каналу для передачі даних через критичні втрати пакетів та постійні ретрансмісії.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо аналізу та систематизації методів вимірювання продуктивності бездротових мереж, що дозволило розробити комплексну методику оцінки якості обслуговування користувачів.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз еволюції стандартів IEEE 802.11, який показав, що впровадження новітніх технологій у стандартах Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7 спрямоване на підвищення спектральної ефективності, проте реальна швидкість критично залежить від умов середовища.

2. Сформовано оптимальний набір інструментарію для дослідження: для глибокого математичного аналізу фізичного рівня обрано середовище MATLAB (WLAN Toolbox), а для натурних вимірювань і візуалізації покриття — програмний комплекс NetSpot.

3. Розроблено та реалізовано імітаційну модель функціонування мережі із замкнутим контуром керування швидкістю. Модель враховує динаміку каналу TGac, завмирання сигналу та автоматичну адаптацію схеми модуляції до змін SNR.

4. Встановлено кореляцію між якістю каналу та пропускною здатністю: доведено, що алгоритм адаптації ефективно підвищує індекс MCS при зростанні SNR, а використання механізму гістерезису запобігає частим перемиканням параметрів.

5. В результаті натурного експерименту з використанням NetSpot побудовано теплові карти розподілу рівня сигналу в приміщенні. Виявлено зони з критично низьким рівнем сигналу та проаналізовано вплив архітектурних перешкод на метрику RSSI.

6. Доведено ефективність комбінованого підходу, де математичне моделювання дозволяє оцінити граничні можливості протоколів, а польові вимірювання — верифікувати ці дані в реальних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Evgeny Khorov et al. "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs." IEEE Communications Surveys & Tutorials (2019): 197-216. https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099.
2. David Lopez-Perez et al. "IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi." IEEE Communications Magazine (2019): 113-119. https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338.
3. Deng Dajie et al. "IEEE 802.11ax: Highly efficient WLANs for intelligent information infrastructure." IEEE Wireless Communications (2020): 182-189. https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900464.
4. S. Nawaz et al. "A Survey on Rate Adaptation Algorithms in Wireless LANs." IEEE Access (2019): 13444-13468. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893264.
5. Muhammad Zubair et al. "Interference Management in IEEE 802.11ax WLANs: A Survey." IEEE Access (2021): 11234-11256. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050123.
6. Francesc Wilhelmi et al. "Spatial Reuse in IEEE 802.11ax WLANs." IEEE Communications Magazine (2021): 84-90. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000632.
7. Mao Yang et al. "Performance Evaluation of IEEE 802.11ax and 802.11ac in Dense Deployments." https://www.google.com/search?q=2022 IEEE International Conference on Communications (ICC) cite_start: 1-6. https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9813583.
8. Suman Bhattarai et al. "Throughput Analysis of IEEE 802.11ax Networks with Uplink Multi-User MIMO." IEEE Transactions on Vehicular Technology (2019): 10003-10017. https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2936279.

9. R. Karmakar et al. "Quality of Service in Wireless LANs: A Survey." Journal of Network and Computer Applications (2021): 102947. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102947.

10. G. Naik et al. "Can Wi-Fi 7 Meet the Requirements of Industrial IoT? A Performance Evaluation." IEEE Access (https://www.google.com/search?q=2022): 11567-11580. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146201.

11. Ioannis Selinis et al. "Evaluation of the IEEE 802.11ax OFDMA and MU-MIMO in Dense Environments." 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (2019): 1-6. https://doi.org/10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013589.

12. Katarzyna Kosek-Szott et al. "Coexistence of Wi-Fi 6, 6E, and 7: Challenges and Opportunities." IEEE Network (2021): 212-219. https://doi.org/10.1109/MNET.011.2100234.

13. Dmitry Bankov et al. "OFDMA Uplink Scheduling in IEEE 802.11ax Networks." 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops) (2020): 1-6. https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145228.

14. Pierluigi Gallo et al. "Performance Evaluation of Wireless Networks: A Comparative Study of Simulation Tools." IEEE Access (2020): 123456-123470. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006789.

15. A. Hameed et al. "Coverage and Capacity Analysis of IEEE 802.11ac/ax Networks in Indoor Scenarios." International Journal of Wireless Information Networks (2021): 234-245. https://doi.org/10.1007/s10776-021-00512-3.

16. Ivan Kotuliak et al. "Performance comparison of IEEE 802.11ac and IEEE 802.11n standards in indoor environment." 2018 16th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA) (2018): 293-298. https://doi.org/10.1109/ICETA.2018.8572134.

17. Yue Wang et al. "Digital Twin for Network Performance Monitoring: A Comprehensive Review." IEEE Internet of Things Journal (2023): 1023-1040. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3234567.

18. Jun Zhang et al. "SNR-based Rate Adaptation Mechanism for High Efficiency WLANs." Wireless Networks (https://www.google.com/search?q=2022): 1567-1580. https://doi.org/10.1007/s11276-022-02934-x.

19. S. Paul et al. "RSSI-Based Indoor Localization and Tracking: A Review." IEEE Sensors Journal (2021): 22345-22360. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3101234.

20. Boris Bellalta. "IEEE 802.11be: All you need to know about the next generation Wi-Fi." IEEE Wireless Communications (2021): 1-8. https://doi.org/10.1109/MWC.001.2100045.

21. T. Zeng et al. "Investigation of Channel Bonding and MCS Adaptation in IEEE 802.11ac WLANs." 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) (2019): 1-6. https://doi.org/10.1109/WCNC.2019.8885432.

Додаток А

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

(Презентація)