

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_

*Інфокомунікацій*

(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_

*Інформаційно-мережної інженерії*

(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Побудова бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,

групи ІМІм-23-1

Фодченко А.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 «Електронні комунікації

та радіотехніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_

«Інформаційно-мережна інженерія»

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Харченко Н.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

/ Фодченко А.В./

Керівник

/ Харченко Н.А./

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Фодченко Анастасії Віталіївні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Побудова бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6  
затверджена наказом університету від 28 жовтня 2024 р. № 1148Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Дослідити параметри та принципи функціонування бездротових мереж за стандартом Wi-Fi 6. Провести аналіз методології та практичних аспектів побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6. Обрати необхідне для побудови мережі обладнання за стандартом Wi-Fi 6. Провести верифікацію результатів дослідження шляхом створення математичної моделі процесу модуляції радіосигналів та визначити можливості мережі по забезпеченню якісної передачі при заявленій в стандарті швидкості передачі.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Вступ

1. Теоретико-методологічні аспекти побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6

2. Практичні аспекти побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6

3. Верифікація результатів дослідження

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи; переваги wi-fi 6; план приміщення; результати теоретичних розрахунків зони покриття; створення моделі для радіопланування мережі; вибране обладнання; принципова схема мережі; розрахунок пакетної помилки; висновки.

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	28.10.24	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	29.10-21.11.24	виконано
3	Теоретико-методологічні аспекти побудови бездротової мережі за стандартом wi-fi 6	22.11-05.12.24	виконано
4	Практичні аспекти побудови бездротової мережі за стандартом wi-fi 6	06.12-31.12.24	виконано
5	Верифікація результатів дослідження	1.01-13.01.25	виконано
7	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК	14.01-18.01.25	виконано

Дата видачі завдання 28 жовтня 2024 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Харченко Н.А.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 65 с., 21 рис., 13 джерела, 3 додатки.

Об'єкт дослідження – бездротова мережа за стандартом Wi-Fi 6.

Мета роботи – побудова бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6.

В роботі побудовано бездротову мережу за стандартом Wi-Fi 6; проведено аналіз бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6; проведено аналіз методології побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, проаналізовано практичні аспекти побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, проведено вибір обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 для обраного приміщення, виконано верифікацію результатів дослідження.

БЕЗДРОТОВА МЕРЕЖА, Wi-Fi 6, ІНТЕРНЕТ, ТЕХНОЛОГІЯ,  
ПАКЕТНА ПОМИЛКА.

## THE ABSTRACT

Explanatory slip 65 p., 21 fig., 13 sources, 3 attach.

The object of research – the wireless implementation of the Wi-Fi 6 standard.

The purpose of the work – the wireless possibility of using the Wi-Fi 6 standard.

The work builds a wireless measurement of the Wi-Fi 6 standard; analyzes wireless measurement according to the Wi-Fi 6 standard; analyzes the methodological possibilities of wireless use for the Wi-Fi 6 standard, and also analyzes the practical aspects of a possible wireless extension for the Wi-Fi 6 standard, selects a wireless measurement for the Wi-Fi 6 standard for preliminary application, and verifies the results of the study.

WIRELESS NETWORK, Wi-Fi 6, INTERNET, TECHNOLOGY, PACKET  
ERROR.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ ЗА СТАНДАРТОМ WI-FI 6.....	11
1.1 Бездротова мережа за стандартом Wi-Fi 6: генезис, поняття, сутність ..	11
1.2 Методологія побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 .....	17
1.3 Проблематика та постановка завдань дослідження.....	18
Висновки до розділу .....	21
2 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ ЗА СТАНДАРТОМ WI-FI 6 .....	22
2.1 Модель бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 .....	22
2.2 Настроювання мережі Wi-Fi 6 за допомогою EnGenius ezMaster .....	25
2.3 Вибір обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 .....	28
3 ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	34
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	48
ДОДАТОК А_СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	50
ДОДАТОК Б_ПУБЛІКАЦІЯ 1.....	58
ДОДАТОК В_ПУБЛІКАЦІЯ 2 .....	62

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AP (Access Point) – точка доступу;

AR (Augmented Reality) – доповнена реальність;

BSS (Base Station Subsystem) – підсистема базових станцій;

CCA (Clear Channel Assessment) – адаптивна оцінка чистого каналу;

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – інститут інженерів з електротехніки та електроніки;

IoT (Internet of Things) – інтернет речей;

LDPC (Low-density parity-check code) – код з малою щільністю перевірок на парність;

MAC (Medium Access Control) – контроль доступу до середовища;

MU-MIMO (Multiple User Multiple Input Multiple Output) – багатокористувацький множинний вхід, множинний вихід;

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів;

OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) – множинний доступ з ортогональним частотним розподілом каналів;

PER (Packet Error Rate) – показник пакетної помилки;

PHY (Physical) – фізичний;

PoE (Power Over Ethernet) – живлення через Ethernet;

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурно-амплітудна модуляція;

TWT (Target Wake Time) – планувальник часу пробудження;

VR (Virtual Reality) – віртуальна реальність;

Wi-Fi (Wireless Fidelity) – технологія безпроводової локальної мережі на основі стандартів IEEE 802.11;

WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3) – захищений доступ Wi-Fi 3.

## ВСТУП

На сьогоднішній день великий розвиток передачі даних отримали бездротові мережі – мережі радіозв'язку. Це пояснюється зручністю їх використання, дешевизною та прийнятною пропускнуною спроможністю.

В умовах сьогодення, передача інформації є актуальним напрямком розвитку. До інноваційних методів передачі даних варто віднести: оптичні технології, квантову передачу даних та бездротові технології передачі даних.

Оптичні мережі використовують світлові сигнали передачі даних через кабелі. Вони працюють на основі принципу відображення чи заломлення світла. Переваги оптичної передачі даних включають високу швидкість передачі, велику пропускну здатність та відсутність електромагнітних перешкод [1]. Однак обмеження включають високу вартість встановлення та підтримки оптоволоконних кабелів, а також їх вразливість до пошкоджень.

Квантова передача інформації використовує квантові властивості частинок, такі як квантовий стан та суперпозиція для передачі даних. Основним принципом квантової передачі є використання квантових бітів, які можуть бути у стані 0, 1 чи суперпозиції обох станів одночасно. Перспективи застосування квантової передачі інформації включають створення квантових мереж з високим ступенем захисту від злому та підслуховування.

Розвиток мобільних мереж, таких як 5G та Wi-Fi 6, відкриває нові можливості для бездротової передачі даних з високою швидкістю та надійністю. Однак це також призводить до проблем, таких як перевантаження частотного спектра, низька стійкість передачі даних до перешкод і обмежене покриття. Незважаючи на це, бездротові технології, як і раніше, мають великий потенціал для використання в різних інформаційних мережах.

Мета даної роботи – побудова бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6.

Для вирішення поставленої мети у роботі необхідно виконати низку завдань:

- запропонувати модель бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6;
- здійснити вибір обладнання мережі за стандартом Wi-Fi 6;
- навести верифікацію результатів дослідження.

# 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ ЗА СТАНДАРТОМ WI-FI 6

## 1.1 Бездротова мережа за стандартом Wi-Fi 6: генезис, поняття, сутність

Кожне покоління Wi-Fi дає шанс зупинитися та врахувати трансформаційні зміни, які впливатимуть на нас у найближчі роки. Потреба у Wi-Fi доступі для користувачів перетворилася з привілею на необхідність. Через це ефективність мережі стала критично важливою вимогою для бізнесу. І працівники, і споживачі очікують надійного з'єднання Wi-Fi, відсутність якого може вплинути на їхнє рішення [2].

Постійні інновації технології Wi-Fi особливо відображені у швидкості передачі. За майже два десятиліття розвитку швидкість передачі Wi-Fi 6 майже у вісімсот сімдесят два рази перевищує першу версію Wi-Fi 1.

	Standard	Release year	Frequency band	Rate
Wi-Fi 1	802.11	1997	2.4 GHz	2 Mbps
Wi-Fi 2	802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps
Wi-Fi 3	802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps
	802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps
Wi-Fi 4	802.11n	2009	2.4 GHz or 5 GHz	2.4 GHz: 450 Mbps 5 GHz: 600 Mbps
Wi-Fi 5	802.11ac Wave1	2013	5 GHz	3.74 Gbps
	802.11ac Wave2	2015	5 GHz	6.9 Gbps
Wi-Fi 6	802.11ax	2019	2.4 GHz or 5 GHz	2.4 GHz: 1.15 Gbps 5 GHz: 9.6 Gbps

Рисунок 1.1 – Генезис бездротової мережі за стандартом wi-fi

Концепція та основоположні принципи Wi-Fi 6, офіційно відомі як IEEE 802.11ax, являють собою значну еволюцію в бездротових технологіях,

розроблених для задоволення експоненціального зростання кількості підключених пристроїв і попиту на більш високі швидкості передачі даних, зменшення затримки та підвищення ефективності. Wi-Fi 6 базується на попередніх стандартах IEEE, включаючи нові технічні інновації та модифікації рівнів MAC (Medium Access Control) і PHY (Physical), які разом підвищують продуктивність бездротової локальної мережі в середовищах з високою щільністю та високим попитом.

Формування Wi-Fi 6 можна простежити до обмежень, які спостерігалися в попередніх бездротових стандартах, таких як Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac). Незважаючи на те, що Wi-Fi 5 досяг успіхів у забезпеченні високої пропускної здатності, він був недостатнім у середовищах із великою кількістю пристроїв і складними вимогами користувачів, оскільки пропускна здатність рівня MAC не могла відповідати потенціалу рівня PHY. Фізичний (PHY) рівень у бездротовій мережі, включаючи Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) і Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), відповідає за передачу та прийом даних через бездротове середовище. Будучи найнижчим рівнем у моделі OSI (Взаємозв'язок відкритих систем), рівень PHY відіграє вирішальну роль у визначенні фундаментальних можливостей продуктивності бездротової мережі, таких як швидкість передачі даних, діапазон сигналу, ефективність пропускної здатності, методи модуляції та методи доступу до каналу [3]. У Wi-Fi 5, хоча рівень PHY досяг значних успіхів, він зіткнувся з обмеженнями щодо ефективності та адаптивності в щільних середовищах, де рівень MAC (Medium Access Control) не міг повністю використати вдосконалення PHY, ключовими функціями якого є:

- Модуляція та кодування: рівень PHY визначає схему модуляції, яка кодує дані для передачі. Схеми модуляції вищого порядку, такі як квадратурна амплітудна модуляція (QAM), збільшують швидкість передачі даних шляхом кодування більшої кількості бітів на символ сигналу. У Wi-Fi 5 запровадження 256-QAM дозволило збільшити швидкість передачі даних за рахунок кодування 8 біт на символ, що є суттєвим покращенням у порівнянні зі схемою 64-QAM у Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n).

– Пропускна здатність каналу: стандарти Wi-Fi визначають ширину каналу, який можна використовувати для передачі даних. Wi-Fi 5 представив ширину каналів 80 МГц і 160 МГц, значно розширивши доступну смугу пропускання на канал передачі. Це забезпечило рівень PHY потенціалом високої пропускної здатності, забезпечуючи максимальну швидкість передачі даних фізичного рівня до 6,9 Гбіт/с із 8 просторовими потоками.

– Просторове мультиплексування та MIMO (Multiple Input Multiple Output): Wi-Fi 5 використовував технологію MIMO, яка дозволяла кільком антенам передавати та отримувати дані одночасно. Ця техніка, відома як просторове мультиплексування, дозволила PHY-рівню передавати різні потоки даних на одній частоті, підвищуючи пропускну здатність завдяки ефективному використанню просторових розмірів. Wi-Fi 5 підтримує 8x8 MIMO, дозволяючи до восьми просторових потоків, кожен з яких може передавати власні дані.

– OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним поділом): OFDM є ключовою технологією на рівні PHY, яка розділяє бездротовий канал на кілька піднесучих. У Wi-Fi 5 OFDM забезпечив ефективну передачу даних шляхом розділення даних між цими піднесучими та їх одночасної передачі, що зменшило перешкоди та збільшило швидкість передачі даних. Використовуючи ортогональні частоти, Wi-Fi 5 досяг вищої ефективності передачі даних, мінімізуючи перекриття сигналів.

– Формування променя: Рівень PHY у Wi-Fi 5 також представив вдосконалені методи формування променя, які фокусували силу сигналу в напрямку конкретного пристрою. Це покращило радіус дії та якість сигналу, забезпечивши вищу швидкість передачі даних на великих відстанях за рахунок зменшення погіршення сигналу.

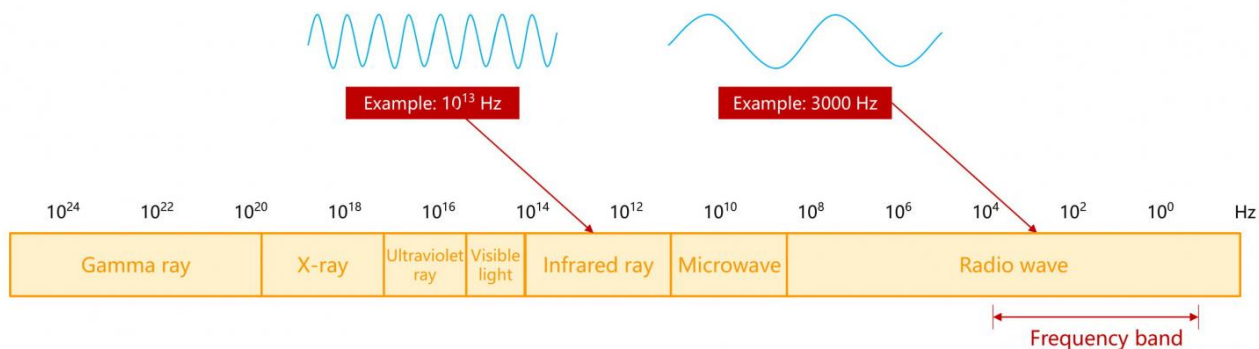


Рисунок 1.2 – Частотні діапазони, що використовуються у бездротових мережах

Wi-Fi 6 має зворотну сумісність, підтримує діапазони 2,4 ГГц і 5 ГГц і забезпечує безперебійну роботу з попередніми поколіннями Wi-Fi. Покращені формати кадрів, довші символи OFDM і більш чіткий інтервал піднесучих покращують стійкість до перешкод і забезпечують ефективну передачу на великі відстані. Крім того, вдосконалення функції розподіленої координації (DCF) наближають пропускну здатність MAC до швидкості передачі даних РНУ, дозволяючи Wi-Fi 6 обробляти сценарії з високою щільністю користувачів без шкоди для швидкості [4].

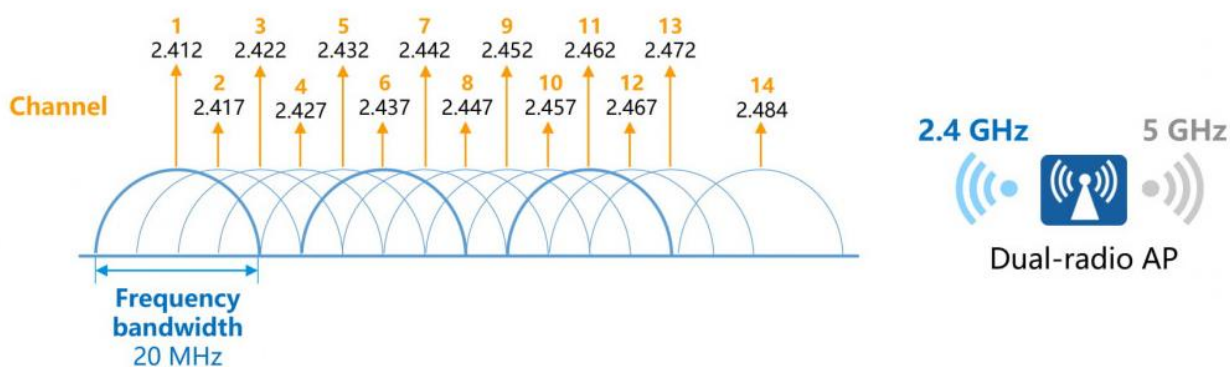


Рисунок 1.3 – Смуги частот за стандартом Wi-Fi

Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) запровадив кілька модифікацій рівня РНУ, які спеціально вирішували проблеми, що постали в Wi-Fi 5, підвищуючи ефективність мережі та пропускну здатність у сценаріях з високою щільністю:

– OFDMA (Множинний доступ з ортогональним частотним розподілом): Wi-Fi 6 використовує OFDMA, що дозволяє динамічно розподіляти піднесучі (відомі як одиниці ресурсу) для кількох користувачів в межах одного каналу. Це суттєво зменшує суперечності, дозволяючи рівню РНУ обробляти одночасні передачі більш ефективно за рахунок сегментації частотного каналу на основі потреб користувача.

– 1024-QAM: схему модуляції було вдосконалено у Wi-Fi 6, збільшивши її з 256-QAM до 1024-QAM, яка кодує 10 біт на символ, підвищуючи швидкість передачі даних на 25%. Хоча це корисно для високоякісних з'єднань малої дальності, воно також вимагає високої точності та лінійності сигналу, що вимагає вдосконаленого обладнання.

– MU-MIMO (багатокористувацька MIMO): на відміну від SU-MIMO Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 підтримує багатокористувацьку MIMO як у низхідній, так і у висхідній лінії зв'язку. Це дозволяє декільком пристроям одночасно надсилати та отримувати потоки даних, значно збільшуючи загальну пропускну здатність мережі та дозволяючи краще використовувати можливості рівня РНУ у зонах з високою щільністю.

– Покращене просторове повторне використання: Wi-Fi 6 представив такі механізми, як BSS і адаптивна оцінка чистого каналу (CCA), щоб розрізнити мережі, що перекриваються, і покращувати просторове повторне використання. BSS Coloring призначає «колір» кожному базовому набору послуг (BSS) або мережі, дозволяючи пристроям розрізнити сигнали з власної мережі та сигнали з сусідніх мереж, зменшуючи перешкоди та краще використовуючи доступний спектр.

– Розширена тривалість символу OFDM і інтервал піднесучих: Wi-Fi 6 збільшив тривалість символу OFDM і зменшив інтервал піднесучих, дозволяючи РНУ-рівню підвищити ефективність передачі та стійкість до перешкод. Більша тривалість символу підвищує стійкість сигналу в середовищах з багатопроблемними перешкодами, тоді як менший інтервал між піднесучими підвищує спектральну ефективність.

Wi-Fi 6 був розроблений із сильним акцентом на енергоефективності, вирішуючи зростаючу потребу подовжити термін служби батареї для пристроїв, які працюють від обмежених джерел живлення, таких як датчики IoT. Одним із ключових нововведень у Wi-Fi 6 є протокол Target Wake Time (TWT), який дозволяє пристроям узгоджувати графіки з'єднання з точками доступу (AP). Завдяки цій можливості пристрій і пов'язана з ним точка доступу узгоджують певний час для «пробудження» пристрою та встановлення зв'язку, що означає, що замість постійного прослуховування мережевого трафіку або підтримки безперервного з'єднання пристрій залишається в стані низького енергоспоживання, доки не запланований час реєстрації. Знижуючи частоту циклів пробудження, TWT значно зберігає заряд батареї, що робить Wi-Fi 6 високоефективним вибором для пристроїв IoT, які повинні працювати протягом тривалого часу від батареї.

На додаток до енергозберігаючих протоколів, таких як TWT, Wi-Fi 6 представляє передові методи просторового повторного використання для оптимізації доступності каналів і керування перешкодами. У густонаселених мережевих середовищах кілька мереж Wi-Fi часто перетинаються, що призводить до перевантажень і перешкод [5]. Такі методи, як забарвлення базового набору послуг (BSS) і адаптивна оцінка чистого каналу (CCA), вирішують цю проблему, допомагаючи пристроям розрізняти передачі з власної мережі та передачі з сусідніх мереж, що перекриваються. BSS Coloring призначає унікальний «колір» або ідентифікатор кожній мережі, дозволяючи пристроям розпізнавати сигнали з інших мереж і визначати, чи можуть вони передавати, не чекаючи, поки канал повністю звільниться. У той же час Adaptive CCA регулює чутливість оцінки каналу пристрою на основі навколишньої мережевої активності, забезпечуючи більш ефективне використання каналу за рахунок зменшення непотрібних затримок. Разом ці інновації зменшують перевантаження каналів і найкращим чином використовують доступний спектр, підвищуючи загальну продуктивність і надійність мережі, особливо в сценаріях з високою щільністю.

Завдяки поєднанню енергоефективних протоколів пробудження та інтелектуального керування перешкодами Wi-Fi 6 не лише збільшує час роботи батареї для пристроїв із низьким енергоспоживанням, але й підвищує пропускну здатність та надійність мережі, особливо в середовищах із інтенсивним насиченням пристроїв. Цей підхід позиціонує Wi-Fi 6 як ідеальний стандарт для зростаючих потреб IoT і сучасних, густонаселених бездротових мереж.

Wi-Fi 6 також посилює безпеку мережі завдяки представленню WPA3, який замінює WPA2, пропонуючи більш надійні криптографічні можливості та кращий захист від кіберзагроз. Це оновлення є життєво важливим, оскільки мережі стикаються зі все більш витонченими атаками, особливо в публічних точках доступу та відкритих мережах, де безпека даних має вирішальне значення.

Широкі переваги Wi-Fi 6 роблять його ідеальним для галузей з високими потребами в даних. На робочих місцях він підтримує динамічні середовища з великою кількістю пристроїв із надійним підключенням, що робить розумні будівлі та мобільну робочу силу можливими. Промислові налаштування виграють від можливостей Wi-Fi 6 для потокового відео високої чіткості та додатків Інтернету речей, які оптимізують логістику виробництва та управління активами. Медичні заклади бачать покращену сумісність пристроїв і зменшену затримку для моніторингу пацієнтів у реальному часі. Wi-Fi 6 також призначений для вдосконалення автомобільних програм, підтримуючи діагностику в автомобілі та зв'язок між транспортними засобами в розумних транспортних системах.

## 1.2 Методологія побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6

Формування бездротової мережі Wi-Fi 6 включає використання наступних технологій:

1. Множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA). Технологія розділяє один канал Wi-Fi на безліч підканалів, що дозволяє декільком користувачам одночасно використовувати той самий канал. Це знижує перевантаження та підвищує загальну продуктивність.

2. Формування променя. Функція дозволяє точкам доступу динамічно коригувати напрямок та форму бездротового сигналу, щоб краще відповідати місцезнаходження та переміщення підключених пристроїв. Це робиться шляхом аналізу рівня сигналу та наступного налаштування шляху проходження сигналу для покращення рівня сигналу та зменшення перешкод.

3. BSS Coloring. У новому стандарті кожна точка доступу передає пакети зі свого роду цифровим підписом. За цим підписом клієнти мережі відразу розуміють, що цей пакет призначений саме їм, а на інші час не витрачають.

4. Збільшення рівня модуляції до 1024-QAM. У 1024-QAM збільшено довжина кожного символу кодування з 8 біт до 10 біт, що підвищує швидкість передачі даних та ефективність використання спектра приблизно на 25%, так як у кожний пакет буде розміщуватися більше даних.

5. Target Wake Time (TWT). При зверненні точки доступу до пристрою задається часовий період, через який слід перевести Wi-Fi-приймач апарату в сплячий режим, або повторно розбудити для отримання чергового пакету даних. Це економить енергію та підвищує автономність у режимі очікування [6].

### 1.3 Проблематика та постановка завдань дослідження

Доступний та швидкий Інтернет має забезпечити майбутню автоматизацію, розвиток Інтернету мов, AR та VR, хмарних сервісів, а також багатьох інших сфер. На сьогоднішній день у світі одночасно розвиваються дві технології, які допоможуть забезпечити майбутній прорив – 5G і Wi-Fi 6. Якщо

з впровадженням першої в Україні виникають тяганини, в тому числі і законодавчі, то друга вже застосовується на практиці.

Wi-Fi – це група протоколів бездротових мереж, що базується на стандарті мережі IEEE 802.11. Такі стандарти характеризують роботу бездротових мереж, де передача даних здійснюється через радіоефір. Вони відрізняються пропускнуою здатністю, дальністю сигналу та іншим. Термін запровадив некомерційний союз Wi-Fi Alliance наприкінці 1990-х років. Порядкові назви Wi-Fi впровадили для зручності. За пропускнуою здатністю на абонента Wi-Fi 6 (802.11ax) вчетверо перевершує попереднє покоління Wi-Fi 5, яке працює на стандарті 802.11ac.

Wi-Fi Alliance офіційно запусив програму сертифікації Wi-Fi 6 у 2019 році. Програма Wi-Fi Certified 6 спрямована на перевірку сумісності пристроїв, гарантуючи, що вони добре працюють один з одним і підтримують всі необхідні функції, належну продуктивність та безпеку.

Wi-Fi 6 забезпечує потенційно вищі швидкості підключення. У цих мережах більше користувачів можуть одночасно підключатися без затримок та втрати швидкості.

Крім того у Wi-Fi 6 була затверджена нова технологія Wi-Fi 6E, яка може використовувати інший частотний діапазон 6 ГГц. Це робить мережу, що ідеально підходить для передачі великих обсягів даних на невеликі відстані.

Новизна технології Wi-Fi 6 полягає в тому, що вона підтримує множинний доступ із частотним поділом каналів (OFDMA), що дозволяє обслуговувати більше пристроїв у мережі. Канали зв'язку роутера діляться на кілька несучих, і можуть взаємодіяти з кількома пристроями одночасно [7].

Wi-Fi 6 також додали обов'язкову підтримку функції MU-MIMO, яка вперше з'явилася у Wi-Fi 5, і технології формування направленої сигналу (transmit beamforming) для кращого охоплення кожного окремого користувача.

MIMO (multiple input, multiple output, "множинне введення, множинний висновок") - це метод просторового кодування сигналу, який дозволяє передавати дані між безліччю пристроїв одночасно без втрати швидкості та

якості підключення. Технологія направленого сигналу означає, що маршрутизатор вміє сам визначати місцезнаходження пристрою та спрямовувати потік даних у цьому напрямку.

Максимальна пропускна здатність Wi-Fi 6 у 3-4 рази вища, ніж у Wi-Fi 5. Таким чином, пристрої в мережі Wi-Fi 6 працюватимуть набагато швидше. При цьому година затримки сигналу зменшується. Це важливо у випадку з відеозв'язком, іграми та стрімінгом [8].

Технологія Wi-Fi 6 також отримала низку покращень у сфері безпеки та навіть автономної роботи пристроїв у такій мережі.

Звичайний протокол безпеки Wi-Fi Protected Access (WPA) використовує паролі для підключення до мережі Wi-Fi. Однак у випадку Wi-Fi 6 захист пароля підвищили за рахунок системи Dragonfly Key Exchange. Це більш складний метод аутентифікації, який ускладнює зламування паролів для підключення до мережі Wi-Fi.

Також Wi-Fi 6 впровадили функцію цільової години пробудження (TWT). Коли пристрої пов'язані з роутером, але не взаємодіють із нею активно, всі вони переходять у режим сну. В результаті витрачається менше енергії [9].

Wi-Fi Alliance вже сертифікував ряд пристроїв із підтримкою нової технології. Серед них є роутери, комп'ютери, планшети, смартфони, телевізори та навіть камери. Точки доступу відрізняються від роутерів користувача тим, що вона не надає IP-адресу, а лише дозволяє підключитися до Інтернету. Вона підтримує виключно бездротові підключення і використовується там, де потрібно збільшити кількість підключених пристроїв або збільшити площу поширення сигналу. До роутера чи модему, пов'язаного з провайдером, точка доступу може підключатися через Wi-Fi або за допомогою кабелю [10].

Wi-Fi 6 більше підходить для використання в приміщеннях, а мережі 5G добре працюють у зовнішніх середовищах, коли потрібне покриття на великі відстані.

Huawei, наприклад, пропонує обладнання для модернізації IT-інфраструктури навчальних закладів, щоб прискорити перехід до нових

моделей навчання та впроваджувати нові інструменти, у тому числі дистанційне навчання як 4K/8K та гібридне навчання з використанням AR та VR. Подібний проект вже реалізують спільно з Адигейським державним університетом, де мережу Wi-Fi 6 розгорнули на базі Парку науки та інновацій. Там встановили 40 точок доступу Huawei AirEngine .

Метою даної роботи є побудова бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6.

Для вирішення поставленої мети у роботі необхідно виконати низку завдань:

- запропонувати модель бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6;
- здійснити вибір обладнання мережі за стандартом Wi-Fi 6;
- навести верифікацію результатів дослідження.

#### Висновки до розділу

У рамках першого розділу розкрито теоретико-методологічні аспекти побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, визначено поняття бездротової мережі, генезис та сутність. Описано методологію побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6.

Доступний та швидкий Інтернет має забезпечити майбутню автоматизацію, розвиток Інтернету мов, AR та VR, хмарних сервісів, а також багатьох інших сфер.

Формування бездротової мережі Wi-Fi 6 включає використання наступних технологій: OFDMA; формування променя; BSS Coloring; збільшення рівня модуляції до 1024-QAM; Target Wake Time (TWT).

Новизна технології Wi-Fi 6 полягає в тому, що вона підтримує множинний доступ із частотним поділом каналів (OFDMA), що дозволяє обслуговувати більше пристроїв у мережі. Канали зв'язку роутера діляться на кілька несучих, і можуть взаємодіяти з кількома пристроями одночасно.

## 2 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ ЗА СТАНДАРТОМ WI-FI 6

### 2.1 Модель бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6

У якості бази розгортання мережі обрано освітній заклад, що займає чотирьохповерховий будинок. План приміщень наведено на рисунку 2.1 (усього площа складає 1400.50 м<sup>2</sup>).

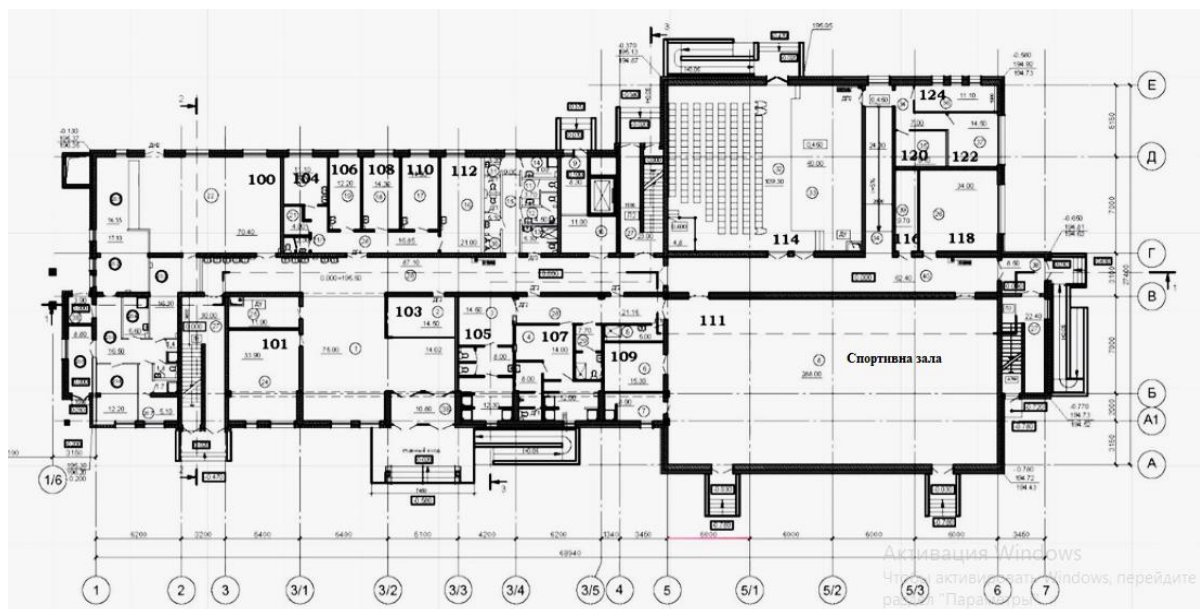


Рисунок 2.1 – План приміщень

Планування всіх поверхів аналогічне, перекриття з гіпсокартону. Двері між кімнатами дерев'яні, несучі стіни показано щільним лініями на плані. Планується встановити точки доступу для користування як здобувачами так і адміністрацією, з обов'язковим покриттям актової зали.

Проблемі поширення радіохвиль усередині будівель та приміщень останнім часом приділяється значна увага. Це пов'язано насамперед із модернізацією локальних інформаційних мереж за допомогою технології Wi-fi [11]. Наявність усередині будівлі стін, перегородок, меблів, радіоелектронної апаратури та інших об'єктів створює складне середовище для поширення

радіохвиль, яке суттєво відрізняється від вільного простору. Основними ефектами, що спостерігаються при поширенні радіохвиль всередині приміщень, є багатопроменевість, обумовлена багаторазовими відображеннями радіохвиль від стін та інших об'єктів, дифракція на численних гострих кромках предметів і згасання радіохвиль при поширенні на відстань та при проходженні через перешкоди. Ці ефекти зумовлюють складну структуру електромагнітного поля.

Отже, проведемо розрахунок дальності сигналу Wi-fi.

1. Обчислюється коефіцієнт  $A$ , що враховує геометрію будівель [12]:

$$A=5\lg\left[\left(\frac{d}{2}\right)^2+(h-h_m)^2\right]-9\lg d+20\lg\left\{\operatorname{tg}^{-1}\left[2(h-h_m)/d\right]\right\}. \quad (2.1)$$

2. Визначаються додаткові втрати  $L_d$ , дБ відносно втрат у вільному просторі:

$$L_d=57,1+A+\lg f_c+18\lg r+18\lg H+18\lg\left[1-\frac{r^2}{17H}\right], \quad (2.2)$$

де  $H$  - висота антени посту радіоспостереження, м.

3. Визначаються втрати потужності у вільному просторі:

$$L_o=32,4+20\lg f_c+20\lg r, \quad (2.3)$$

де  $f_c$ -частота, МГц,  $r$  -відстань від випромінювача, км.

4. Визначаються повні втрати при поширенні радіохвиль:

$$L=L_o+L_d. \quad (2.4)$$

Таблиця 2.1 – Залежність швидкості передачі від чутливості

Швидкість	Чутливість
52 Мбіт/с	-66 дБмВт
48 Мбіт/с	-71 дБмВт
36 Мбіт/с	-76 дБмВт
24 Мбіт/с	-80 дБмВт

## Продовження таблиці 2.1

18Мбіт/с	-83 дБмВт
12 Мбіт/с	-85 дБмВт
9Мбіт/с	-86 дБмВт
6 Мбіт/с	-87 дБмВт

Частота береться із табл. 2.2.

Для кожної швидкості ПЗМ має певну чутливість. Для невеликих швидкостей – найменша чутливість, для високих швидкостей – набагато вища. У табл. 2.1 наведена ця залежність.

Таблиця 2.2 – Залежність каналу та центральної частоти

Канал	F ( МГц )
1	2412
2	2417
3	2422
4	2427
5	2432
6	2437
7	2442
8	2447
9	2452
10	2457
11	2462
12	2467
13	2472
14	2484

З усього вищевказаного, зробимо розрахунок дальності Wi-Fi сигналу для обраного обладнання, що описано в розділі.

Вихідні параметри:

- потужність: 800 мВт (29 дБм);
- чутливість приймача: (-97 дБм);
- коефіцієнти посилення антен: 12 дБм та 13 дБм;
- запас з енергетики: 20 дБ;
- F = 2412 МГц.

$L_o = 14,5$  дБ

FSL = -71

L= 20 дБ.

Для вказаної будівлі і втрат у 20 дБ дальність роботи складатиме 50 м.

Отже, розрахунок дальності Wi – Fi сигналу успішно зроблено.

## 2.2 Настроювання мережі Wi-Fi 6 за допомогою EnGenius ezMaster

Налаштування бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, відбувається у кілька кроків за допомогою програмного забезпечення EnGenius. EnGenius ezMaster – це система централізованого управління Wi-Fi, що масштабується, мережею корпоративного класу, яка керує продуктами серії Neutron.

Завдяки ezMaster можна створювати Wi-Fi інфраструктури будь-яких розмірів з однієї точки керування.

Для використання цього рішення не потрібні жодні ліцензії, сам софт теж безкоштовний, його можна завантажити з сайту вендора.

ezMaster постачається як віртуальний аплайнс для швидкого та легкого розгортання. Він може бути запущений за допомогою VirtualBox, VMware чи інших продуктів віртуалізації.

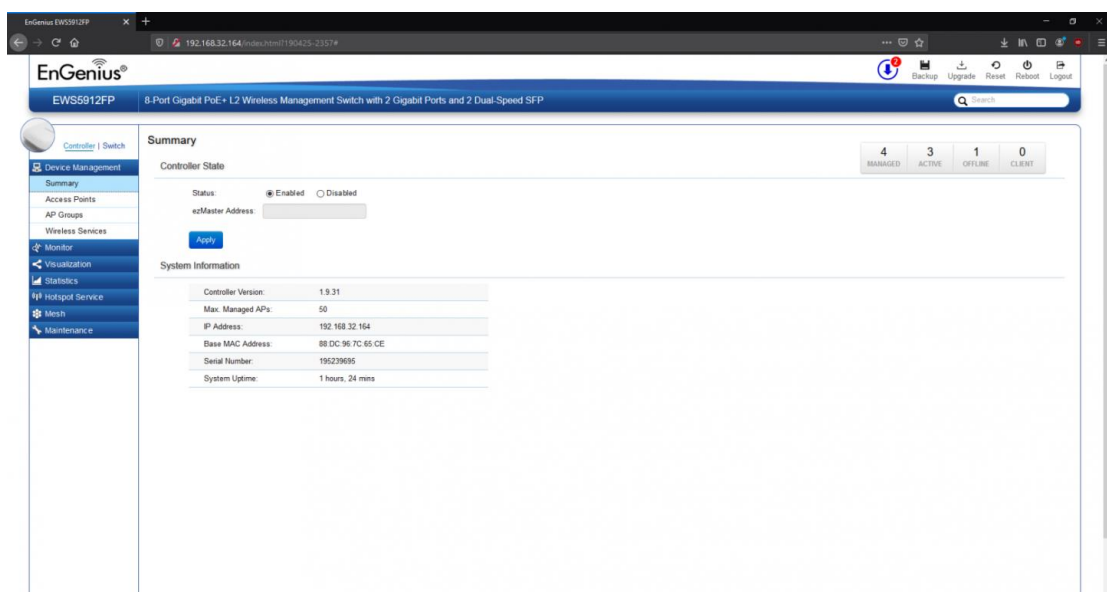


Рисунок 2.2 – Головна сторінка свіча, він же контролер

Крок 1.

Збираємо стенд із точок та Свіч-Контроллера.

Заходимо до веб-інтерфейсу.

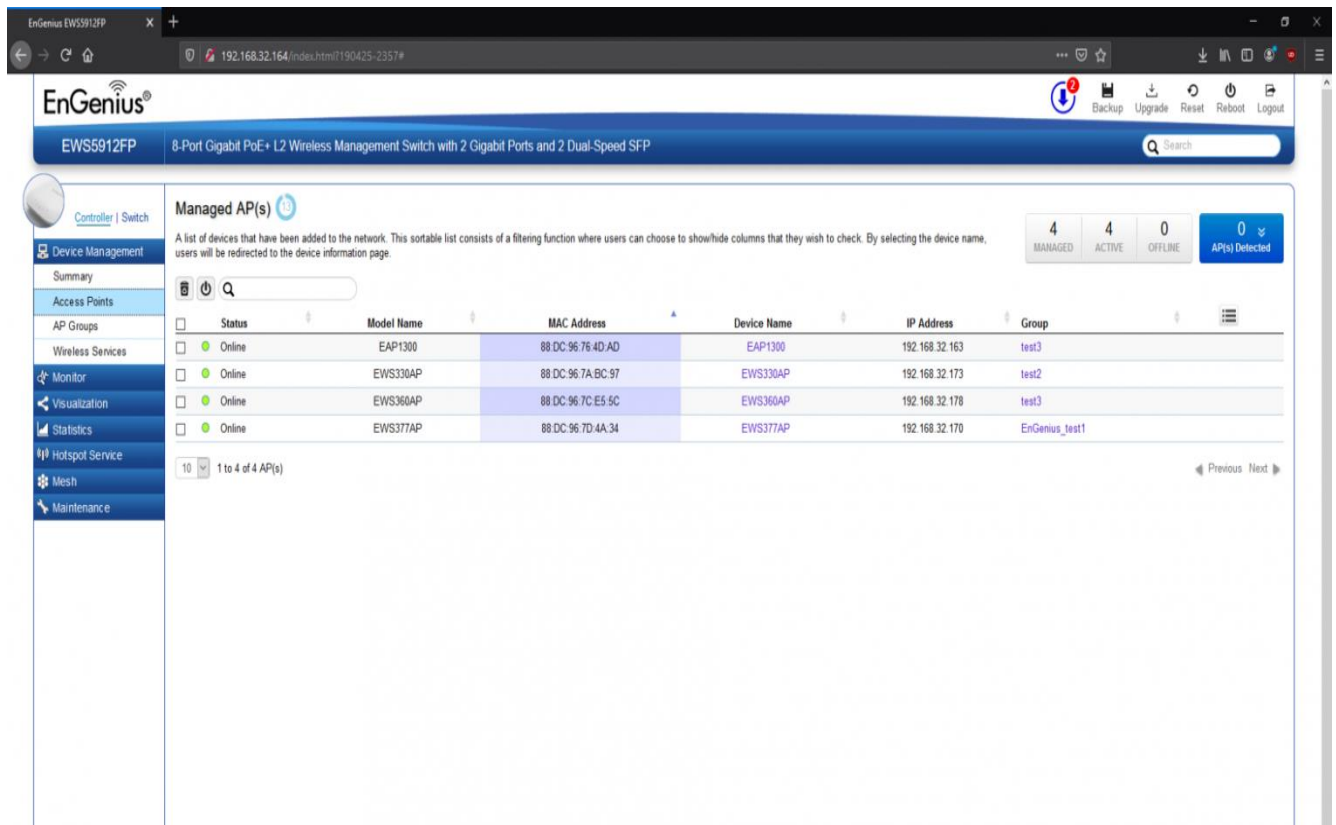


Рисунок 2.3 – Розподіляємо точки по групах

Крок 2.

Здійснюємо радіопланування.

Радіопланування – це процес розрахунку оптимальної конфігурації мережі Wi-Fi з використанням технічних характеристик обладнання та врахування багатьох факторів, таких як геометрія приміщень, наявність перешкод, рівень перешкод та сигналу [13].

У EnGenius радіопланування винесено в хмару і називається ezWiFiPlanner.

Завантажуємо план приміщення та вказуємо область покриття.

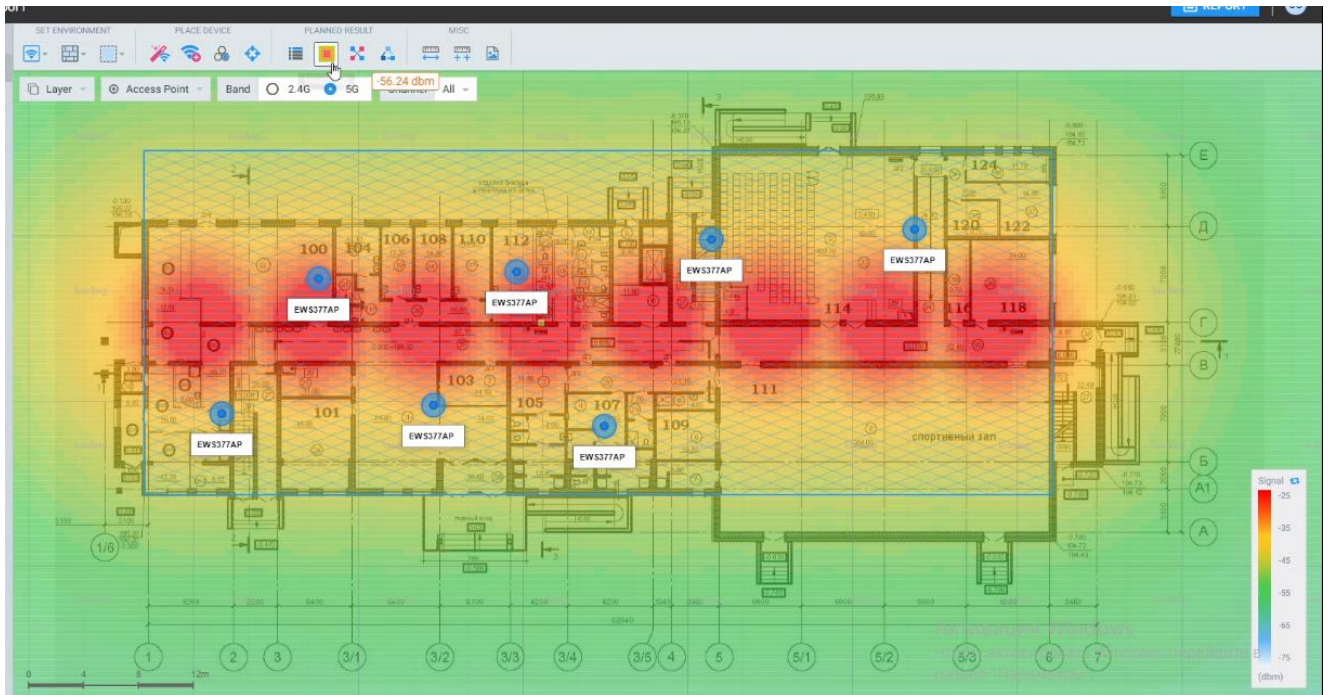


Рисунок 2.4 – Розташування точок доступу

Name	Model Name	Radio Band	Mode	Channel	Channel Size	Power	Location
AP-1	EWS377AP	2.4G On	AP	1	20 MHz	11 dBm	
AP-2	EWS377AP	5.0G On	AP	149	20 MHz	15 dBm	
AP-3	EWS377AP	2.4G On	AP	11	20 MHz	11 dBm	
AP-4	EWS377AP	5.0G On	AP	116	20 MHz	15 dBm	
AP-5	EWS377AP	2.4G On	AP	6	20 MHz	11 dBm	
AP-6	EWS377AP	5.0G On	AP	52	20 MHz	15 dBm	
AP-7	EWS377AP	2.4G On	AP	1	20 MHz	11 dBm	
AP-8	EWS377AP	5.0G On	AP	1	20 MHz	15 dBm	
AP-9	EWS377AP	2.4G On	AP	36	20 MHz	15 dBm	
AP-10	EWS377AP	2.4G On	AP	11	20 MHz	11 dBm	
AP-11	EWS377AP	5.0G On	AP	100	20 MHz	15 dBm	
AP-12	EWS377AP	2.4G On	AP	6	20 MHz	11 dBm	
AP-13	EWS377AP	5.0G On	AP	132	20 MHz	15 dBm	
AP-14	EWS377AP	2.4G On	AP	1	20 MHz	11 dBm	
AP-15	EWS377AP	5.0G On	AP	149	20 MHz	15 dBm	

Рисунок 2.5 – Радіопланування

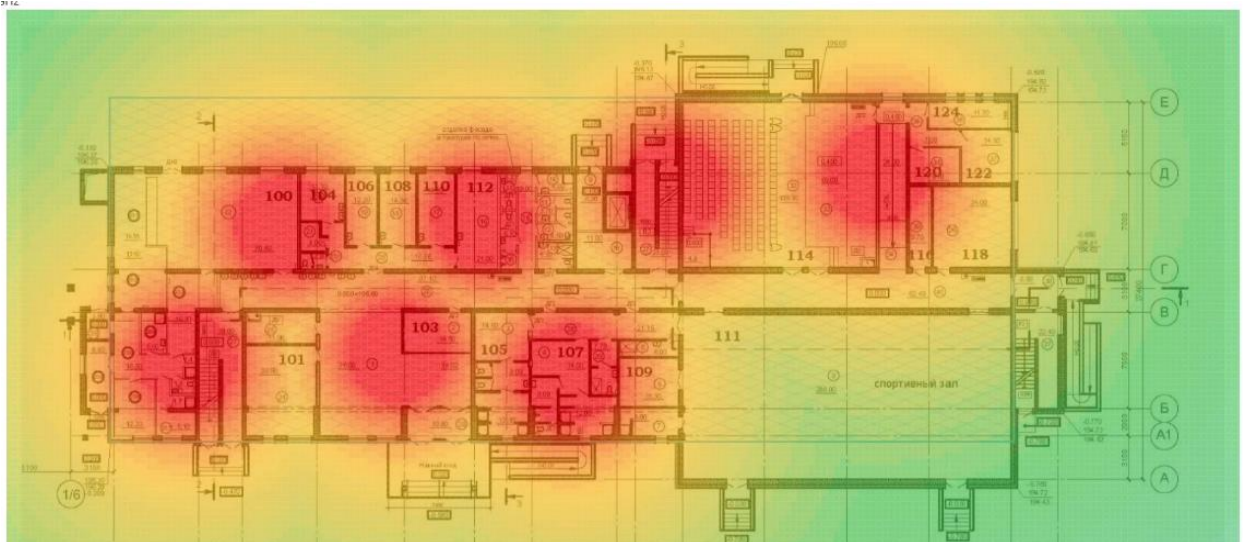


Рисунок 2.6 – Радіопланування

### 2.3 Вибір обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6

У якості обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 обираємо точки доступу EnGenius EWS377AP. Швидкість заявлена до 2400 Мбіт/с на частоті 5 ГГц + 1148 Мбіт/с 2,4 ГГц.



Рисунок 2.7 – Точка доступу EnGenius EWS377AP

EnGenius Neutron EWS377AP – це керована точка доступу для розміщення всередині приміщень. Для ефективного розгортання мережі Wi-Fi використовується стандарт 802.11ax, а точніше Wi-Fi 6. До того ж задіяна конфігурація 4x4. Такі характеристики помітно розширюють можливості Wi-Fi. До того ж застосовано можливості управління на рівні підприємства. Тому точки доступу EWS377AP ефективно використовувати в середовищі, де важлива висока пропускна здатність.

Таблиця 2.3 – Параметри EnGenius Neutron EWS377AP

Найменування	Опис
Бренд	EnGenius
Номер	EWS377AP
Опис	Managed AP Indoor 11ax 1148+2400Mbps 4T4R BLE 2.5GbE PoE.at 3dBi ia
Використовувані частоти	2,4 ГГц, 5 ГГц
Стандарт	802.11ax (Wi-Fi 6)

Точку доступу EnGenius EWS377AP забезпечили найновішими апаратними компонентами. Серед них Qualcomm, який дозволив підняти ефективність на новий рівень та забезпечити менший обсяг енергоспоживання навіть за максимальних навантажень. На частотах 2.4 ГГц теоретично можна досягти швидкості 1148 Мбіт/с, а на частотах 5 ГГц швидкість досягає 2400 Мбіт/с. Виробник подбав і про безпеку. Так WPA3 і WPA2-EAS виконують підключення клієнтів та різних IoT пристроїв абсолютно безпечно і водночас просто.( +р )

8-ми портовий гігабітний свіч-контролер з PoE+.



Рисунок 2.8 – 8-ми портовий гігабітний свіч-контролер з PoE+

Це досить простий та функціональний пристрій, який, крім своєї основної функції, виконує роль захисного елемента та подовжувача. Його використання робить можливим з'єднання Ethernet, без звичайного кабелю. На відміну від прямого підключення, монтаж через DH-CS4010-8GT-110 дозволяє протягнути провід додаткових 100 метрів. На додаток, є непоганий блискавкозахист. Обладнання суттєво спрощує та робить більш організованою роботу систем відеоспостереження в офісах та будинках, де застосовується невелика кількість камер.

Таблиця 2.4 – Параметри 8-ми портового гігабітного свіч-контролера з PoE+

Порти (Uplink)	2x RJ45 (10/100/1000M)
Порти (DownLink)	8x RJ45 (10/100/1000M)
Терморегулятори контактів PoE	1,2,4,5 (V+) ,3,6,7,8 (V-)
Мережеві стандарти	IEEE802.11ax
VLAN	32
Керування	Layer 2
Споживана потужність PoE	1 порт 90Вт, 2-8 порти 30Вт (бюджет 110 Вт)
Протоколи PoE	IEEE802.3af; IEEE802.3at; Hi-PoE; IEEE802.3bt
Макс. пропускна спроможність	20 Гбіт/с
Швидкість пересилання пакетів	14.88 мп/с
Буферна пам'ять	4 Мбіт
Розмір таблиці MAC	8К
Живлення	54В DC, 2.22 А
Потужність споживання	6-110 Вт
Робоча температура	-10 °C - +55 °C
Блискавкозахист	Повітряний розряд: 8 кВ; Контактний розряд: 6 кВ

Контролер SkyKey 1 призначений для простого керування всіма бездротовими Wi-Fi точками доступу і свитчами EnGenius за допомогою віддаленого або локального сайту. Також пристрій можна використовувати для

живлення, як за стандартом 802.3af/PoE (Power Over Ethernet), так і за напругою DC12V.



Рисунок 2.9 – SkyKey – міні-контролер

Особливості нового контролера EnGenius SkyKey I:

Обладнаний 4 ядерним процесором Qualcomm, який підтримує потужні обчислення, що дозволяє ефективно керувати продуктивністю і підняти її на новий рівень.

Підтримується стандарт 802.3af/at або можна використовувати DC12V.

Контролер обладнаний 2 Ethernet портами 10/100/1000, які необхідні для підключення до свитків або серверів.

Резервне копіювання конфігурації SkyKey, навіщо передбачено розширення слота Micro SD.

Наявність вбудованого програмного забезпечення, що дозволяє керувати та організувати системи керування з метою безпосереднього керування сотнями наборів точок доступу виробництва EnGenius.

Присутність вбудованого флеш-накопичувача DRAM з ємністю 1 Гб та eMMC на 4 Гб, що дозволяє вести контроль та керувати статистичними даними до 7 днів.

Принципова схема та ядро мережі наведені на рисунку 2.10.

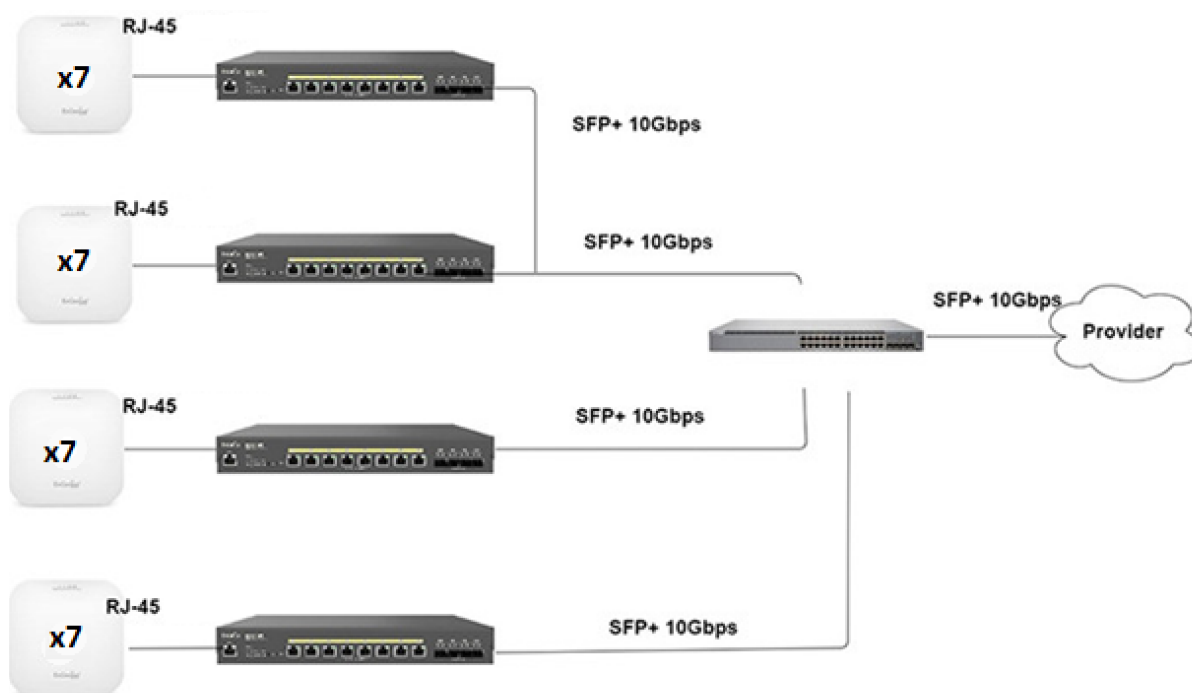


Рисунок 2.10 – Принципова схема та ядро мережі

А ядром системи було обрано Juniper EX2300-24T. Вибір був між ним, SG500X-24P та AT-GS924MPX-50. Але при максимально близьких характеристиках, пристрій Juniper сильно виграє в ціні.



Рисунок 2.12 – Juniper EX2300-24T

Таблиця 2.5 – Параметри Juniper EX2300-24T

Опис	EX2300-24T
Тип корпусу	Встановлюється у стійку заввишки 1U.
Тип перемикача	Керований, 3 шари
Порти	24 x 10/100/1000 + 4 x SFP/SFP+
Місткість	128 Гбіт/с
Пропускна здатність у шарі 2/3	95 млн пакетів на секунду
Кількість MAC-адрес	16 000
Джамбо-підставка для рук	9216 байт
Флеш-пам'ять	2 ГБ
Кількість Вланів	1024
Кількість	до 4 комутаторів 80 Гбіт/с
Підтримка протоколу QoS	Так (802.1p)

Пристрої Juniper EX2300 випускаються з гігабітними портами Ethernet, підтримують технологію PoE (стандарт 802.3af) або 802.3at PoE+ (стандарт 802.3at) для живлення мережевих пристроїв. Аплінк порти підтримують SFP та SFP+ на швидкостях 1GbE/10GbE для підключення до магістралі.

### Висновки до розділу

У рамках розділу представлено модель бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, здійснено вибір обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6.

Налаштування бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, відбувається у кілька кроків за допомогою програмного забезпечення EnGenius. У якості обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 обрано точки доступу EnGenius EWS377AP. Швидкість заявлена до 2400 Мбіт/с на частоті 5 ГГц + 1148 Мбіт/с 2,4 ГГц.

### 3 ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження системи передачі даних стандарту Wi-Fi 6 може бути здійснено на базі моделі, реалізованої в програмному середовищі MATLAB, і дозволяє оцінити показник пакетної помилки в залежності від відношення сигнал-шум для різних параметрів передавача, приймача і радіоканалу [1]. Показник пакетної помилки (Packet Error Rate - PER) – відношення числа пакетів, прийнятих з хоча однією помилкою, до загальної кількості пакетів [2].

Для проведення моделювання необхідно задати ряд параметрів приймача та передавача. Параметр `cfgHE.ChannelBandwidth` відповідає за ширину смуги та приймає значення 20, 40, 60 і 160 МГц (значення задаються як 'CBW20', 'CBW40', 'CBW80' та 'CBW160' відповідно). Параметрами `cfgHE.NumTransmitAntennas` і `txChannel.NumReceiveAntennas` задається кількість антен на передавальній і приймальній стороні відповідно, формуючи таким чином порядок MIMO (у нашому випадку задавалися значення  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$  і  $8 \times 8$ ), також параметром `cfgHE.NumSpaceTimeStream` просторових потоків (у нашому випадку задавалися значення 2, 4 та 8). Параметром `cfgHE.GuardInterval` задавалося значення тривалості захисного інтервалу OFDMA (можливі значення 0,8, 1,6 та 3,2 мкс). Параметри `cfgHE.ChannelCoding` ('BCC' і 'LDPC') і `cfgHE.MCS` (від 0 до 11) відповідають за вибір способу кодування та використовуваної модуляційно-кодуючої схеми.

Крім того, необхідно задати розмір пакету переданих даних, за що відповідає параметр `cfgHE.APEPLength` (відповідно до вимог PEP стандарту Wi-Fi 6, було задано значення 4096 байт) та параметри симуляції, що включають діапазон відносин сигнал-шум і крок його перебудови параметром `snr` (був обраний діапазон від 0 до 50 дБ з кроком у 5 дБ) і число пакетів, що передаються параметром `maxNumPackets` (значення за замовчуванням становить 100 пакетів, для моделювання та отримання більш достовірних статистичних даних було вибрано значення в 1000 пакетів).

Результати моделювання та розрахунку показника пакетної помилки при різних параметрах передачі, зазначених у таблицях та їх заголовках, представлені у таблицях 3.1-3.5. Білим кольором у таблицях виділено значення показника пакетної помилки, які задовольняють вимогам (показник помилки не перевищує 10 відсотків). Червоним кольором виділено значення, що не задовольняють цим вимогам.

Таблиця 3.1 – Результати моделювання показника пакетної помилки у відсотках (ширина каналу 20 МГц, кодування ВСС)

Номер	Відношення сигнал-шум, дБ										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
МІМО 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 0,8 мкс											
0	100	100	36,7	4	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	37,8	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	1.	26,2	5	4	0	0	0	0
3	100	100	100	91,2	61,1.	22,9	3	0	0	0	0
4	100	100	100	100	91,7	57,9	18,4	3	0	0	0
5	100	100	100	100	100	68,9	33,4	7	1	0	0
6	100	100	100	100	100	91,7	61,2	22,6	5	2	0
7	100	100	100	100	100	100	91,8	29	14,8	4	0
8	100	100	100	100	100	100	91,8	45,9	28,3	3	2
9	100	100	100	100	100	100	100	57,8	26,2	7	2
МІМО 4×4, 4 просторові потоки, захисний інтервал 0,8 мкс											
0	100	100	91,7	9	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	91,7	19,4	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	100	100	25,7	6	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	91,7	26,9	5	1	0	0
4	100	100	100	100	100	100	84,9	26,9	11,1.	0	0
5	100	100	100	100	100	100	100	78,7	20	4	1
6	100	100	100	100	100	100	100	100	47,9	10	1
7	100	100	100	100	100	100	100	91,8	52,5	40,8	8
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	52,6	15,9
9	100	100	100	100	100	100	100	100	91,7	84,6	30,6
МІМО 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	100	50	8	1.	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	37,6	6	1.	0	0	0	0	0
2	100	100	100	68,9	22,6	5	1.	0	0	0	0
3	100	100	100	100	52,6	22	2	0	0	0	0
4	100	100	100	100	84,7	52,4	3	0	0	0	0
5	100	100	100	100	100	100	31,4	9	0	0	0

Продовження таблиці 3.1

6	100	100	100	100	100	100	47,8	22,8	2	1.	0
7	100	100	100	100	100	100	78,6	27,3	5	0	0
8	100	100	100	100	100	100	68,9	68,5	22	6	0
9	100	100	100	100	100	100	100	52,4	29,6	6	3
MIMO 4×4, 4 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	100	91,7	7	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	91,7	12,4	1.	0	0	0	0	0
2	100	100	100	100	100	30,7	11,6	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	64,7	24,9	4	0	0	0
4	100	100	100	100	100	100	84,9	31,9	6	0	0
5	100	100	100	100	100	100	100	50	23,4	4	0
6	100	100	100	100	100	100	100	73,3	37,9	15	1.
7	100	100	100	100	100	100	100	91,8	55	26,8	6
8	100	100	100	100	100	100	100	91,8	91,2	47,6	10
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	68,6	26,6

Таблиця 3.2 – Результати моделювання показника пакетної помилки у відсотках (ширина каналу 20 МГц, кодування LDPC)

Номер	Відношення сигнал-шум, дБ										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
MIMO 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 0,8 мкс											
0	100	72,3	13,6	8	0	0	0	0	0	0	0
1	100	98,2	66,5	17,8	1,1	0	0	0	0	0	0
2	100	100	92,7	51	16,2	2	1	0	0	0	0
3	100	100	100	79,2	29,7	5,5	7	1	0	0	0
4	100	100	100	96,2	67,7	28,8	7,3	1,1	0	0	0
5	100	100	100	100	93,5	68,9	23,4	4,1	0,3	0,1	0
6	100	100	100	100	98,2	73,7	28,2	8,4	1	0	0
7	100	100	100	100	100	96,5	41,8	19	4,1	0,6	0,1
8	100	100	100	100	100	98,1	74,8	32,7	7,3	1,1	0,1
9	100	100	100	100	100	100	94,4	47,8	21,2	4,3	0,9
10	100	100	100	100	100	100	99	71,5	34,4	8,5	1,1.
11	100	100	100	100	100	100	100	94,3	51,3	19,1	4,6
MIMO 8×8, 8 просторові потоки, захисний інтервал 0,8 мкс											
0	100	100	82,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	97,7	0,2	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	100	100	18	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	100	21,9	0	0	0	0
4	100	100	100	100	100	100	100	71,2	14,1	1,4	0
5	100	100	100	100	100	100	100	100	74,3	13,8	1,8
6	100	100	100	100	100	100	100	100	87,8	33,9	4,5

Продовження таблиці 3.2

7	100	100	100	100	100	100	100	100	97,2	56,8	18
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	92,6	35,9
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98,6	60,6
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,8
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MIMO 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	78,5	18,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	51	8	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	77,6	45	16,6	2	0	0	0	0	0
3	100	100	100	77,8	37,6	7	2	0	0	0	0
4	100	100	100	91,5	68,9	32,4	4	1	0	0	0
5	100	100	100	100	100	55	16,3	5	0	0	0
6	100	100	100	100	100	78,7	29	7	0	0	0
7	100	100	100	100	100	84,5	38,6	17,3	7	0	0
8	100	100	100	100	100	100	78,9	26,8	10	0	0
9	100	100	100	100	100	100	84,5	44	16,5	3	1
10	100	100	100	100	100	100	100	78,5	32,3	10	0
11	100	100	100	100	100	100	100	85,5	45,7	16,5	5
MIMO 8×8, 8 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	100	78,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	100	100	20,7	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	94,7	14,9	0	0	0	0
4	100	100	100	100	100	100	91,7	73,3	9	1	0
5	100	100	100	100	100	100	100	100	61,1	12,2	0
6	100	100	100	100	100	100	100	100	84,6	36,6	4
7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	46,8	16
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87,6	33,3
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	57,8
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Таблиця 3.3 – Результати моделювання показника пакетної помилки у відсотках (ширина каналу 40 МГц, кодування LDPC)

Номер	Відношення сигнал-шум, дБ										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
MIMO 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 0,8 мкс											
0	100	62,3	5	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	73,3	7	0	0	0	0	0	0	0

Продовження таблиці 3.3

2	100	100	100	51	10	0	0	0	0	0	0
3	100	100	100	78,2	33,7	5	0	0	0	0	0
4	100	100	100	100	77,7	38,8	3	1	0	0	0
5	100	100	100	100	91,5	61,9	21,4	1	0	0	0
6	100	100	100	100	100	91,7	38,2	6	0	0	0
7	100	100	100	100	100	91,7	55	23,3	1	0	0
8	100	100	100	100	100	100	91,8	34,7	4	1	0
9	100	100	100	100	100	100	100	55	17,2	3	0
10	100	100	100	100	100	100	100	78,5	31,4	3	0
11	100	100	100	100	100	100	100	91,3	68,3	13,1	1
MIMO 8×8, 8 просторові потоки, захисний інтервал 0,8 мкс											
0	100	100	84,7	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	100	100	9	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	100	13,3	0	0	0	0
4	100	100	100	100	100	100	100	78,2	10	0	0
5	100	100	100	100	100	100	100	100	91,3	3	1.
6	100	100	100	100	100	100	100	100	73,8	43,9	0
7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	86,8	10
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	61,9
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,6
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
MIMO 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	55,5	8	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	57	12,2	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	48	9	2	0	0	0	0	0
3	100	100	100	87,8	44	0	1.	0	0	0	0
4	100	100	100	100	68,9	35,4	8	1.	0	0	0
5	100	100	100	100	100	58	14,3	1.	0	0	0
6	100	100	100	100	100	58	30,1	6	0	0	0
7	100	100	100	100	100	91,5	52,6	24,3	0	0	0
8	100	100	100	100	100	100	84,9	22	4	0	0
9	100	100	100	100	100	100	91,5	68,9	13,5	1.	0
10	100	100	100	100	100	100	100	91,5	28,3	3	0
11	100	100	100	100	100	100	100	91,5	44	15,5	3
MIMO 8×8, 8 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	100	61,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	91,5	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	100	100	21,7	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	100	11,9	0	0	0	0



Продовження таблиці 3.4

MIMO 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	73,3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	57,8	3	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	42,3	6	0	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	29	1.	0	0	0	0	0
4	100	100	100	100	100	25,4	1.	0	0	0	0
5	100	100	100	100	100	78	7	1.	0	0	0
6	100	100	100	100	100	84,6	26,1	2	0	0	0
7	100	100	100	100	100	100	55	14,3	0	0	0
8	100	100	100	100	100	100	91,9	36,7	3	0	0
9	100	100	100	100	100	100	100	48,9	12	100	0
10	100	100	100	100	100	100	100	91,5	44	100	0
11	100	100	100	100	100	100	100	100	65,5	12,5	100
MIMO 8×8, 8 просторові потоки, захисний інтервал 3,2 мкс											
0	100	100	91,2	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	100	100	17,7	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	100	8	0	0	0	0
4	100	100	100	100	100	100	100	84,3	3	0	0
5	100	100	100	100	100	100	100	100	78,5	5	0
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	46,6	1.
7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,8	4
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	55
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,8
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Таблиця 3.5 – Результати моделювання показника пакетної помилки у відсотках (ширина каналу 160 МГц, кодування LDPC)

Номер	Відношення сигнал-шум, дБ										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
MIMO 2×2, 2 просторові потоки, захисний інтервал 0,8 мкс											
0	100	91,6	3	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	78,6	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	53	4	0	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	18	0	0	0	0	0	0
4	100	100	100	100	91,7	30,8	1	0	0	0	0
5	100	100	100	100	100	76,9	5	0	0	0	0
6	100	100	100	100	100	100	39,2	0	0	0	0
7	100	100	100	100	100	100	73,3	8	0	0	0



## Продовження таблиці 3.5

10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Приклади отриманих залежностей (а також залежностей, отриманих при інших параметрах) в таблицях 3.1-3.5 представлені на рисунках 3.1-3.6 (їх легенда представлена на рисунку 2.13).

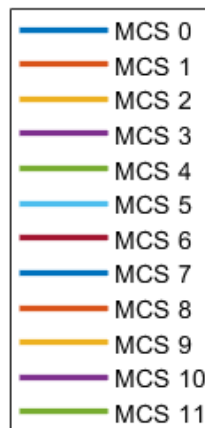


Рисунок 3.1 – Легенда залежностей показника пакетної помилки при різних параметрах передачі

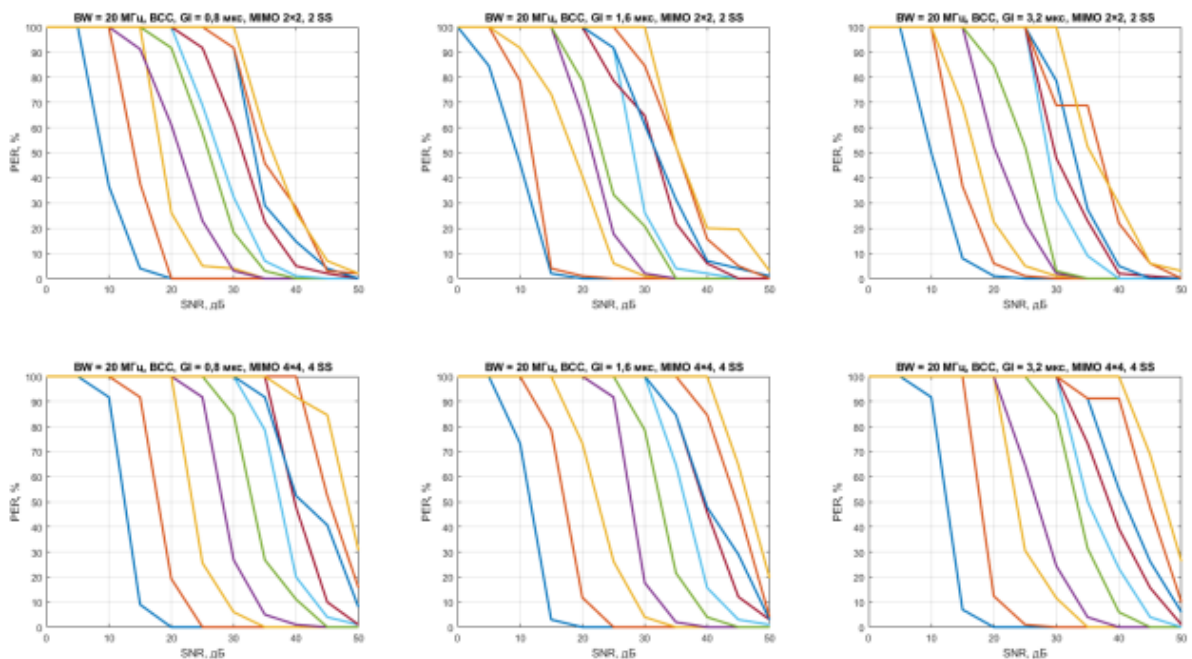


Рисунок 3.2 – Результати розрахунку коефіцієнта пакетної помилки для каналу шириною 20 МГц та кодування ВСС (при різних параметрах передачі)

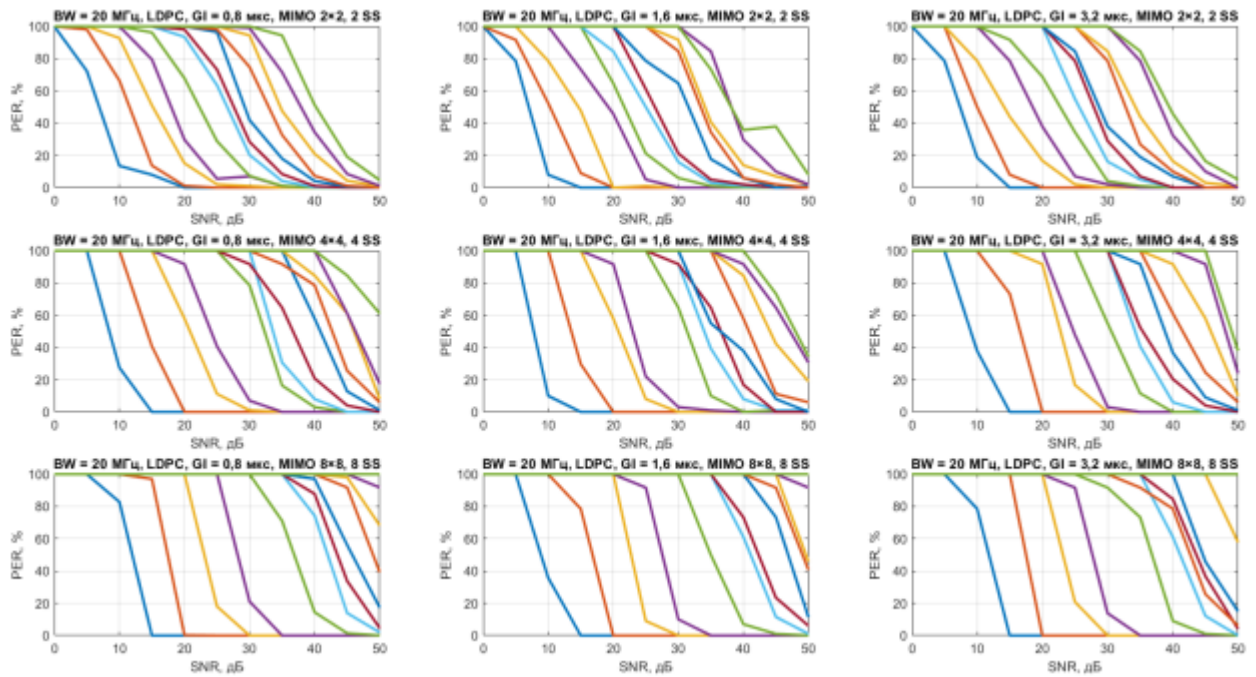


Рисунок 3.3 – Результати розрахунку коефіцієнта пакетної помилки для каналу шириною 20 МГц та кодування LDPC (за різних параметрів передачі)

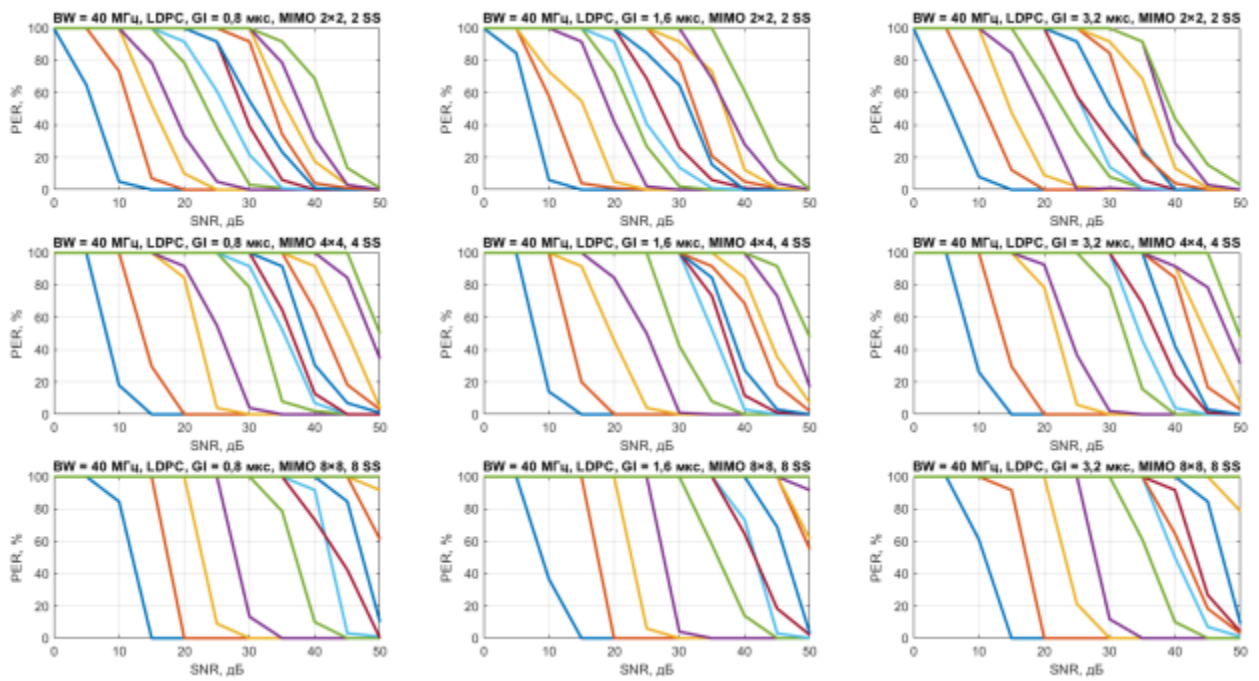


Рисунок 3.4 – Результати розрахунку коефіцієнта пакетної помилки для каналу шириною 40 МГц та кодування LDPC (за різних параметрів передачі)

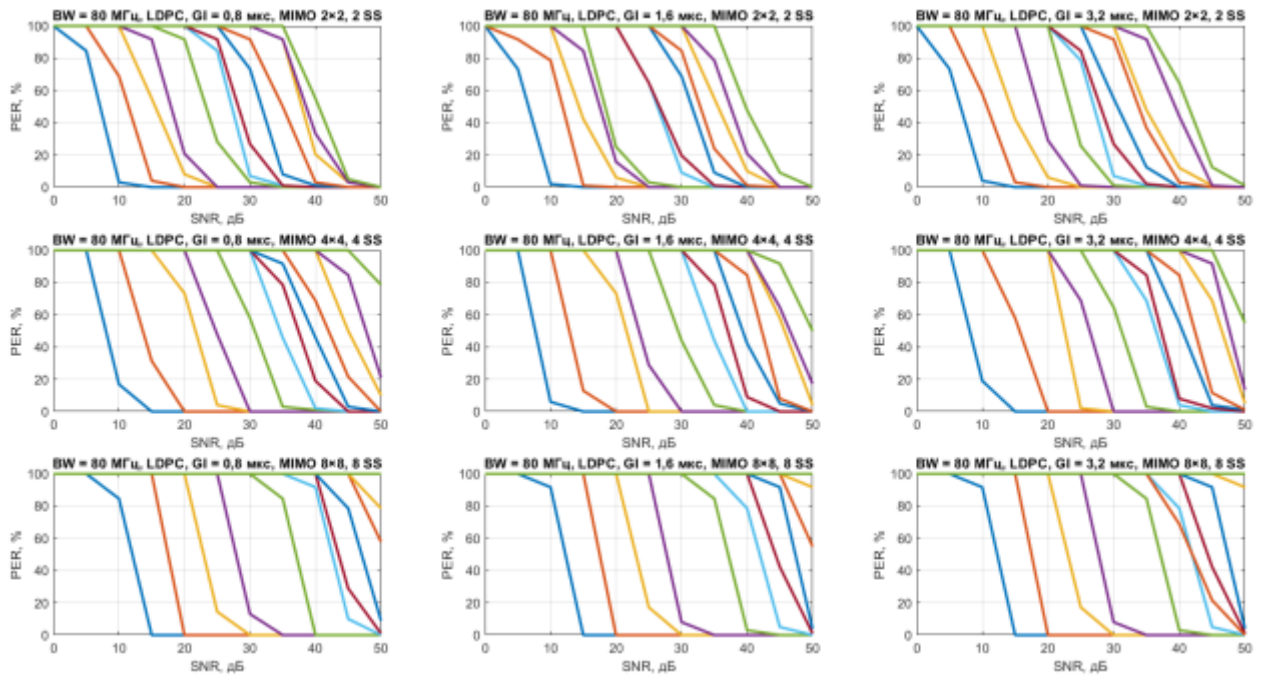


Рисунок 3.5 – Результати розрахунку коефіцієнта пакетної помилки для каналу шириною 80 МГц та кодування LDPC (за різних параметрів передачі)

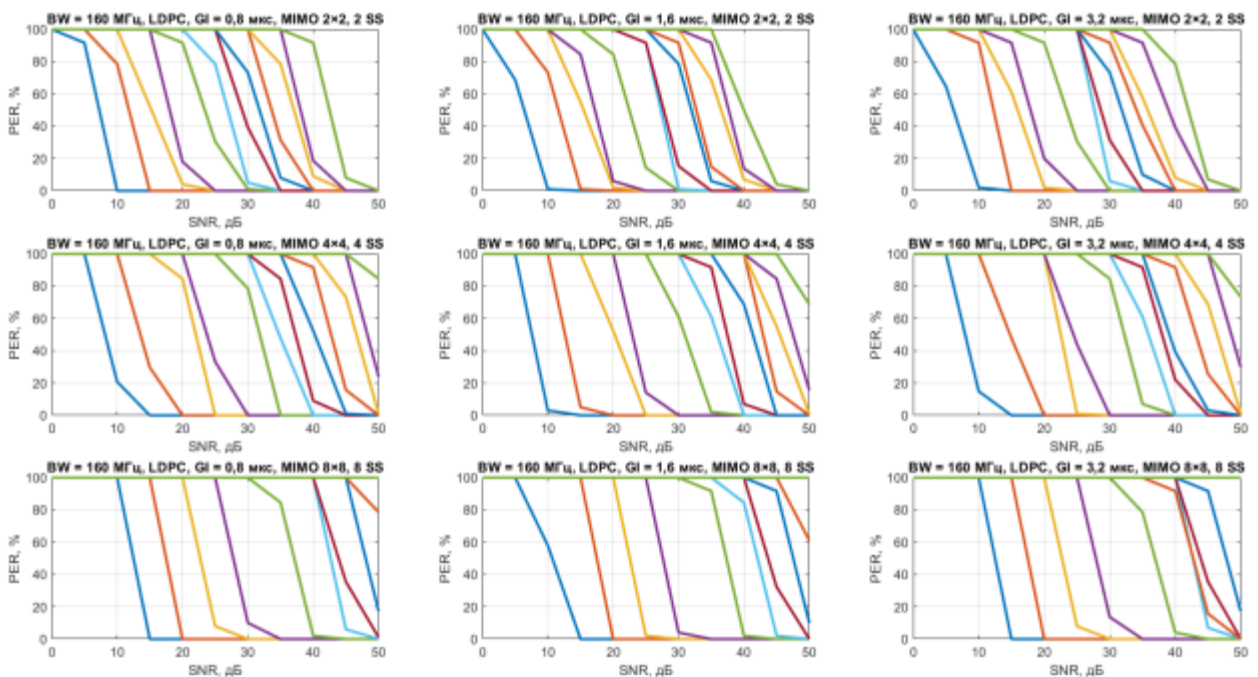


Рисунок 3.6 – Результати розрахунку коефіцієнта пакетної помилки для каналу шириною 160 МГц та кодування LDPC (за різних параметрів передачі)

Таким чином, на підставі отриманих результатів моделювання можна зробити висновок, що пристрої стандарту Wi-Fi 6 у разі використання

найпростішої модуляційно-кодуючої схеми (MCS 0) можуть коректно передавати дані при 15 дБ (в окремих випадках з 10 і 15 дБ ). Для використання кожної наступної MCS потрібне покращення ЗСШ у середньому на 5 дБ. Крім того, теоретично можливі високі швидкості передачі даних у стандарті Wi-Fi 6 можна отримати при забезпеченні якісного радіоканалу з високим ставленням сигнал-шум (у наведених результатах видно, що навіть відношення сигнал-шум в 50 дБ для вищих порядків модуляційно-кодуючих схем є недостатнім).

## ВИСНОВКИ

У рамках даної кваліфікаційної роботи здійснено побудову бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6. У роботі розкрито теоретико-методологічні аспекти побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, визначено поняття бездротової мережі, генезис та сутність. Описано методологію побудови бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6. Представлено модель бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, здійснено вибір обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 та наведено верифікацію результатів дослідження.

На основі вищевикладеного варто зазначити, що доступний та швидкий Інтернет має забезпечити майбутню автоматизацію, розвиток Інтернету мов, AR та VR, хмарних сервісів, а також багатьох інших сфер. На сьогоднішній день у світі одночасно розвиваються дві технології, які допоможуть забезпечити майбутній прорив – 5G і Wi-Fi 6.

Формування бездротової мережі Wi-Fi 6 включає використання наступних технологій: множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA), формування променя, BSS Coloring, збільшення рівня модуляції до 1024-QAM, Target Wake Time (TWT).

Новизна технології Wi-Fi 6 полягає в тому, що вона підтримує множинний доступ із частотним поділом каналів (OFDMA), що дозволяє обслуговувати більше пристроїв у мережі. Канали зв'язку роутера діляться на кілька несучих, і можуть взаємодіяти з кількома пристроями одночасно.

Налаштування бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6, відбувається у кілька кроків за допомогою програмного забезпечення EnGenius. У якості обладнання бездротової мережі за стандартом Wi-Fi 6 обрано точки доступу EnGenius EWS377AP. Швидкість заявлена до 2400 Мбіт/с на частоті 5 ГГц + 1148 Мбіт/с 2,4 ГГц.

Дослідження системи передачі даних стандарту Wi-Fi 6 здійснено на базі моделі, реалізованої в програмному середовищі MATLAB, і дозволяє оцінити

показник пакетної помилки в залежності від відношення сигнал-шум для різних параметрів передавача, приймача і радіоканалу. На підставі отриманих результатів моделювання можна зробити висновок, що пристрої стандарту Wi-Fi 6 у разі використання найпростішої модуляційно-кодуючої схеми (MCS 0) можуть коректно передавати дані при 15 дБ (в окремих випадках з 10 і 15 дБ). Для використання кожної наступної MCS потрібне покращення ЗСШ у середньому на 5 дБ. Крім того, теоретично можливі високі швидкості передачі даних у стандарті Wi-Fi 6 можна отримати при забезпеченні якісного радіоканалу з високим ставленням сигнал-шум (у наведених результатах видно, що навіть відношення сигнал-шум в 50 дБ для вищих порядків модуляційно-кодуючих схем є недостатнім).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ozerchuk I. Формування стійкого каналу передачі даних у мережі Інтернет. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2021. P. 212-217. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2021-43-35.
2. Денісов Р., Попович П. Особливості попередньої обробки та групування тренувальних даних нейронної мережі для підвищення точності розпізнавання об'єктів на основі MOBILENETV2. *Technologies and Engineering*. 2024. С.9-20. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.5.1.
3. Sharma Asmita, Singh Bharat. ZigBee Technology and its Standards. 2024. № 13. P. 37-42.
4. Jijie Zheng, Xinjian Xiang. Data analysis and research on ZIGBEE wireless sensor network system based on complex event processing technology. 2010. DOI: 10.1109/ICCSIT.2010.5565015.
5. Sreelekshmi K., Pranitha J., Unnimaya K., Vijitha S. Road Safety and Inter-vehicular Surveillance using V2V Communication. 2023. P. 337-344. DOI: 10.21467/proceedings.160.44.
6. Wu Chia-Lun, Lu Tsung-Tao, Lee Chin-Tan, Sun Jwo-Shiun, Lin Hsin-Piao, Hwang Yuh-Shyan, Sung Wen-Tsai. Novel AMI in Zigbee Satellite Network Based on Heterogeneous Wireless Sensor Network for Global Machine-to-Machine Connectivity. *Electronics*. 2024. № 13. P. 14-21. DOI: 10.3390/electronics13081421.
7. Hussein Noon, Nhlabatsi Armstrong. Living in the Dark: MQTT-Based Exploitation of IoT Security Vulnerabilities in ZigBee Networks for Smart Lighting Control. *IoT*. 2022. №3. P. 450-472. DOI: 10.3390/iot3040024.
8. Kiran Huma, Sehar Amna, Khan Muskan. Wireless Sensor Network with ZigBee Application: *Literature Review*. 2022. DOI: 0.22541/au.165944356.69836365/v1.

9. 802.11ax Packet Error Rate Simulation for Single-User Format [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802-11ax-packet-error-ratesimulation-for-single-user-format.html> (дата звернення: 02.11.2024).

10. Rajalakshmi P., Gunavathi N. A Tri-Band Frequency Reconfigurable Monopole Antenna for IEEE 802.11ax and Sub-6 GHz 5G NR Wi-Fi Applications. 2023. DOI: 10.17/978-981-19-9748-8\_16.

11. Hoefel R.P.F. LLR Metrics for 1024-QAM Soft-Decision: Implementation in IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). 2021. DOI: 10.1109/ISNCC52172.2021.9615831.

12. Rehman Abdul, Hussain Faisal, Ali Rashid, Lone Tahir. Collision-based Up-link OFDMA Random Access Mechanism for Wi-Fi 6. *IEEE Access*. 2023. PP. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3323162.

13. Проектування та монтаж Wi-Fi мережі з використанням радіопланування: крок за кроком до швидкої та надійної мережі [Електронний ресурс] // VERNA – Режим доступу до ресурсу: <https://www.verna.ua/wifi-network-equipment/wi-fi#:~:text=%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%2D%20%D1%86%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%20%D1%80%D0%BE%D0%B7%D1%80%D0%B0%D1%85%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%83%20%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97,%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%BA%D0%BE%D0%B4%2C%20%D1%80%D1%96%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D1%8C%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%BA%D0%BE%D0%B4%20%D1%82%D0%B0%20%D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%83..>