

## **РЕФЕРАТ**

В магістерській кваліфікаційній роботі в спеціальній частині проводиться дослідження методів підвищення ефективності технології MIMO в стандарті 802.11ac. В технічній частині роботи розглядаються основні напрямки та характеристики цієї технології, частоти, швидкість та інші параметри передачі даних стандарту 802.11ac. Також досліджуються та аналізуються методи, які підвищують швидкість та якість передачі. Проводяться розрахунки для побудови безпроводної мережі у гуртожитку, а також виконується моделювання для порівняння ефективності розглянутої системи. В економічній частині магістерської кваліфікаційної роботи виконано обґрунтування економічної доцільності розробки і побудови безпроводної мережі з підвищеною ефективністю технології MIMO стандарту 802.11ac. В шостому розділі були розглянуті питання з охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях.

## **ABSTRACT**

In the master's qualifying work in the special part is conducted research of methods of increase of efficiency of technology MIMO in the standard 802.11ac. The technical part discusses the main directions and characteristics of this technology, frequency, speed and other data transmission parameters of the standard 802.11ac. Methods that increase the speed and quality of transmission are also explored and analyzed. Calculations are being made to build a wireless network in the hostel, and simulations are performed to compare the efficiency of the disassembled system. In the economic part of the master's qualification work the justification of the economic expediency of the development and construction of a wireless network with enhanced efficiency of MIMO technology 802.11ac. The sixth section addressed issues of occupational safety and security in emergencies.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ACK (AC Knowledge) – короткий кадр підтвердження.

AP (Access Point) – точка доступу.

BSS (Basic Service Set) – базова зона обслуговування.

ССК (complementary code keying) – модуляція комплементарним кодом.

CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) - множинний доступ з виявленням несучої і запобіганням колізій.

DCF (Distributed Coordination Function) - функції управління розподілені між усіма пристроями мережі.

DS (Distribution System) – розподільча система.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - інститут інженерів з електротехніки та електроніки.

ISO (International Organization for Standardization) - Міжнародна організація зі стандартизації.

LLS (Logical Link Control) - підрівень управління логічної ланки.

L-LTF (Legacy Long Training Field) - довга підстроювальна послідовність.

L-SIG (Legacy OFDM Signal field) – сигнал.

L-STF (Legacy Short Training Field) - коротка підстроювальна послідовність.

MAC (Media Access Control) - управління доступом до носія.

MCS ( Modulation and Coding Scheme) – кодово-модуляційна схема.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - множина входів множина виходів.

MISO (Multiple Input Single Output) - множина входів єдиний вихід.

MU-MIMO ( Multi-user MIMO) – багато множинний доступ.

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) - мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів.

OSI (Open Systems Interconnection) - модель взаємодії відкритих систем.

PBCH (Physical Broadcast Channel) – фізичний канал передачі мовної інформації.

PCF (Point Coordination Function) – функції управління, зосереджені в одній певній точці доступу.

PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) - фізичний канал передачі формату, який використовується для каналу PDCCH.

PDCCH (Physical Downlink Control Channel) - фізичний канал керування "вниз".

PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) – фізичний канал для передачі HARQ ACK/NACK в відповідь при передачі інформації "вверх".

SISO (Single Input Single Output) – єдиний вхід єдиний вихід.

S/N (signal/noise) – сигнал/шум.

SU-MIMO (Single User-MIMO) – одно-користувацький MIMO.

STBC (space-time block codes) - просторово-часові блокові коди.

TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) - протокол керування передачею / міжмережевий протокол.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - квадратурно-амплітудна модуляція.

VHT (Very High Throughput) - дуже велика пропускна здатність.

Wi-Fi (Wireless Fidelity) - загальнозживана назва для стандарту IEEE 802.11 передачі цифрових потоків даних по радіоканалах.

ZF (Zero Forcing) – нульовий примус.

WLAN (wireless local area network) - безпроводні локальні мережі.

БМПП – безпроводні мережі передачі інформації.

ЛЗ – лінія зв'язку.

ТД – точка доступу.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку безпроводних систем передачі даних, зокрема системи мобільного радіодоступу Wi-Fi, постає необхідність застосування інформаційних технологій, які дозволяють в режимі реального часу гарантувати якісну передачу даних.

Одним з підходів для збільшення швидкості передачі даних для Wi-Fi стандарту 802.11ac є використання безпроводних систем з використанням декількох антен як для передавача, так і для приймача. Така технологія отримала назву «MIMO» (Multiple Input Multiple Output). Це система з  $N$  передавальними і  $M$  приймальними антенами, яка здатна забезпечити теоретичну пікову пропускну здатність у  $N$  раз більшу (якщо  $N=M$ ), ніж системи з однією парою антен [1]. Це досягається підвищенням максимального значення коефіцієнта сигнал/шум за рахунок збільшення конфігурації антен  $N \times M$  [2].

Вибір даної теми магістерської роботи є актуальним, адже на сьогоднішній день великого розвитку в області передачі даних досягли безпроводні мережі – мережі радіозв'язку. Це можна пояснити зручністю їх використання, дешевизною і прийнятною пропускну здатністю. Виходячи з такої динаміки розвитку, можна зробити висновок про те, що за кількістю і поширеністю безпроводні мережі в найближчий час перевершать провідні мережі. Ця динаміка безпосереднім чином впливає на вимоги до високошвидкісних каналів із технологіями підвищення ефективності.

Тому в даній роботі розглядатиметься технологія MIMO, як одна із найшвидших впроваджуваних для сімейства стандартів 802.11x, яка описується каналним та фізичним рівнем.

**Аналіз останніх досліджень.** Методи підвищення ефективності технології MIMO є об'єктом інтенсивних теоретичних досліджень протягом останніх років. Виконуючи дослідження в області безпроводних мереж, які були виконані в магістерській кваліфікаційній роботі, теоретичним підґрунтям

були роботи вчених: Гітліца М. В., Михалевського Д. В., Городецької О.С., Слюсара В.І., Горбатого І.В. та ін.

**Мета та постановка задачі.** Метою магістерської кваліфікаційної роботи є аналіз та дослідження методів підвищення ефективності технології MIMO в стандарті 802.11ac.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- виконати аналіз безпроводного стандарту IEEE 802.11ac Wi-Fi;
- виконати дослідження технології MIMO в стандарті 802.11ac;
- виконати дослідження методів підвищення ефективності технології MIMO в стандарті 802.11ac
- розробити структурну схему для побудови безпроводної мережі у гуртожитку стандарту 802.11ac технології MIMO та відповідно розрахувати основні характеристики;
- виконати моделювання технології MIMO для стандарту 802.11ac;
- виконати економічне обґрунтування дослідження;
- провести аналіз питань охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

**Об'єктом дослідження** є методи та засоби підвищення ефективності роботи технології MIMO в стандарті 802.11ac.

**Предметом дослідження** є передача інформації по безпроводному каналі стандарту 802.11ac із використанням технологій, що дозволяють підвищити ефективність роботи антени MIMO.

**Методи досліджень** базуються на використанні: методів формування й оброблення сигналів для підвищення ефективності телекомунікаційних систем та мереж передавання даних: методів модуляції/демодуляції для визначення частотного діапазону сигналу, методів коригуючого кодування/декодування для усунення помилок при передачі інформації, методів ущільнення/розділення каналів для підвищення пропускної здатності каналу при передачі інформації, методів множинного доступу для виявлення та контролю колізій, експериментальних програмних досліджень

безпроводних каналів для дослідження ефективності застосованої системи, методів імітаційного моделювання телекомунікаційних систем та мереж для проведення експерименту на комп'ютері в цілях проектування, аналізу і оцінки функціонування об'єкту, методів математичного аналізу для проектування телекомунікаційної мережі.

**Наукова новизна одержаних результатів:** Вперше досліджено структуру безпроводної мережі стандарту 802.11ac для гуртожитку із застосуванням технології MU-MIMO, що дозволяє підвищити ефективність системи.

**Практичне значення.** У даній роботі проаналізовані технічні можливості нового цифрового стандарту 802.11ac. Запропонована побудова безпроводної мережі стандарту 802.11ac з використанням технології MIMO у гуртожитку. Проведено розрахунки безпроводного каналу стандарту 802.11ac, які показали ефективність даної технології та здійснено моделювання системи

Крім того, результати роботи можна використовувати в навчальному процесі в дисциплінах телекомунікаційні мережі NGN та мультисервісні системи наступних поколінь, системи доступу, телекомунікаційні системи та мережі.

**Апробація результатів роботи.** Результати, які отримані в магістерській кваліфікаційній роботі були представлені на науково-технічній конференції факультету інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, секції «телекомунікації» у 2017 році.

# 1 АНАЛІЗ БЕЗПРОВІДНОГО СТАНДАРТУ IEEE 802.11ac Wi-Fi

## 1.1 Аналіз розвитку безпроводних мереж

На сьогоднішній день великого розвитку в області передачі даних досягли безпроводні мережі – мережі радіозв'язку[3].

Безпроводними технологіями називають інформаційні технології, що призначені для безпроводної передачі даних (інформації) на відстань між двома й більше об'єктами. Для передачі даних (інформації) може використовуватися інфрачервоне випромінювання, радіохвилі, оптичне або лазерне випромінювання. На сьогоднішній день існує безліч безпроводних технологій, таких як Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth та інші[4].

У 1990 році комітет зі стандартів IEEE 802 сформував робочу групу з для безпроводних локальних мереж – 802.11. Стандарт IEEE 802.11 є базовим стандартом для побудови безпроводних локальних мереж (Wireless Local Network — WLAN). Стандарт IEEE 802.11[6] постійно вдосконалювався, а тому зараз існує сімейство, до якого відносять специфікації IEEE 802.11 з буквеними індексами. Індеси a, b, g, i, n та ac є основними на сьогодні й користуються найбільшою популярністю.

Потреба в безпроводному доступі до локальних мереж росте по мірі збільшення числа мобільних пристроїв, таких як ноутбуки і PDA, а також із зростанням бажання користувачів бути підключеними до мережі без необхідності підключення шнура до комп'ютера.

На сьогоднішній день особливо швидко розвивається така галузь телекомунікаційної індустрії обладнання і послуг як безпроводні мережі передачі інформації (БМІІ). При цьому, на ринку пропонується досить широкий спектр обладнання безпроводного доступу, в номенклатурі і призначення якого необізнаному користувачеві розібратися не так вже й легко, від найпростішого обладнання для організації локального безпроводного інтерфейсу (Bluetooth, Home RF, UWB) до обладнання для доступу в глобальні

мережі і побудови безпроводних комп'ютерних мереж (Wi-Fi, WiMAX, DECT, GSM).

Для просування на ринку пристроїв для бездротових локальних мереж (WLAN) була створена група, що одержала назву Альянс Wi-Fi. Даний альянс здійснює керівництво роботами по сертифікації устаткування різних виробників і видачі дозволу на використання членами Альянсу Wi-Fi логотипа торговельної марки Wi-Fi. Наявність на устаткуванні логотипа Wi-Fi гарантує надійну роботу й сумісність устаткування при побудові бездротової локальної мережі (WLAN) навіть при використанні пристроїв різних виробників. На сьогоднішній день Wi-Fi сумісним є устаткування, побудоване по стандарту IEEE 802.11a, b і g [8-10] (для забезпечення захищеного з'єднання також може використовуватися стандарт IEEE 802.11i [11]). Крім того, наявність на устаткуванні логотипа Wi-Fi означає, що робота устаткування здійснюється в діапазоні 2,4 ГГц або 5 ГГц. Отже, під Wi-Fi варто розуміти сумісність устаткування різних виробників, призначеного для побудови бездротових локальних мереж, з урахуванням ви-кладених вище обмежень.

В загальному існують три основних напрямки застосування безпроводних мереж:

- робота в замкнутому просторі (офіс, виставковий зал і т. п.),
- з'єднання віддалених локальних мереж (або віддалених сегментів локальної мережі),
- побудова територіально розподілених безпроводних мереж передачі інформації.

Для з'єднання віддалених локальних мереж (або сильно розміщених в просторі сегментів локальної мережі) може використовуватися обладнання з спрямованими антенами, спеціальними підсилювачами і великою висотою розміщення антен.

Існують чотири типи БМШ (рис. 1.1) [5]:

- a) WPAN - wireless personal area network - безпроводні персональні мережі з радіусом дії від сантиметрів до кількох метрів (до 10-15 м).



б) WLAN - wireless local area network - безпроводні локальні мережі, що мають на увазі взаємну віддаленість пристроїв на відстані до сотень метрів з потужністю передавачів до 100 мВт.

в) WMAN - Wireless Metropolitan Area Network - безпроводні міські мережі – безпроводні мережі, що слугують для організації зв'язку в межах міста.

г) WWAN - безпроводні глобальні мережі передачі інформації, що представлені в основному супутниковими системами зв'язку.

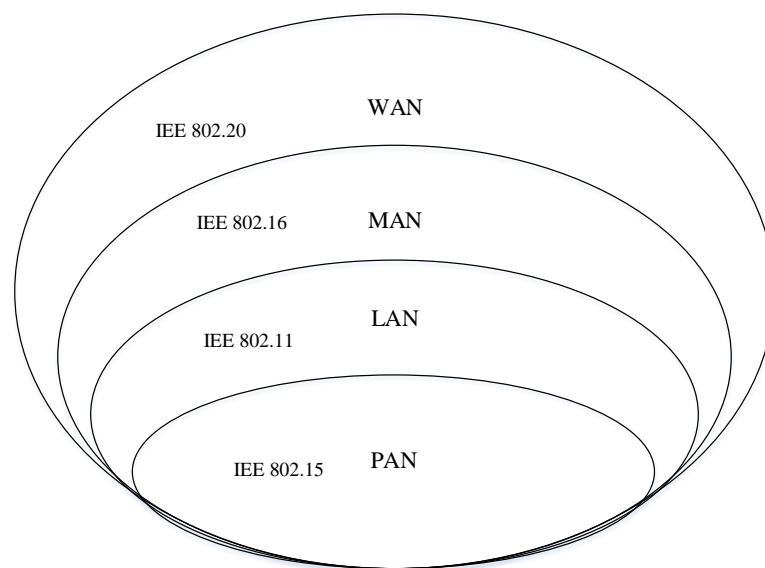


Рисунок 1.1 – Класифікація технологій безпроводних мереж передачі інформації

Мережа WLAN [12] є видом локальної обчислювальної мережі (LAN), що застосовує для зв'язку і передачі даних між вузлами високочастотні радіохвилі, а не кабельні з'єднання. Система передачі даних є гнучкою, яка застосовується як розширення - чи альтернатива для кабельної локальної мережі всередині однієї будівлі або в межах деякої території.

Мережа WLAN має переваги використання порівнюючи з провідною локальною мережею:

1) Підвищення продуктивності. Мережа WLAN забезпечує не прив'язану до окремих приміщень мережу і доступ в Інтернет, а дає користувачам

можливість переміщатися по території підприємства або організації, залишаючись підключеним до мережі. Проста і швидка побудова локальної мережі. Також не потрібно тягнути і зміцнювати кабелі.

2) Гнучкість установки. Безпроводну мережу можна побудувати там, де не можна протягнути кабелі; технологія WLAN полегшує тимчасову установку мережі і її переміщення. Зниженням вартості експлуатації. Безпроводні мережі знижують вартість установки, оскільки не потрібні кабельні з'єднання (як в результаті досягається економія).

3) Масштабованість. Реконфігурація і розширення мережі для WLAN не є складним завданням: пристрої, що призначені для користувача можна інтегрувати в мережу, встановивши безпроводні мережеві адаптери.

4) Сумісність. Різні марки сумісних мережевих і клієнтських пристроїв будуть взаємодіяти між собою.

Безпроводні системи передачі даних будуються на моделі взаємодії відкритих систем (OSI) і класифікуються за[4]:

- способом обробки первинної інформації: аналогові та цифрові;
- шириною смуги передачі: вузькосмугові, широкосмугові, надширокосмугові ;
- локалізацією абонентів: рухомі та стаціонарні;
- географічною протяжністю: персональні, локальні, регіональні, глобальні;
- видом інформації, що передається: голос, відео, передача даних.

Створення системи наземного радіозв'язку на основі сучасних телекомунікаційних технологій, в яких знаходять широке застосування способи передачі інформації (даних, мови) за допомогою TCP/IP-протоколів (транкінгові системи, стільникові системи зв'язку, DECT-системи, мережі стандарту IEEE 802.11 (комерційна назва Wi-Fi) та IEEE 802.16 (комерційна назва WiMAX) необхідно здійснювати так, щоб реалізувати можливість адаптивного поєднання кореспондентів з одночасним чітким визначенням прав їх доступу до системи та забезпеченням безпеки зв'язку [1].

Сукупність стандартів 802.11x [7] (поєднуються аббревіатурою Wi-Fi – Wireless Fidelity) включає в себе ряд ратифікованих стандартів передачі даних (802.11a/b/g/n/ac), і ряд документів, що описують додаткові функції [4].

### **1.1.1 Аналіз основних особливостей безпроводного стандарту 802.11ac**

Стандарт технології Wi-Fi 802.11ac на сьогоднішній день швидкими темпами завойовує нові простори. Технологія стандарту Wi-Fi 802.11ac має значні переваги [13], які дозволяють використовувати технологію з більшим комфортом у порівнянні зі стандартом Wi-Fi 802.11n:

- висока швидкість передачі;
- широке покриття;
- енергозберігаючий режим для мобільних пристроїв;

Технологія Wi-Fi 802.11ac є результатом розвитку попереднього стандарту 802.11n і всієї групи IEEE 802.11 в цілому.

Основними перевагами стандарту Wi-Fi 802.11ac є високі швидкості передачі в радіоканалі і, відповідно, більша агрегована смуга пропускання точки доступу, а також більш досконалі механізми контролю активного і пасивного стану клієнтських пристроїв. Все це разом веде до значної економії заряду батареї мобільного пристрою.

Рішення на базі Wi-Fi стандарту 802.11ac досягає високих швидкостей передачі даних за допомогою тривимірної функціональної матриці [14]:

- більша кількість поєднаних частотних каналів в сумі до: 80 МГц або навіть 160МГц (в порівнянні з максимумом в 40МГц для 802.11n);
- велика доступна модуляція: до QAM-256 (в 802.11n максимум QAM-64);
- більший рівень MIMO: до 8 просторових потоків (в 802.11n до 4 потоків).

Технологія 802.11ac працює тільки на частотах Wi-Fi 5 ГГц. Тому точки доступу з двома смугами найчастіше продовжують використовувати 801.11n

на частотах 2,4 ГГц. Але Wi-Fi клієнти 802.11ac працюють в менш завантаженому спектрі частот 5 ГГц.

Далі наведемо сітку робочих каналів Wi-Fi частоти в 5 ГГц [15].

Таблиця 1.1– Сітка робочих каналів Wi-Fi і частоти в 5 ГГц:

Канал	36		40		44		48								
Центральна частота, МГц	5180		5200		5220		5240								
Смуга	UNII-1														
Канал	52	56	60	64	100	104	108	112	116	120	124	128	132	136	140
Центральна частота, МГц	5260	5280	5300	5320	5500	5520	5540	5560	5580	5600	5620	5640	5660	5680	5700
Смуга	UNII-2														
Канал	149		153		157		161								
Центральна частота, МГц	5745		5765		5785		5805								
Смуга	UNNII-3														

Для обчислення середньої частоти каналу Wi-Fi можна використовувати наступну формулу:

$$F_{\text{сер.}} = 5000 + (5 \cdot N) / \text{МГц} \quad (1.1)$$

де N – номер каналу Wi-Fi, наприклад 36 (5180 МГц), 40 (5200 МГц) і т.д.

Формування каналів Wi-Fi в 5 ГГц представлено далі на рисунку 1.2.

При цьому дистанція від граничних діапазонів становить 30 МГц, а міжканального рознесення становить 20 МГц.

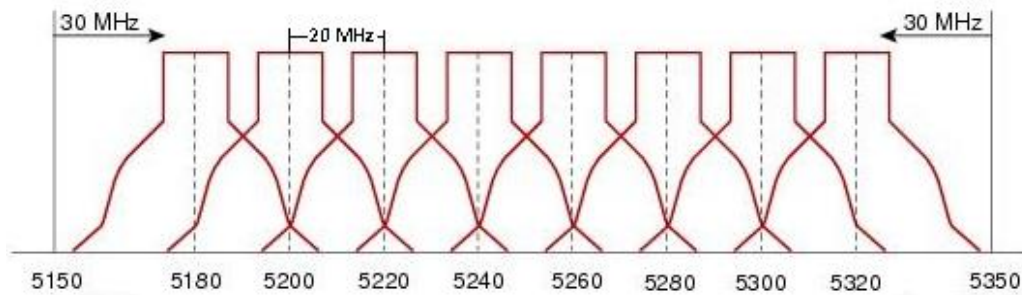


Рисунок 1.2 – Формування каналів Wi-Fi в 5 ГГц

Перше покоління [16] (Перша хвиля) пристроїв стандарту WiFi 802.11ac (Wave-1) використовувало напівдуплексну радіотехнологію. Такі пристрої використовують, як правило, частотні канали шириною до 80 МГц і найчастіше до трьох просторових потоків. Тому при відносно грубому розподілі можна позначити низький рівень продуктів 802.11ac зі швидкостями в радіоканалі до 433 Мбіт/с, середній рівень зі швидкостями до 867 Мбіт/с і високий рівень зі швидкостями до 1,3 Гбіт/с. Практично доступні швидкості для користувачів будуть значно нижчі в силу проблем загальної ефективності групи стандартів 802.11. Як правило, практично доступний максимум не вище 60%.

Друге покоління [16] продуктів стандарту 802.11ac підтримує частотні канали до 160 МГц до чотирьох просторових потоків і технологію одночасної комунікації більш, ніж з одним користувачем MU-MIMO [17] (Multi User MIMO). MU-MIMO дозволяє відправляти безліч фреймів одночасно до багатьох користувачам в тому ж самому частотному спектрі. Тим самим з множинними антенами і з допомогою відповідної технології точка доступу може вести себе як безпроводний комутатор. Але технологія обмежена зверху максимальною кількістю доступних просторових потоків. Звідси в разі трьох підтримуваних просторових потоків на точці доступу і наявності тільки потоків трьох клієнтів (MacBook Pro, наприклад), з точкою буде взаємодіяти тільки один клієнт навіть за підтримки MU-MIMO. Тому MU-MIMO особливо перспективно виглядає для випадку, коли в мережі присутні в основному персональні мобільні пристрої, такі як смартфони та планшети, які мають максимум 2 просторових потоки, але частіше за все один. Для випадку

смартфонів з одним потоком і точки з трьома потоками і MU-MIMO ми будемо мати випадок роботи один до трьох, і точка буде підтримувати до трьох клієнтів одночасно і паралельно.

Другій хвилі стандарту WiFi 802.11ac [12] (Wave-2) характерні точки доступу зі швидкостями в радіоканалі до 3,47 Гбіт/с (4 просторових потоки, QAM-256, MU-MIMO). При цьому максимум стандарту 802.11ac забезпечує вихід на каналній швидкості до 6,93 Гбіт/с з підтримкою до 8-и просторових потоків. Але 8 потоків зажадають, як мінімум, 8 антен (а бажано і більше) з необхідним рознесенням, що передбачає істотне збільшення розмірів пристроїв і вимагає більшу кількість енергії для роботи через PoE.

Даний стандарт дозволяє використання модуляції 256-QAM з ефективністю кодування 3/4 і 5/6, що дозволяє збільшити швидкість передачі, а також використання багатомножинного доступу (MU-MIMO – Multi-user MIMO) і алгоритму STA [19] (Spanning Tree Algorithm- алгоритм зв'язуючого дерева мережі). Також в стандарті 802.11 ac застосовується доступ з просторовим розділенням каналів (SDMA – Space Division Multiple Access), при якому потоки розділені не по частоті, а в просторі.

Таблиця 1.2 – Досяжні швидкості в стандарті 802.11ac

Пропускна здатність каналу	Приймально-передатвальні антени	Модуляція і кодування	Тип пристрою	Пропускна здатність (індивідуальна)	Пропускна здатність (сумарна)
80 МГц	1×1	256-QAM 5/6, короткий сигнал розділення	Смартфон	433 Мбіт/с	433 Мбіт/с

Продовження таблиці 1.2

80 МГц	2×2	256-QAM 5/6, короткий сигнал розділення	Планшет, ПК	867 Мбіт/с	867 Мбіт/с
160 МГц	1×1	256-QAM 5/6, короткий сигнал розділення	Смартфон	867 Мбіт/с	867 Мбіт/с
160 МГц	2×2	256-QAM 5/6, короткий сигнал розділення	Планшет, ПК	1,73 Гбіт/с	1,73 Гбіт/с
160 МГц (MU- MIMO)	4× Tx AP	256-QAM 5/6, короткий сигнал розділення	Декілька смартфонів	867 Мбіт/с на пристрій	3,47 Гбіт/с
160 МГц (MU- MIMO)	8× Tx AP	256-QAM 5/6, короткий сигнал розділення	Цифорий телевізор, неттоп, планшет, ПК, смартфони	867 Мбіт/с до двох 1х клієнтів 1,73 Гбіт/с до одного 2х клієнтів 3,47 Гбіт/с до одного 4х клієнтів	6,93 Гбіт/с
160 МГц (MU- MIMO)	8× Tx AP	256-QAM 5/6, короткий сигнал розділення	Декілька неттопів і ПК	1,73 Гбіт/с до кожного клієнта	6,93 Гбіт/с

Важливо відмітити, що останні два варіанти з вісьмома просторовими потоками на даному етапі розвитку технології виглядають малоймовірними для масового виробництва і застосування. Тим більше, що наявність трьох каналів, що не перекриваються в 5ГГц шириною 160МГц кожен поки не

доводилося зустрічати ні в одній країні світу. Тільки комісія FCC в США досить близько підійшла до того, щоб розчистити таку ділянку спектра та забезпечити максимальні можливості для реалізації рішення стандарту Wi-Fi 802.11ac.

Характеристики покриття радіопристроїв з 802.11ac значно вищі, ніж 802.11n. Хоча максимальні швидкості на 802.11ac доступні відносно близько до точки доступу, але загальні дистанції надання високошвидкісного сервісу значно більші, ніж у пристроїв 11n. Нижче наведено графік компанії Cisco з аналізом Rate vs Range [16]. Дистанція відображена в футах.

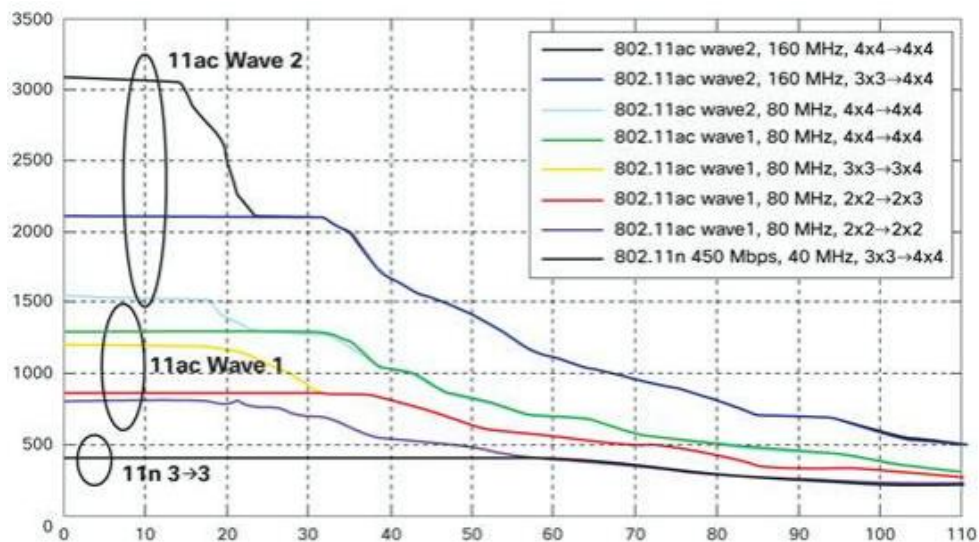


Рисунок 1.3 – Швидкість/Дистанція стандарту 802.11ac

## 1.2 Основні принципи побудови мережі стандарту 802.11ac

Зазвичай схема Wi-Fi мережі містить не менше однієї точки доступу і не менше одного клієнта. Також можливе підключення двох клієнтів в режимі точка-точка (Ad-hoc), коли точка доступу не використовується, а клієнти з'єднуються за допомогою мережевих адаптерів «безпосередньо». Точка доступу передає свій ідентифікатор мережі SSID (Service set identification) за допомогою спеціальних сигнальних кадрів-маяків зі швидкістю 0,1 Мбіт/с кожні 100 мс. Тому 0,1 Мбіт/с – найменша швидкість передачі даних для Wi-



Fi. Знаючи SSID мережі, клієнт може з'ясувати, чи можливе підключення до даного пункту доступу. При попаданні в зону дії двох точокдоступу з ідентичними SSID приймач може вибирати між ними на підставданих про рівень сигналу, відповідно до прийнятих кадрів-маяках.

За способом об'єднання ТД в єдину систему можна виділити:

- автономні ТД (самостійні, децентралізовані, розумні);
- ТД під управлінням контролера ( «з легкою вагою», централізовані)
- безконтрольні, але не автономні (керовані без контролера);

У разі автономної архітектури мережа будується як набір незв'язаних ТД, кожнз яких конфігурується і обслуговується незалежно. Тому складність обслуговування мережі, побудованої подібним чином, зростає лінійно з ростомкількості пристроїв. Зазвичай такі мережі містять не більше 3-5 ТД.

Існують винятки, які полегшують створення більш масштабних мереж, наприклад, технологія кластеризації ТД. Таке рішення пропонує Cisco в лінійціТД для малого бізнесу (Cisco WAP 321, WAP 121). Але така архітектура в будь-якому випадку не має повноцінного управління радіоресурсами, так як немає єдиного центру.

Все зводиться до спрощення завдання конфігурації мережі.

Розвитком автономної архітектури з'явилися псевдо-централізовані рішення, в яких у відносно невеликій групі ТД одна точка виділяється як контролер групи. По суті такий міні-контролер може виконувати багато функцій повноцінного контролера мережі Wi-Fi. Однак процесор ТД має обмеженупродуктивність і масштабування таких рішень невелике. Подібні рішенняі ТД пропонує, наприклад, компанія Aruba (Aruba Instant).

У разі централізованої архітектури мережі Wi-Fi повне управління інфраструктурою мережі радіодоступу виконується контролером мережі WLAN.

Наприклад, у Cisco подібна архітектура називається CUWN (Cisco Unified Wireless Network). Контролер в централізованому вирішенні мережі стандарту Wi-Fi керує завантаженням/змінною ПО, змінами конфігурації, RRM

(динамічне управління радіоресурсами), керує зв'язком із зовнішніми серверами (AAA, DHCP, LDAP і т.п.), керує аутентифікацією користувачів, керує профілями якості обслуговування QoS. Контролери можуть об'єднуватися в групи для забезпечення безшовного роумінгу клієнтів між різними точками доступу в зоні покриття.

За способом організації та управління радіоканалами можна виділити безпроводні локальні мережі [5]:

- з статичними настройками радіоканалів;
- з динамічними (адаптивними) настройками радіоканалів;
- з «шаруватою» або багат шаровою структурою радіоканалів.

Ad-hoc-мережа (бездротова динамічна/самоорганізована мережа) - децентралізована бездротова мережа, яка не має постійної структури. Клієнтські пристрої з'єднуються «на льоту», утворюючи собою мережу. Кожен вузол мережі намагається переслати дані, призначені іншим вузлам. При цьому визначення того, якому вузлу пересилати дані, проводиться динамічно, на підставі зв'язності мережі.

Стандарт IEEE 802.11ac передбачає два режими управління мережею: DCF (Distributed Coordination Function), коли функції управління розподілені між усіма пристроями мережі IEEE 802.11ac і режим PCF (Point Coordination Function), коли вони зосереджені в одній певній точці доступу.

У режимі DCF всі пристрої працюють за принципом конкурентного доступу до каналу передачі, тобто пріоритетів не існує. Робота в режимі PCF може відбуватися тільки під управлінням спеціальної точки доступу, званої точкою координації (PC). Необхідність в режимі централізованого управління PCF може виникнути при передачі чутливої інформації до затримок інформації (наприклад, відеопотоків), коли необхідно вводити пріоритети доступу.

Коли мережа переходить в режим PCF, в певні, періодично повторювані інтервали, конкурентний доступ скасований, і весь обмін відбувається під управлінням координуючого пристрою (PC) (рис.1.4).

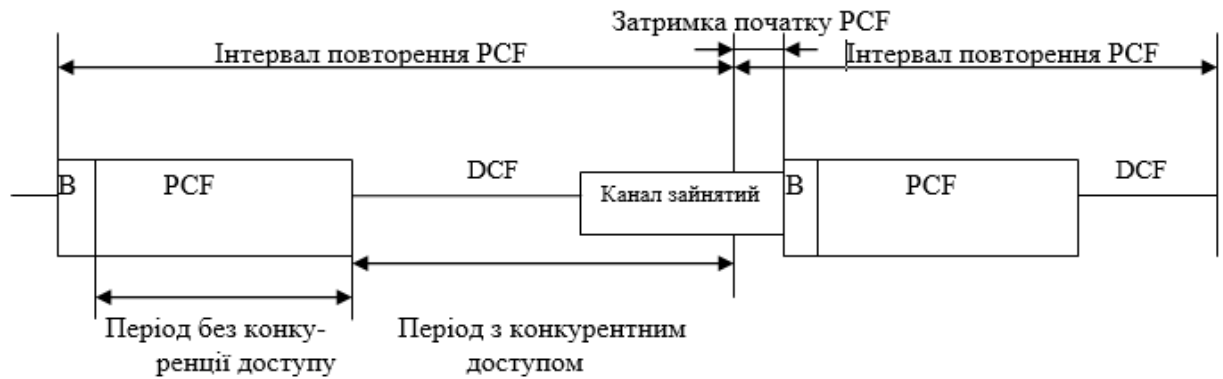


Рисунок 1.4– Цикли роботи мережі в режимах з концентрованим (PCF) і розподіленим керуванням (DCF)

В – сигнальний пакет (Beacon).

По завершенні такого інтервалу мережа повертається в режим DCF. Інтервали під керуванням РС слідуєть через строго певний період, на початку кожного інтервалу РС передається особливий сигнальний кадр (Beacon). РС не може передати черговий сигнальний кадр до тих пір, поки канал не звільниться, тобто черговий "вільний від конкуренції" інтервал може початися із затримкою.

При проектуванні безпроводної мережі в приміщеннях застосовують різні підходи, які майже завжди містять кілька етапів [12].

1. Оцінка кількості точок доступу в залежності від передбачуваного числа користувачів Wi-Fi і послуг, які повинні бути їм надані.
2. Розміщення точок доступу на план-схемі приміщення з урахуванням його розмірів, матеріалів, з яких виготовлені стіни і меблі, а також розміщення користувачів. Одним з найпростіших способів визначення кількості точок доступу є завдання фіксованої кількості користувачів на точку.

Наприклад, існує рекомендація використовувати одну точку доступу на 20 користувачів при відсутності шифрування і одну точку на 15 користувачів при використанні будь-якого шифрування. Такий підхід дуже простий, але має ряд недоліків. По-перше, така кількість точок доступу може виявитися надмірною, що призведе до зайвих витрат як на саме бездротове обладнання, так і на організацію його розміщення (Електроживлення, підключення до

провідної локальної мережі). По-друге, при великій кількості точок доступу, розміщених в одному приміщенні, розрахованому на велике число користувачів (наприклад, конференц-зал або лекторій), вони можуть заважати один одному і їх потрібно розносити по різних каналах, що може бути складним при використанні діапазону 2,4 ГГц (наприклад, якщо використовується технологія 802.11g).

Другий спосіб виходить з вимог за рівнем сигналу. Наприклад, вважається, що для доступу в Інтернет (електронна пошта та веб-серфінг) досить забезпечити на всій території приміщення рівень сигналу не гірше, ніж - (68-70) дБм. Такий підхід як правило вимагає застосування спеціалізованого програмного забезпечення для попереднього розрахунку, або використання вимірювань на місці, коли передбачувана до використання точка доступу розміщується в різних місцях приміщення, і проводиться вимірювання її сигналу на можливих точках розміщення користувачів. Як правило цей спосіб пропонує занижене число точок доступу, завдяки чому на практиці побудована мережа може не впоратися з навантаженням. До того ж, повне покриття приміщення може виявитися не потрібним в тому випадку, коли користувачі компактно розміщуються в одній частині приміщення, а інша частина приміщення не використовується.

Третій спосіб попереднього визначення кількості точок доступу виходить з вимог по швидкості доступу в залежності від необхідних користувачам послуг. В результаті таких розрахунків може вийти деякий усереднена кількість точок доступу. Однак питання нерівномірності розміщення користувачів також необхідно враховувати на етапі розміщення точок доступу на план-схемі приміщення.

При проведенні планування необхідно також провести енергетичний розрахунок і скласти частотний план, щоб розміщені в приміщенні точки доступу не впливали один на одного, а їх сигнал не виходив за межі приміщення і не впливав на безпроводні мережі, розташовані зовні приміщення.

Однак основний принцип мереж Ethernet – це все ж довільний конкурентний доступ, що і робить їх настільки простими в експлуатації і реалізації. У провідних мережах Ethernet використовується механізм множинного доступу до каналу зв'язку з контролем несучої і виявленям колізій (CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Станція починає передачу, тільки якщо канал вільний. Якщо станції виявляють, що на одному каналі намагаються працювати кілька станцій, всі вони припиняють передачу і намагаються відновити її через випадковий проміжок часу. Таким чином, при передачі пристрій повинен контролювати канал – працювати на прийом.

Це відносно просто при провідному зв'язку, але проблематично в безпроводних комунікаціях – загасання сигналу в ефірі набагато сильніше, ніж в проводі. З цієї причини виникають дві основні проблеми.

По-перше, дуже складне, якщо взагалі можливе вирішення, завдання контролю несучої передавальним пристроєм (коли воно мовить, то власний сигнал набагато сильніший, ніж сигнал віддаленого пристрою). По-друге, можлива ситуація, коли два пристрої (А і В) видалені і не чують один одного, але обидва потрапляють в зону охоплення третього пристрою (рис. 1.5) так звана проблема прихованих станцій.

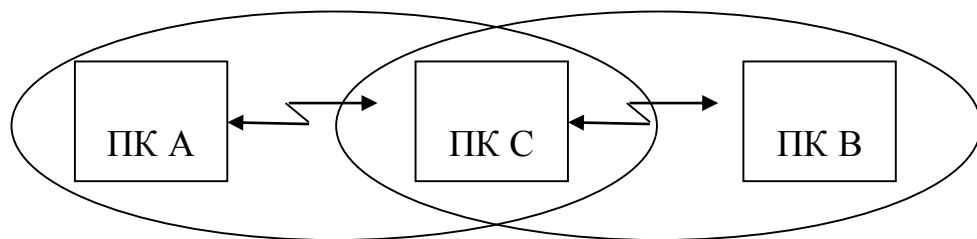


Рисунок 1.5 – Ілюстрація проблеми прихованої точки

Якщо обидва пристрої А і В, почнуть передачу, то вони принципово не зможуть виявити конфліктну ситуацію і визначити, чому пакети не проходять. Для усунення подібних проблем в специфікації IEEE 802.11ac прийнятий механізм CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) – множинний доступ з контролем несучої і запобіганням колізій. Перед

початком передачі, пристрій слухає ефір і чекає, коли канал звільниться. Канал вважається вільним за умови, що не виявлено активності протягом певного проміжку часу – міжкадрового інтервалу (IFS) певного типу. Якщо протягом цього проміжку канал залишався вільним, пристрій очікує ще протягом випадкового тайм-ауту, і якщо канал ще не зайнятий, передає пакет. Якщо пакет призначений конкретному пристрою (неширокомовна або багатоадресна передача), то приймач, успішно прийнявши пакет, посилає передавачу короткий кадр підтвердження отримання ACK (AC Knowledge).

Якщо ж передавач не прийняв ACK, він вважає посланий пакет загубленим і повторює процедуру його передачі. Якщо пристрій повторно передає пакет, для визначення незайнятості каналу йому слід розглядати збільшений міжпакетний інтервал (EIFS). Крім того, час відстрочки вибирається випадковим чином на деякому інтервалі. При першій спробі передачі цей інтервал мінімальний. При кожній наступній він подвоюється до тих пір, поки не досягне заданого граничного значення. Ці заходи введені для того, щоб пристрій, що успішно передав пакет, мав переваги в захопленні каналу.

Однак описані процедури доступу не позбавляють від проблеми прихованих станцій. Для її вирішення використовуються два додаткових кадри:

- RTS (Request to Send - запит на передачу);
- CTS (Clear to Send - підтвердження готовності).

Пристрій, який бажає відправити пакет даних, передає адресатові короткий кадр RTS. Якщо приймальний пристрій готовий до прийому, воно виставляє передавачу відповідь кадр - CTS. Далі, відповідно до описаної вище процедури, передавачу пристрій відправляє кадр з даними і чекає підтвердження ACK.

Фактично кадр формується на MAC-рівні, на фізичному рівні до нього додається заголовок фізичного рівня (PLCP). Точний формат MAC-кадру (рис. 1.6) дещо відрізняється для різних використовуваних протоколів MAC [20].



Наприклад, однією з поширених помилок при розміщенні точок доступу, є установка точки з всенаправленою антеною біля металевої або залізобетонної стіни або конструкції. В цьому випадку металева поверхня буде відображати сигнал. Діаграма спрямованості антени зміниться ставши спрямованою. До того ж виникне потужне багатопроменеве поширення (Multipath), так як половина випромінюваної потужності буде йти до металевої стіни/поверхні і, відбиваючись назад, створить інтерференцію своєму ж корисному випромінюванню.

Іншим прикладом може бути розміщення точки біля емностей і труб з водою, яка інтенсивно поглинає високочастотне випромінювання (Особливо в частотному спектрі 2,4 ГГц). Основним методом вирішення є винесення точок доступу з внутрішніми антенами (або самих зовнішніх антен) за межі перешкод, забезпечуючи безперешкодне випромінювання з урахуванням діаграми спрямованості антен.

Також необхідно враховувати, що рівень сигналу зменшується пропорційно квадрату відстані, тому швидкість швидко падає природним шляхом у міру віддалення від точки доступу.

#### **1.4 Аналіз специфікацій стандарту 802.11ac**

Стандарт IEEE 802.11ac працює [21] на нижніх двох рівнях моделі ISO/OSI, фізичному і каналному. Будь-яка мережева програма, мережева операційна система, або протокол (наприклад, TCP/IP), будуть так само добре працювати в мережі 802.11ac, як і в мережі Ethernet. Роботи в області створення безпроводних ЛЗ почалися в 1989 році, коли була організована робоча група 11-го комітету IEEE 802. У липні 1997 року в результаті роботи цієї групи був опублікований стандарт IEEE 802.11 «Технічна специфікація фізичного рівня і рівня контролю доступу до каналу передачі безпроводних локальних мереж» (Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications). Він визначав архітектуру мережі, принципи доступу пристроїв



до каналів зв'язку, формати пакетів, способи аутентифікації і захисту даних [5].

В інфрачервоному діапазоні передбачалася імпульсно-позиційна модуляція, в діапазоні 2,400-2,4835 ГГц - режими модуляції з розширенням спектра методом частотних стрибків (FHSS) і методом прямої послідовності (DSSS). Швидкості обміну встановлювалися на рівні 1 і 2 Мбіт/с. Однак пристрої, відповідні вихідної специфікації IEEE 802.11, так і не були створені з огляду на те, що за період розробки стандарту пропускну здатність провідних мереж Ethernet сильно зросла, і максимальна швидкість передачі 2 Мбіт / с, передбачена в IEEE 802.11, вже не задовольняла користувачів. Проблему вирішило поява стандартів IEEE 802.11b, 802.11a і 802.11g. Разом з тим стандарт IEEE 802.11 є базовим і визначає протоколи, необхідні для організації безпроводних локальних мереж (WLAN). Основні з них - протокол управління доступом до середовища MAC (Medium Access Control - нижній підрівень рівня ланки даних) і протокол PHY передачі сигналів у фізичному середовищі. Це викликано прагненням підвищити ефективну пропускну здатність системи завдяки зниженню накладних витрат на повторну передачу пакетів.

Як основний метод доступу до середовища стандартом 802.11ac визначено механізм CSMA/CA [21] (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – множинний доступ з виявленням несучої і запобіганням колізій).

В основу стандарту 802.11ac покладена стільникова архітектура, причому мережа може складатися як з однієї, так і декількох осередків (сот). Кожна сота управляється базовою станцією, званою точкою доступу (Access Point, AP), яка разом з розташованими в межах радіусу її дії робочими станціями користувачів утворює базову зону обслуговування (Basic Service Set, BSS).

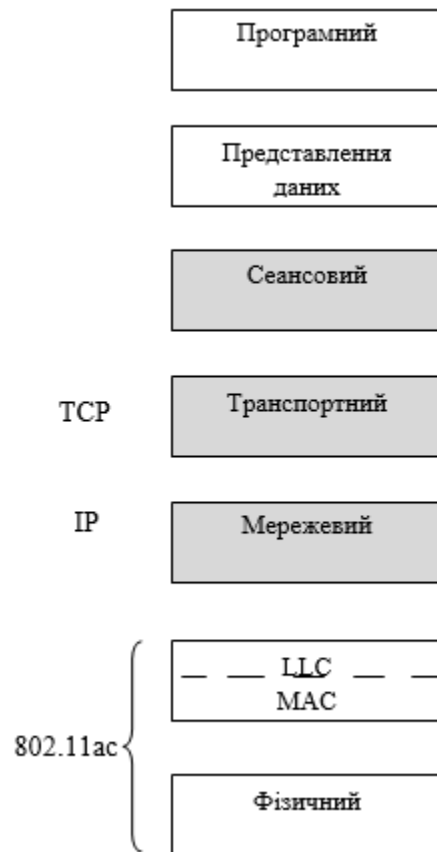


Рисунок 1.7 – Рівні моделі ISO / OSI і їх відповідність стандарту 802.11ac

Точки доступу багатостільникової мережі взаємодіють між собою через розподільчу систему (Distribution System, DS), що є еквівалентом магістрального сегменту кабельних ЛЗ.

Вся інфраструктура, що включає точки доступу і розподільну систему утворює розширену зону обслуговування (Extended Service Set). Стандартом передбачений також односотовий варіант безпроводної мережі, який може бути реалізований і без точки доступу, при цьому частина її функцій виконується безпосередньо робочими станціями.

Для забезпечення переходу мобільних робочих станцій із зони дії однієї точки доступу до іншої в багатосотових системах передбачені спеціальні процедури сканування (активного і пасивного прослуховування ефіру) і приєднання (Association), проте строгих специфікацій по реалізації роумінгу стандарт 802.11ac не передбачає.

Для захисту WLAN стандартом IEEE 802.11ac[22] передбачено цілий комплекс заходів безпеки передачі даних під загальною назвою Wired Equivalent Privacy (WEP). Він включає засоби протидії несанкціонованого доступу до мережі (механізми і процедури аутентифікації), а також запобігання перехоплення інформації (шифрування).

На фізичному рівні визначені два широкосмугових радіочастотних методи передачі і один - в інфрачервоному діапазоні. Радіочастотні методи працюють в ISM-діапазоні 2,4 ГГц і зазвичай використовують смугу 83 МГц від 2,400 ГГц до 2,483 ГГц. Технології широкосмугового сигналу, що використовуються в радіочастотних методах, збільшують надійність, пропускну здатність, дозволяють багатьом непов'язаним один з одним пристроям розділяти одну смугу частот з мінімальними перешкодами один для одного. Стандарт 802.11ac використовує метод прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) і метод частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Ці методи кардинально відрізняються, і несумісні один з одним.

MAC рівень отримує блок даних від рівня LLC і відповідає за виконання функцій, пов'язаних з доступом до середовища, і за передачу даних.

Перевагами стандарту Wi-Fi 802.11ac є [14] висока швидкість передачі в радіоканалі і, відповідно, більша агрегована смуга пропускання точки доступу, а також більш досконалі механізми контролю активного і пасивного стану клієнтських пристроїв. Ці основні переваги ведуть до значної економії заряду батареї мобільного пристрою.

Пристрої на базі Wi-Fi стандарту 802.11ac досягають високих швидкостей передачі даних (data transfer) за допомогою трирозмірної функціональної матриці, що характеризується [13]:

1. Більшою кількістю з'єднувальних частотних каналів в сумі до: 80 МГц або навіть 160 МГц (в порівнянні з максимумом в 40МГц для стандарту 802.11n).

2. Більшою доступною модуляцією: до QAM-256 (в той час як для стандарту 802.11n максимум складає QAM-64).

3. Більшим рівнем MIMO: до 8 просторових потоків (а для стандарту 802.11n допускається лише до 4 потоків).

### 1.4.1 Структура приймально- передавального пристрою стандарту 802.11

Сучасний рівень, на який виходить мобільний смартфон, телефон, комунікатор можна прирівняти з персональним ноутбуком, комп'ютером чи іншими потужними електронними пристроями. В такому апараті знайдеться місце і для Wi-Fi модуля. Wi-Fi на сьогодні вже став практично стандартною функцією для будь-якого мобільного телефону, подібно до функцій SMS, GSM, GPRS, EDGE.

Мобільні апарати мають подібну структуру, за функціональним призначенням, з будь-яким пристроєм рухомого зв'язку. На рисунку 1.8 зображено структуру передавальної частини адаптеру IEEE 802.11aс[23].

Згідно структури на рис. 1.8, сигнал проходить на контролер USB (К USB) від пристрою шиною Universal Serial Bus (USB) і надходить на блок процесор обробки сигналів (ПОС), де здійснюється цифрова обробка сигналів. Далі сигнал надходить у радіо-комутатор (РК), де комутуються частотні канали. РК - пристрій керування, в загальному випадку, виконує функцію керування та слідкує за роботою радіо-комутатора та антенного комутатора (АК). Далі, в блоці попередній кодер Баркера(ПКБ) відбувається кодування на основі коду Баркера.

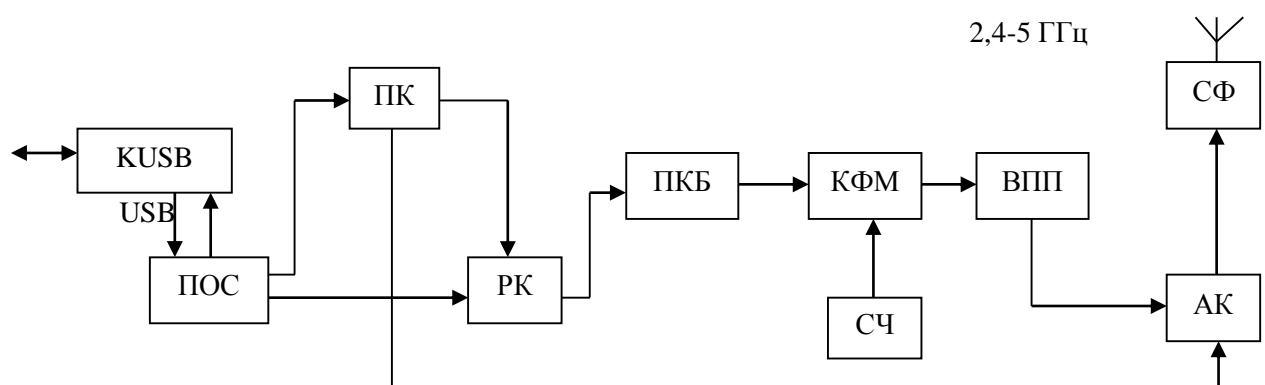


Рисунок 1.8 – Структура передавальної частини мобільного апарату стандарту IEEE 802.11ac

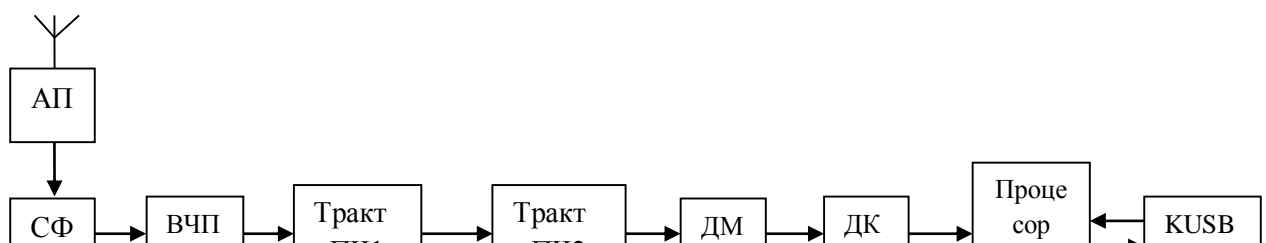
Синтезатор частот (СЧ) є джерелом коливань носійної частоти і створює дуплексне розділення по частоті. У блоці КФМ виконується квадратурна фазова модуляція (КФМ). Завершується перетворення сигналів підсиленням сигналу у блоці вихідного підсилювача потужності (ВПП). Всі сигнали надходять до антенного комутатора (АК), тут вони комутуються і, проходячи через смуговий фільтр, надходять у ефір на частотах 2,4 – 5 ГГц.

На рисунку 1.9 зображено структуру приймальної частини адаптера IEEE 802.11ac.

У приймальній частині виконується зворотне попередньому алгоритму перетворення сигналів. Сигнали, що надходять з ефіру на приймальний АП, де здійснюється попереднє підсилення сигналу, поступають у смуговий фільтр з смугою 2,4 – 5 ГГц.

Послаблені сигнали на початку підсилюються високочастотним підсилювачем (ВПЧ). У першому і другому трактах проміжної частоти (ПЧ) відбувається перенесення сигналів з високочастотного діапазону на проміжні частоти з підсиленням.

Супергетеродинна схема приймача з двійним перетворенням частоти та вхідним підсилювачем забезпечує високу чутливість та вибірність за дзеркальним і сусіднім каналами. Далі сигнал, що отриманий демодулюється в демодуляторі (ДМ) та декодується у квадратурно-фазовому демодуляторі та у декодері Баркера (ДК). Сигнали, що отримали підлягають подальшій обробці за алгоритмами ЦОС і через контролер USB (К USB) надходять до пристрою абонента [23].



2,4-5 ГГц

USB

Рисунок 1.9 – Структура приймальної частини мобільного апарату стандарту IEEE 802.11ac

Безумовно, як і будь-якому пристрої оснащеним Wi-Fi модулем, необхідною умовою використання Wi-Fi на мобільному телефоні є точка доступу. Якщо ж говорити про кількість хот-спотів у світі, то цифри надзвичайно відрізняються і залежать часто навіть не від рівня життя тієї чи іншої країни, а від рівня її відвідуваності іноземцями. За даними i-PassWi-FiGrowthMap[24]на сьогоднішній день у світі і, зокрема, у Європі така статистика:

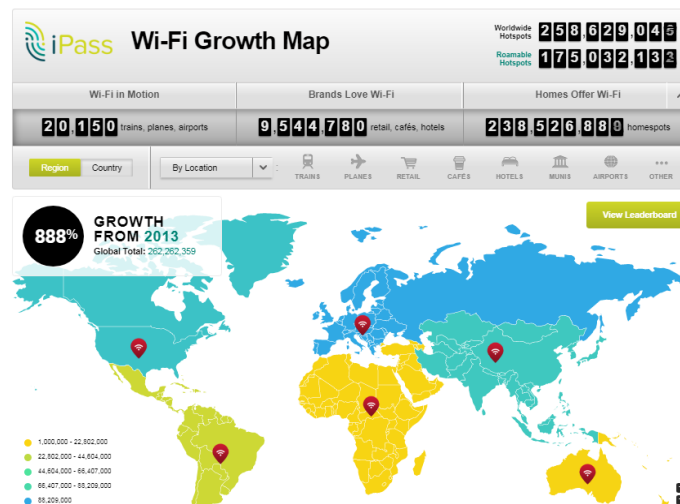


Рисунок 1.10– Статистика по кількості хот-спотів у світі



Рисунок 1.11 – Статистика по кількості хот-спотів у Європі






RANK	COUNTRY	HOTSPOTS
1	 France	13,018,673
2	 United States	9,000,000
3	 United Kingdom	5,409,000
4	 Japan	2,801,800
5	 Belgium	2,002,682

Рисунок 1.12 – Лідери-країни за кількістю хот-спотів в світі

З рисунків 1.10-1.12 видно, що лідером по кількості хот-спотів у світі є країна Франція, де налічується більше 13 млн. точок доступу.

### Висновки до розділу 1:

В даному розділі було проаналізовано особливості та специфікації стандарту 802.11ac, а також розглянуто принципи побудови мережі. Стандарт 802.11ac Wi-Fi на сьогоднішній день швидкими темпами завойовує нові простори. Технологія стандарту Wi-Fi 802.11ac має значні переваги, які дозволяють використовувати технологію з більшим комфортом у порівнянні із попереднім стандартом Wi-Fi 802.11n: це високі швидкості передачі в радіоканалі і, відповідно, більша агрегована смуга пропускання точки доступу,

а також більш досконалі механізми контролю активного і пасивного стану клієнтських пристроїв.

На сьогоднішній день за даними i-Pass Wi-Fi Growth Map лідером по кількості хот-спотів у світі є країна Франція, де налічується більше 13 млн. точок доступу.



## **2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО В СТАНДАРТІ 802.11ac**

### **2.1 Аналіз основних характеристик технології МІМО**

Технологія МІМО[1] (англ. Multiple Input Multiple Output) – метод просторового кодування сигналу, що дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, при якому передача даних здійснюється за допомогою  $N$  антен і їх прийому  $M$  антенами. Передавальні і приймальні антени рознесені так, щоб досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами.

Технологію МІМО можна віднести до досить молодих розробок. Історія починається з 1984 року, коли був зареєстрований перший патент на використання цієї технології. Початкові розробки і дослідження проходили в компанії Bell Laboratories, а 1996 році компанія Airgo Networks випустила перший МІМО-чіпсет під назвою True МІМО. Найбільшого розвитку технологія МІМО отримала на початку ХХІ століття, коли інтенсивними темпами почали розвиватися безпроводні мережі Wi-Fi і стільникові мережі 3G. А на сьогодні технологія МІМО щосили використовується в усіх цифрових мережах.

Однак, незважаючи на досить короткий проміжок часу з моменту своєї появи, напрямок МІМО-систем розвивається досить багатопланово і включає в себе різноманітне сімейство методів, які можна класифікувати за принципами поділу сигналів в приймальному пристрої. При цьому в МІМО-системах використовуються підходи до поділу сигналів як ті, які вже увійшли в практику, так і нові. До них відносяться, наприклад, просторово-тимчасове, просторово-частотне, просторово-поляризаційне кодування, а також дозвіл у напрямку приходу сигналу в приймач. За рахунок великої кількості підходів до поділу сигналів вдалося забезпечити настільки довгу розробку стандартів на використання систем МІМО в засобах зв'язку. Однак всі різновиди МІМО спрямовані на досягнення однієї мети – збільшення пікової швидкості передачі даних в мережах зв'язку за рахунок поліпшення завадостійкості.

Найпростіша антена МІМО - це система з пари несиметричних монополів (вібраторів), що зорієнтовані під кутом  $\pm 45^\circ$  щодо вертикальної осі (рис.2.1)[25].

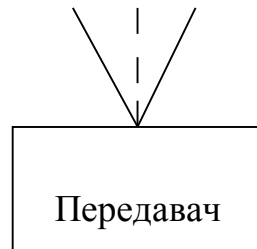


Рисунок 2.1 – Найпростіша антена МІМО

Такий кут поляризації дозволяє каналам перебувати в рівних умовах, так як при горизонтально-вертикальній орієнтації випромінювачів одна з поляризаційних складових отримала б більше загасання при поширенні вздовж земної поверхні.

Сигнали, що випромінюються незалежно кожною монополією, поляризовані взаємно ортогонально з досить високою взаємною розв'язкою по крос-поляризаційній складовій (не менше 20 дБ). Така ж антена використовується і на приймальній стороні.

Такий підхід дозволяє одночасно передавати сигнали з однаковими носійними, модульованими різним чином.

Принцип поляризаційного поділу забезпечує подвоєння пропускної здатності лінії радіозв'язку в порівнянні з випадком одиночного монополя (в ідеальних умовах прямої видимості при ідентичній орієнтації приймальних і передавальних антен).

Таким чином, по суті будь-яку систему з подвійною поляризацією можна вважати системою МІМО.

У загальному випадку структура системи МІМО складається з  $S_N$  передавачів (передавальних антен) і  $Y_M$  приймачів (приймальних антен) (рис. 2.2).

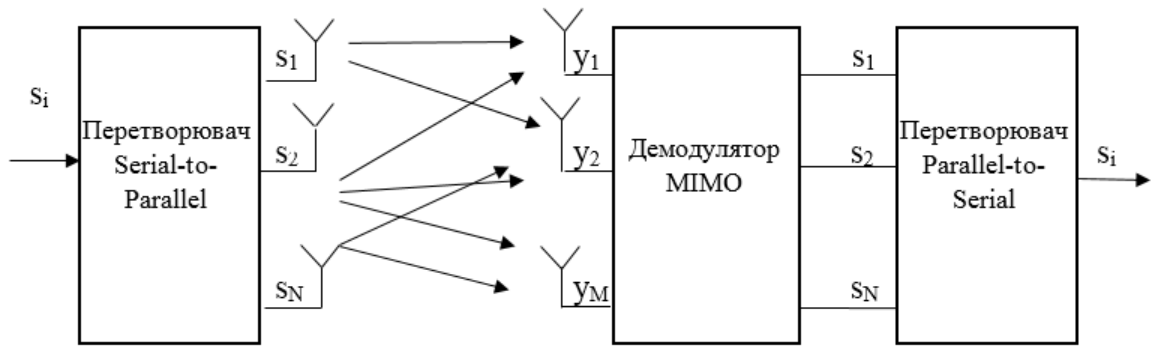


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи MIMO

Передані сигнали після впливу релеєвських завмирань і білого гаусівського шуму (БГШ) у радіоканалі, надходять в  $Y_M$  приймальних трактів.

## 2.2 Особливості побудови технології MIMO

Для початку розглянемо варіанти MIMO, які можуть бути використані для передачі даних одному користувачеві. Традиційний і найпростіший варіант використання однієї передавальної і однієї приймальної антени зображений на рисунку 2.3 Така система з точки зору термінології MIMO називається SISO – Single Input Single Output.

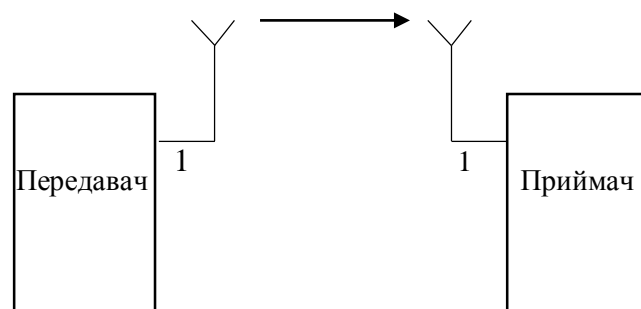


Рисунок 2.3– Антена SISO 1×1

Пропускню здатність такої системи можна розрахувати, використовуючи формулу Шеннона [26]:

$$C = B \log_2 (1 + S/N), \quad (2.1)$$

де  $C$  – пропускна здатність каналу;

$B$  – ширина каналу;

$S/N$  – співвідношення сигнал/шум.

Рознесений прийом (Rx Diversity) – це випадок використання більшої кількості антен на приймальній стороні, ніж на передавальній. З точки зору MIMO така система називається SIMO - Single Input Multiple Output. Найпростіший випадок такої системи, коли передавальна антена одна, а прийомних дві, представлений на малюнку нижче і називається SIMO 1x2.

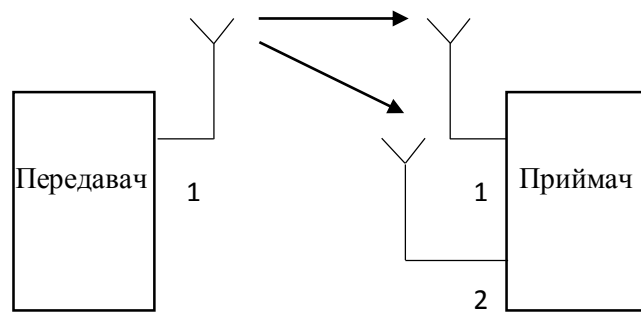


Рисунок 2.4– Антена SIMO 1x2

Даний варіант не потребує спеціальної підготовки сигналу при передачі, тому його досить просто реалізувати на практиці. При використанні рознесеного прийому збільшення пропускної здатності не відбувається. Однак, підвищується надійність передачі. У випадку зображеної вище системи на приймальній стороні буде два сигнали, і існують різні способи їх обробки. Наприклад, може вибиратися сигнал з найкращим співвідношенням сигнал/шум. Такий метод називається *switched diversity*. Або сигнали можуть складатися, що дозволяє підвищити співвідношення сигнал/шум. І такий метод називається *MRC - Maximum Ratio Combining*.

Наступна конфігурація системи зв'язку з декількома передавальними антенами при одній приймальній антені [1, 10, 42]. Такі системи отримали назву систем *MISO (Multiple-Input-Single-Output)*. У цих системах, також як і в системах *SIMO*, реалізується ідея рознесення, але рознесення застосовується

на передавальній стороні. Таким чином, в системах MISO реалізується алгоритм рознесеною передачі.

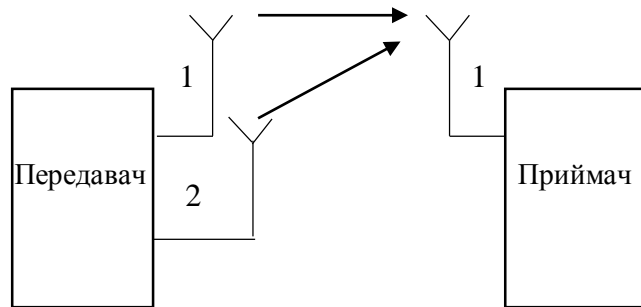


Рисунок 2.5 – Антена MISO  $2 \times 1$

Просторове ущільнення (Spatial Multiplexing) – це випадок використання декількох антен на передавальній стороні і декількох антен на приймальній.

На відміну від попередніх варіантів - MISO і SIMO, описаних вище, даний варіант спрямований не на підвищення надійності передачі, а на збільшення швидкості передачі.

Тому MIMO використовується для передачі даних мобільним станціям, які знаходяться в хороших радіо-умовах. У той час, як варіанти MISO і SIMO використовуються для передачі даних мобільним станціям, які знаходяться в більш поганих радіо-умовах.

Для того, щоб підвищити швидкість передачі даних у випадку з MIMO вхідний потік даних розбивають на декілька потоків, кожен з яких незалежно передається з окремої антени.

На рисунку нижче наводяться схеми системи MIMO з  $M$  передавальними антенами і з  $N$  приймальними антенами.

Через те, що використовується загальний канал, кожна антена на приймачі отримує сигнал не тільки призначений для, а й всі сигнали призначені іншим антен. Якщо відома матриця передачі, то вплив сигналів, призначених для інших антен, можна обчислити і мінімізувати.

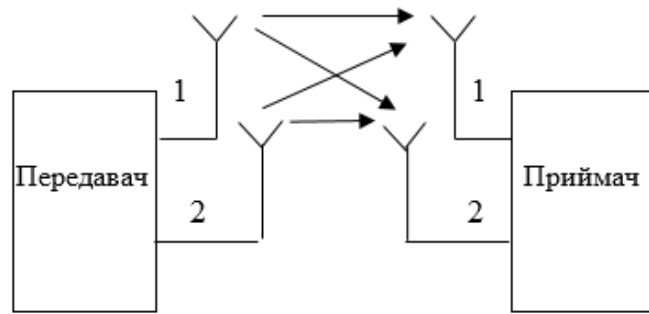


Рисунок 2.6 – Антена МІМО 2×2

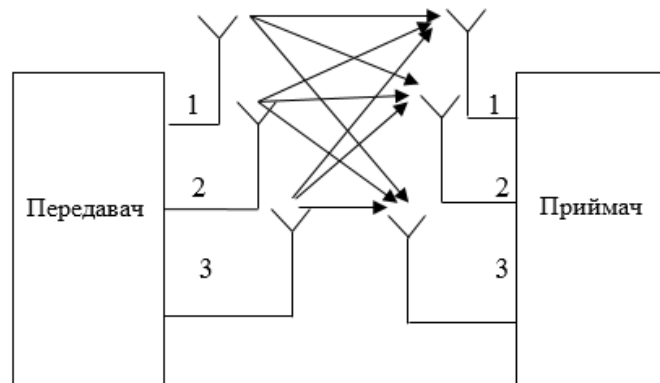


Рисунок 2.7 – Антена МІМО 3×3

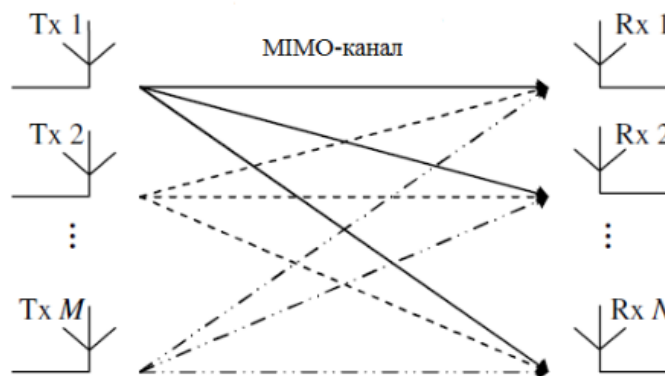


Рисунок 2.8– Принцип організації передачі сигналу системи МІМО з  $M$  передавальними антенами і з  $N$  приймальними антенами

Кількість незалежних потоків даних, які можуть одночасно передаватися, залежить від кількості використовуваних антен. Якщо кількість передавальних і приймальних антен однакова, то кількість незалежних потоків даних однакова або менше кількості антен. Наприклад, в разі МІМО 4x4 кількість незалежних потоків даних може бути 4 або менше. Якщо ж кількість

передавальних і приймальних антен не однаково, то кількість незалежних потоків даних одно мінімальній кількості антен або менше. Наприклад, в разі MIMO 4x2 кількість незалежних потоків даних може бути 2 або менше.

У системах MIMO [27], очевидно, і на передавальній стороні, і на приймальній стороні використовуються багатoelementні антени або антенні решітки. Багатoelementні антени можуть бути використані таким чином, щоб зосередити енергію в напрямлення певного абонента і сформувати відповідну діаграму спрямованості (адаптивне формування променя діаграми спрямованості – «Beamforming»). Крім того, багатoelementні антени можуть бути використані для формування декількох паралельних потоків даних (режим просторового мультиплексування - spatial multiplexing).

MIMO включає в себе просторове тимчасове рознесення передачі, просторове мультиплексування, суміщення ліній MIMO.

- Просторове тимчасове рознесення передачі (STTD) - одні й ті ж дані закодовані передані різними антенами які подвоюють енергію в каналі. Це покращує стабільність сигналу.

- Просторове мультиплексування (Spatial Multiplexing) - паралельні потоки даних за допомогою використання багатоканальності. Дозволяє збільшити швидкість в 2 рази (2x2 MIMO) і до 4 рази (4x4 MIMO) і т.д.

MIMO збільшує пропускну здатність, використовуючи просторове мультиплексування –декілька передач в одному каналі (рис.2.9) [26].

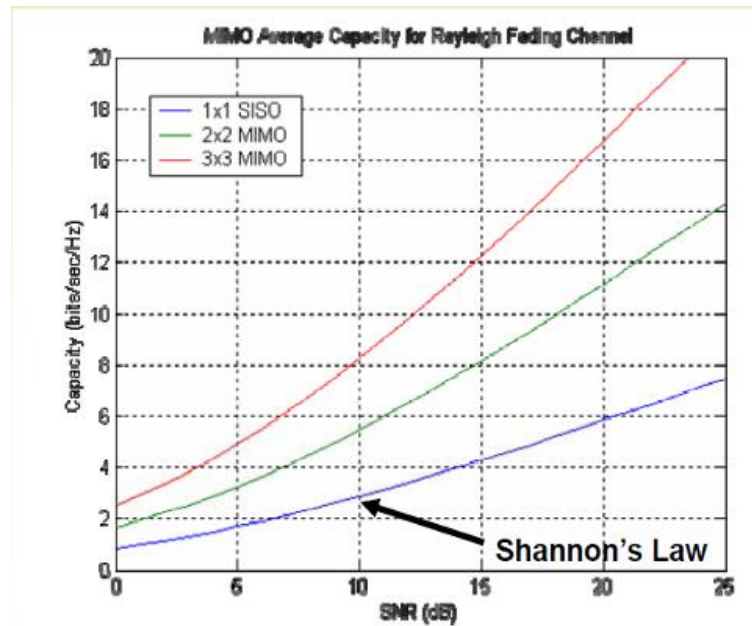


Рисунок 2.9 – Переваги просторового мультиплексування MIMO

- Поєднання ліній, що дозволяє підсилювати сигнали в пристрої. Два пристрої можуть разом передавати на одному суб-каналі, в якому подвоюється швидкість передачі даних.

Спільне використання ефектів просторового мультиплексування, просторового рознесення, і формування променя діаграми спрямованості дозволяє [20]:

- підвищити стійкість системи (зменшити ймовірність помилки);
- підвищити швидкість передачі інформації в системі;
- збільшити зону покриття;
- зменшити необхідну потужність передавача.

Ці властивості системи MIMO, на жаль, не можуть бути реалізовані одночасно. Наприклад, збільшення швидкості передачі інформації призводить до збільшення ймовірності помилки або до збільшення випромінюваної потужності передавача.

Для обчислення максимальної пропускної здатності в разі використання MIMO застосовується наступна формула:

$$C = M B \log_2 (1 + S/N), \quad (2.2)$$



де  $C$  – пропускна здатність каналу;

$M$  – кількість незалежних потоків даних;

$B$  – ширина каналу;

$S/N$  – співвідношення сигнал / шум.

Приклад системи: Кількість просторових потоків ( $H$ )  $< x_v$  ( $M, N$ )

$N$  - кількість антен на передавальній стороні,  $M$  - кількість антен на приймальній стороні.

Матриця комплексних чисел:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

У матриці  $H$  кожен  $h_{ij}$  є комплексним числом:  $a + jb$  (амплітуди і фази).

Але в простому випадку кожен з переданих сигналів виявляється зміненим самим середовищем передачі (затримкою в часі, загасанням і іншими спотвореннями). У міському середовищі сигнали будуть відбиватися від дерев, будівель тощо. Об'єктів і продовжувати свої шляхи не тільки до точки прийому, але і в інших напрямках. На приймальній стороні антени приймають сигнал з радіоефіру з шумами.

Приклад для системи  $3 \times 3$ :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} + \text{Шум} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \\ \hat{b}_3 \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Також антени встановлюються з просторовим рознесенням, за рахунок чого забезпечується рознесений прийом. На кожен з приймачів сигнали надходять від усіх антен системи. Кожен суматор бере із загального потоку енергію сигналу тільки того тракту, за який він відповідає. Він виділяє або за передбаченою ознакою, яким був забезпечений кожен з сигналів, або за допомогою аналізу затримки, загасання, зсуву фази, тобто набору спотворень або середовища поширення. Залежно від принципу роботи системи переданий сигнал може повторюватися через певний час, або передаватися з невеликою затримкою через інші антени.

## **2.3 Дослідження режимів роботи MIMO-антени**

### **2.3.1 Аналіз режиму SU-MIMO**

За допомогою Single MIMO (SU-MIMO) [28], точка доступу може використовувати кілька просторових потоків для надсилання великої кількості даних сумісним клієнтам. Пристрої, такі як ноутбуки, іноді можуть підтримувати два або три потоки, що дозволяє здійснювати високошвидкісні з'єднання. SU-MIMO - це технологія, яка традиційно використовується в мережах 802.11n та 802.11ac Wave 1.

У стандарті 802.11n, точка доступу повинна використовувати тимчасовий поділ для мультиплексування декількох станцій і обслуговувати їх по черзі один за одним, таким чином, скорочуючи їх ефективну пропускну здатність. Стандарт 802.11n допускав використання максимально чотирьох просторових потоків, призначених одному пристрою в один момент часу (режим SU-MIMO).

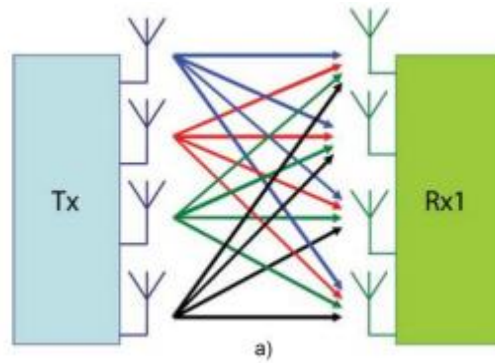


Рисунок 2.10 –Режим SU-MIMO

З рисунку 2.10 видно, що режим SU-MIMO передбачає одногокористувача і 4 просторових потоки.

Тут точку доступу 802.11n можна розглядати як аналогконцентратора Ethernet (hub).

В технології SU-MIMO просторова надмірність (додаткові антени) використовуються в основному в цілях підвищеннядостовірності передачі і збільшення пропускної здатності внапрямку від точки доступу до станції.

### 2.3.2 Аналіз режиму MU-MIMO

Розробляючи стандарт 802.11ac, група TGac побудувала на можливості формування променя зі стандарту 802.11n новий механізм, який дозволяє точці доступу спілкуватися з декількома клієнтськими пристроями в різних напрямках одночасно, використовуючи один і той же канал, кілька антен і просторове мультиплексування. Ця технологія була названа MU-MIMO (розрахована на багато користувачів MIMO). Вона додана в 802.11ac для того, щоб забезпечити вимогу сумарної пропускної здатності 1 Гбіт/с при роботі з декількома пристроями.

У стандарті 802.11ac в режимі MU-MIMO [28] точка доступу (або інша станція) передає незалежні потоки даних декільком станціям в один і той же час в одному і тому ж частотному діапазоні (рис. 2.11).

Передбачається використання до восьми просторових потоків, які можуть бути розділені максимально між чотирма станціями, кожна з цих станцій може виділяти різну кількість просторових потоків (але не більше чотирьох на один пристрій). При цьому підтримка більше одного просторового потоку клієнтською станцією за стандартом не обов'язкова. Збільшення кількості просторових потоків дозволило подвоїти максимальну теоретичну пропускну здатність всієї мережі 802.11ac в порівнянні з 802.11n.[29]

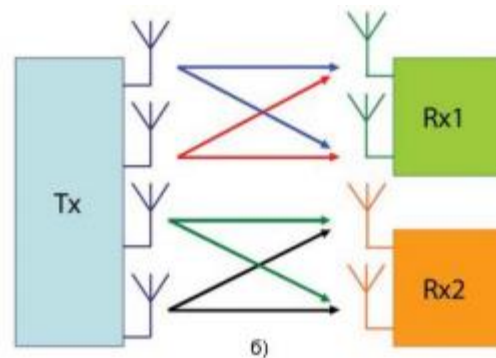


Рисунок 2.11 –Режим MU-MIMO

З рисунку 2.11 видно, що режим MU-MIMO передбачає два користувача і два просторових потоки до кожного.

Точку доступу 802.11ac можна розглядати в якості бездротового комутатора (на низхідному каналі).

При проходженні через бездротовий канал, потоки об'єднуються, і задача приймача розділити їх і розшифрувати. Шляхом попередньої обробки потоків даних в передавачі (аналогічно, як і при формуванні променя), перешкоди від накладення різних потоків, призначених для різних станцій, усуваються в приймачі кожної станції. Таким чином, кожна станція отримує свої необхідні дані, вільні від перешкод паралельних передач. Однак використання модуляцій високого порядку, наприклад 256 QAM, небажане, так як вони більш чутливі до спотворень.

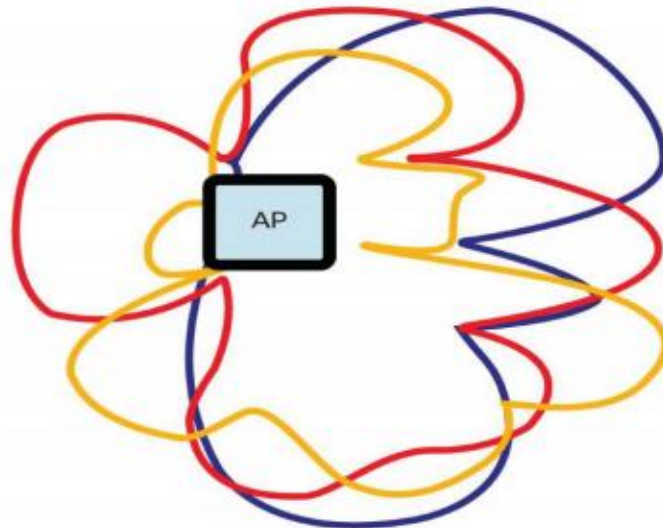


Рисунок 2.12 - MU-MIMO використовує поєднання формування променя і «нульового управління» для кількох користувачів одночасно

- Користувач 1
- Користувач 2
- Користувач 3

На рисунку 2.12 показаний приклад роботи з трьома станціями в режимі формування променя. Щоб передати дані користувачеві 1, точка доступу формує до нього потужний промінь, як це показує верхня пелюстка блакитної кривої. В той же час точка доступу зменшує до мінімального значення енергію променя до користувача 1 в напрямку користувачів 2 і 3. Це називають «нульовим управлінням» (управління становищем нуля діаграми спрямованості антени) і показано вирізами в кривій синього кольору. В той же час, аналогічно, точка доступу посилає дані користувачам 2 і 3, формуючи промінь і утворюючи «вирізи», як показано відповідно на червоній і жовтій кривих. Таким чином, кожен користувач 1, 2 і 3 прийме сильний сигнал переданих саме йому даних і лише в незначній мірі пошкоджений накладенням даних для інших користувачів.

Складність реалізації MU-MIMO полягає головним чином в точці доступу, де і відбувається попередня обробка. Точка доступу має дуже точно знати характеристики бездротового каналу між собою і усіма станціями. Так

як характеристики каналу змінюються з плином часу, вона повинна вести постійні вимірювання, які додають накладні витрати. Приймаючі станції повинні мати можливість повідомляти інформацію про канал точки доступу. Необхідна інформація про канал дуже схожа на ту, що потрібно для формування променя в режимі явного зворотного зв'язку.

В технології SU-MIMO просторова надмірність (додаткові антени) використовуються в основному в цілях підвищення достовірності передачі і збільшення пропускної здатності в напрямку від точки доступу до станції. У MU-MIMO до них додалася і вийшла на перший план ще одна – створення незалежних передач різним станціям.

При однаковій пропускній здатності систем SU-MIMO і MUMIMO, остання дозволяє знизити вимоги до кількості антен клієнтів, що в свою чергу веде до зниження вартості пристрою і його розмірів.

Недолік MU-MIMO в тому, що кількість часу, в якому середовище зайняте, визначається найповільнішим каналом серед усіх пар «точка доступу-станція»(або каналом, який вимагає найбільше часу для завершення його передачі). Нові дані не можуть бути передані кожній зі станцій доти, поки всі передачі станціям в багатокористувацькій групі не будуть закінчені. Якщо існує велика різниця в кількості переданих даних або пропускній здатності до різних станцій, це може привести до неефективного використання бездротового середовища.

MU-MIMO є складною технологією і вимагає часу для правильної реалізації, тому вона не доступна в пристроях першої хвилі стандартизації. По суті, розширення можливостей системи досягається за рахунок значно більш дорогої обробки сигналу і її підвищеної складності. З цієї причини, технологія MU-MIMO включена в стандарт 802.11ac як додаткова.

На даний момент відомо про два варіанти реалізації MU-MIMO в 802.11ac:[25]

1) Space Division Multiple Access (SDMA), що дозволяє передавати дані різним клієнтам з різним просторовим потоком (для цього потрібна технологія «Beamforming»);

2) Downlink MIMO дозволяє розбити підносійні OFDM на групи, а потім динамічно виділяти кожного клієнта потрібне число тих, що піднесуть.

Таким чином, навіть якщо точкою доступу користуватимуться клієнти 2x2: 2 MIMO - можна буде використовувати весь потенціал каналу.

Навіть якщо обмежити максимальну швидкість передачі по мережі одним Гбайт, стандарт 802.11ac дає істотні вигоди як для корпоративних мереж (ефективна утилізація цих найвищих швидкостей в мережах з великим числом клієнтів) такі для домашніх (високі швидкості) [25].

## **Висновки до розділу 2**

В даному розділі виконаний аналіз особливостей побудови технології MIMO. Наведені різні схеми реалізації антен, а також досліджені 2 режими роботи:

- SU-MIMO, який передбачає одного користувача і 4 просторових потоки. В даному режимі SU-MIMO просторова надмірність (додаткові антени) використовуються в основному в цілях підвищення достовірності передачі і збільшення пропускної здатності в напрямку від точки доступу до станції.

- MU-MIMO, в якому передбачається використання до восьми просторових потоків. Тут збільшення кількості просторових потоків дозволило подвоїти максимальну теоретичну пропускну здатність всієї мережі 802.11ac в порівнянні з 802.11n.

## **3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО В СТАНДАРТІ 802.11ac**

### **3.1 Дослідження методу формування направленої променя «beamforming»**

В технології МІМО існує можливість покращення характеристик за рахунок додаткових розширень, однією із яких є технологія формування направленої променя (beamforming). Це метод, що дозволяє використовувати більш високі схеми модуляції і кодування в межах заданого радіусу дії і набула широкого поширення у стандарті 802.11ac [30].

Технологія Beamforming(формування променя) сама по собі не має права продовжувати максимальний радіус дії і не збільшує максимальну швидкість. Даний метод дозволяє використовувати більш високі схеми модуляції і кодування в межах заданого радіусу дії.

У стандарті 802.11n формування променя (transmit beam forming) є обов'язковою функцією. Вона не знайшла широкого застосування через несумісність застосовуваних постачальниками методів. Значною мірою це обумовлено безліччю варіантів протоколу, доступних в оригінальному стандарті 802.11n, які допускали занадто багато варіантів зондування, методів і форматів зворотного зв'язку.

Стандарт 802.11ac [32] визначає єдиний метод формування променя, який сприятиме функціональній сумісності. Цей метод – зондування нульовим пакетом даних (null data packet, NDP) з прямим явним стислим зворотним зв'язком. Обраний протокол схожий на протокол 802.11n і є його наступником. Він, як відомо, забезпечує найбільш точну оцінку каналу, яка враховує всі недоліки передавача і приймача.

У цьому методі точка доступу передає спеціальний зондуючий сигнал всім станціям, які оцінюють канал між ними і точкою доступу і повідомляють їй інформацію про стан каналу (матриці стану). Зворотній зв'язок



стандартизується, тому точки доступу та станції різних постачальників будуть взаємодіяти правильно.

Пристрій, зазвичай точка доступу, передає кадр Very High Throughput Null Data Packet Announcement (VHT NDP Announcement). Його єдина мета: містити адресу точки доступу та цільової станції. За кадром VHTNDP Announcement відразу слідує кадр VHTNDP, призначений для тієї ж станції. Кожна станція вимірює радіочастотний канал між точкою доступу і собою, використовуючи преамбулу кадру VHTNDP, і розраховує інформацію про канал. Перший цільовий одержувач негайно відповідає інформацією про канал в кадрі VHT Compressed Beamforming, інші одержувачі відповідають, коли їх опитає точка доступу. Кадри VHTNDP Announcement, VHT NDP, VHT Compressed Beamforming подібні до функцій с 802.11n, однак через деякі тонкі відмінності, зондування 802.11ac не володіє зворотною сумісністю з пристроями 802.11n.

Незважаючи на перевагу в оцінці каналу, цей механізм вносить досить великі накладні витрати на кадри VHT NDP Announcement, VHTNDP і кадр VHT Compressed Beamforming, що несе дані явною стислій зворотного зв'язку. Для точки доступу з чотирма антенами, розмір даних зворотного зв'язку може змінюватися від 180 до 1800 байт, в залежності від кількості антен клієнтів і рівня стиснення. Зондування тільки одного одноантенного клієнта в діапазоні 80 МГц займає близько 250мкс. З огляду на те, що пристрої можуть передавати, наприклад, на швидкості 433Мбіт/с, це дороге задоволення, так як за цей же час можна передати додатково 13Кбайт. Тому, формування променя – це додаткова функція в стандарті 802.11ac, яка є опціональною. Вона була реалізована підтримкою технології формування спрямованого сигналу Beamforming (іноді її називають технологією адаптивного формування діаграми спрямованості Transmit Beamforming або Tx Beamforming).

Дана технологія вирішує проблему падіння потужності сигналу, викликану його відображенням від різних предметів і поверхонь і таким чином

є одним з методів підвищення ефективності технології MIMO в мережах стандарту 802.11ac.

Технологія формування направлено променя могла застосовуватися ще в рамках стандарту 802.11n (рисунок 3.1(a)), однак на той момент вона не була стандартизована, і при використанні пристроїв різних виробників вона, як правило, працювала некоректно.

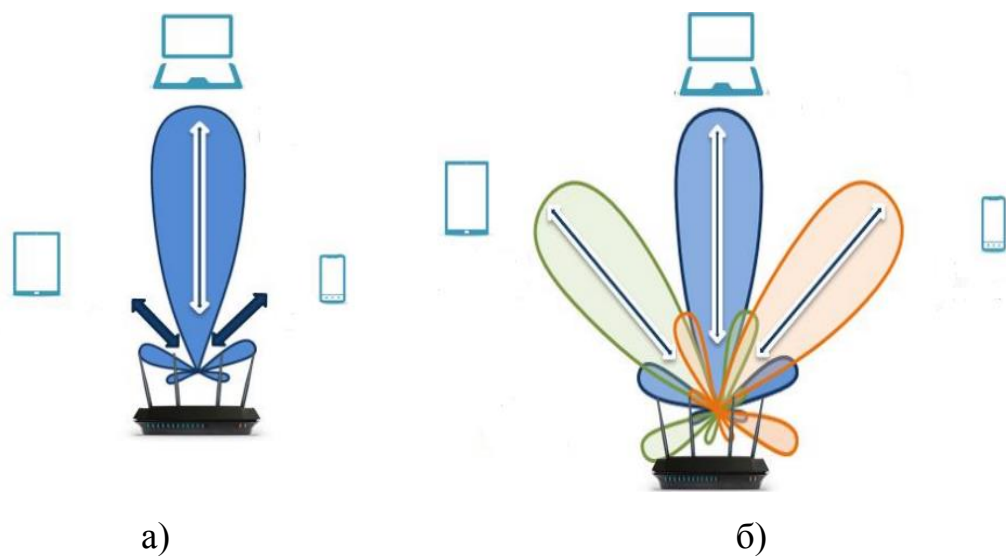


Рисунок 3.1 – Технологія формування променя в рамках стандарту 802.11n (а) і 802.11ac (б)

Технологія Beamforming в стандарті 802.11ac (рис. 3.1(б)) працює наступним чином:[30]

Радіосигнали, прийняті від клієнтів, допомагають точці доступу визначити їх місце розташування, і ця інформація використовується в подальшому для розрахунку і формування вузьконаправленого сигналу (в звичайному режимі роботи сигнал від приймача розходить у всі боки, а при Beamforming направляється в строго визначеному напрямку, що досягається за допомогою декількох антен).

Застосування технології Beamforming дозволяє більш ефективно використовувати смугу пропускання, що позитивно відбивається при роботі з

потоковою музикою і відео, іграми або додатками, які дуже чутливі до пропускної спроможності і затримок в мережі.

Також була реалізована сумісність пристроїв з підтримкою даної технології. Тепер, якщо один пристрій підтримує Beamforming, а інше немає, вони все одно зможуть працювати разом.

Формування діаграми спрямованості антени за допомогою технології "Beamforming" збільшує швидкість передачі в безпроводних мережах на середніх відстанях між точкою доступу і користувачем завдяки збільшенню відношення сигналу/шум, що в свою чергу дає можливість використовувати більш ефективні методи модуляції. На малих відстанях потужність сигналу досить висока, що забезпечує велике відношення сигнал/шум і, відповідно, максимальну швидкість передачі даних. На великих відстанях формування діаграми спрямованості не дасть істотного виграшу в порівнянні з всенаправленою антеною, і швидкість передачі даних буде ідентична у випадку, коли "Beamforming" не використовується.

Ефективність використання технології "Beamforming" ілюструє рис.3.2[30]:

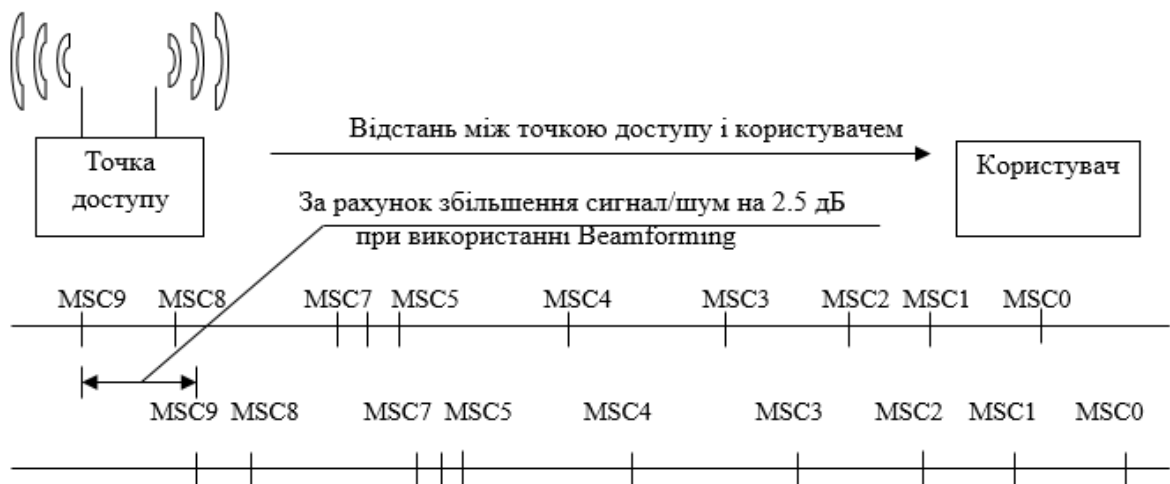


Рисунок 3.2 – Ілюстрація ефективності використання технології Beamforming

На рис. 3.2 відстань від точки доступу до користувача збільшується вправо. Верхня діаграма показує значення MCS при використанні ненаправленої антени, а нижня - при використанні технології "Beamforming".

Формування діаграми спрямованості дозволяє збільшити відношення сигнал/шум на 2,5 дБ, що дає можливість використовувати більш високі значення MCS (більш високому значенню MCS відповідає більш висока швидкість передачі даних) при порівняних з першою діаграмою відстанях.

Процес калібрування виглядає наступним чином:

Точка доступу формує і відправляє спеціалізований кадр (Null Data Packet Announcement–NDPA) для оповіщення клієнта. У ньому міститься інформація про кількість передавачів, кількості потоків та інші супутні дані.

Далі клієнту відправляється Null Data Packet (NDP). Це робиться для того, щоб клієнт, аналізуючи інформацію в заголовках на фізичному рівні, зміг сформулювати звіт про здобутий сигнал і відправити його назад точки доступу.

Клієнт аналізує отриманий (на всіх антенах) сигнал по кожній підносійній і формує матрицю спрямованості з певною амплітудою і фазою. Дана матриця займає досить великий обсяг (особливо з урахуванням ширини каналів в стандарті 802.11ac), тому відповідь відправляється в стислому вигляді.

Одержувач (точка доступу) на підставі отриманої від клієнта інформації формує діаграму спрямованості.

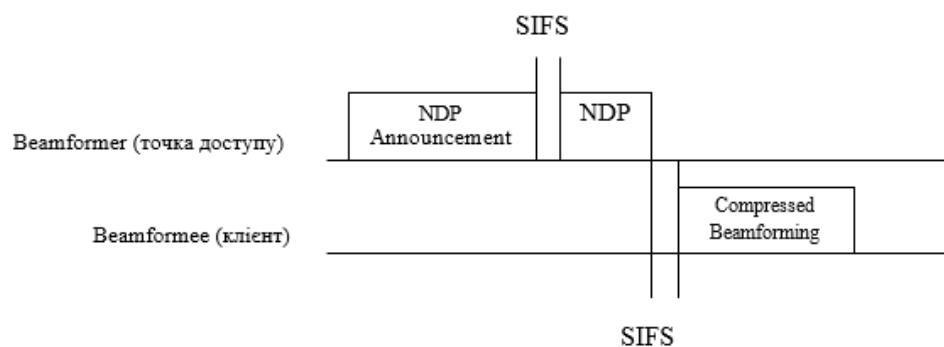


Рисунок 3.3– Процес калібрування

Формування діаграми спрямованості відбувається наступним чином: кожна антена починає передавати якусь суперпозицію всіх просторових потоків з певними коефіцієнтами (фаза, амплітуда). Причому коефіцієнти для кожного потоку на кожній антені будуть свої.

Варто звернути увагу, що реальний вигравш від технології формування діаграми спрямованості ми отримуємо тільки в тому випадку, якщо кількість антен на передачу у нас перевершує кількість переданих просторових потоків.

Для багатокористувацької передачі (multi-user beamforming), процес схожий, проте калібрування відбувається для кожного клієнта окремо.

У стандарті 802.11ac немає аналога преамбули «Зеленого поля» 802.11n. Стандарт 802.11ac визначає преамбулу тільки одного формату (рис. 3.4), яка буде доступна для розшифрування, в тому числі, пристроїв попередніх стандартів 802.11a / n. Зроблено це для того, щоб такі пристрої могли витягти з преамбули інформацію про тривалість передачі, і не намагалися передавати під час передачі пристрою 802.11ac.



Рисунок 3.4– Формат кадру 802.11ac

Вся преамбула складається з двох частин [31]:

- Перша частина – це традиційна преамбула, її призначення - забезпечити зворотну сумісність, дозволити пристроям a / n синхронізуватися з сигналом.

Традиційна частина преамбули складається з 3-х полів: L-STF (коротка підстроювальна послідовність), L-LTF (довга підстроювальна послідовність) і

L-SIG (сигнал). Поля L-STF і L-LTF містять інформацію, яка дозволяє пристрою виявити сигнал, виконати оцінку частотного зсуву, час синхронізації, і т.д. Поле L-SIG містить інформацію про довжину іншої частини пакета. Це означає, що всі пристрої, в тому числі застарілі зможуть знати час передачі пакета.

- Друга частина преамбули, наступна за традиційною частиною – це нова преамбула стандарту 802.11ac. Вона називається VHT-преамбула, в неї входять нижче описані поля.

Традиційні поля і поле VHT-SIG-A дублюються в кожних 20 МГц смуги пропускання, із застосуванням відповідного обертання фази. Також обертання фази застосовується до кожного під-діапазону 20 МГц в VHTSTF, VHT-LTF, і VHT-SIG-B.

Після преамбули передаються символи даних. Тут також реалізовується обертання фази в верхніх під-діапазонах 20 МГц.

#### *VHT-SIG-A*

Поле VHT-SIG-A містить два символи OFDM, які слідує відразу за спадковою частиною преамбули. Символи використовують довгий захисний інтервал і є BCC-кодованими зі швидкістю  $r = 1/2$ .

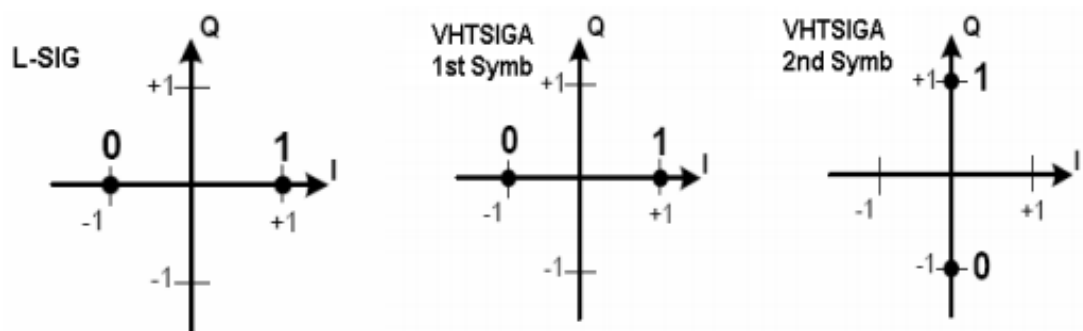


Рисунок 3.5 – Сигнальні сузір'я полів для модуляції полів L-SIG і VHT-SIF-A

Перший символ BPSK-модульований. Отримавши його, пристрій 11n буде думати, що пакет є пакетом 11a і буде його ігнорувати. Другий символ

використовує QPSK, зміщену на 90 градусів (рис. 3.5), що дозволяє пристрою 802.11ac автоматично виявити пакет 802.11ac.

Символи VHT-SIG-A містять кожен 24 біта. 8 біт використовуються для CRC і 6 біт є хвостовими для кодера. Інформація, представлена в останніх 34 бітах VHT-SIG-A необхідна VHT-пристрою для читання пакета VHT. В бітах міститься інформація, що дозволяє пристроям 802.11ac декодувати решту пакету: смугу пропускання, STBC (просторово-тимчасове блокове кодування), кількість потоків, MCS, формування променя і т.д. Призначення конкретних полів буде залежати від режиму одного або декількох користувачів (SU-або MU-MIMO).

У разі декількох користувачів (можливо до 4), деякі з VHT-SIG-A полів модифікуються, щоб сигналізувати конкретному користувачу певну інформацію.

#### *VHT-STF*

VHT-STF використовується для поліпшення автоматичного регулювання посилення в MIMO передачі. За даними цього поля можна визначити на аналізаторі спектра підносійні, які мають нульове /ненульове значення. VHT-STF завжди використовує довгий захисний інтервал.

#### *VHT-LTF*

Наступні 8 полів пакету - це поля VHT-LTF. Вони використовуються для оцінки MIMO каналу і подальшої корекції сигналу. Пілот-сигнали вставляються в символи VHT-LTF для відстеження фази, компенсації частотного зсуву і фазового шуму, які можуть погіршити сигнал OFDM і привести до помилки оцінки каналу в приймачі. Кількість символів LTF, відправлених в пакеті залежить від кількості просторово-часових потоків: один LTF для одного просторово-часового потоку, два LTF для двох просторово-тимчасових потоків, чотири LTF для трьох або чотирьох потоків, шість LTF для п'яти або шести потоків, вісім LTF для семи або восьми потоків. Так як кількість відправлених полів LTF більше або дорівнює кількості

потоків для кожного користувача, вони називаються «розв'язні LTF». Символи VHT-LTF також завжди використовують довгий захисний інтервал.

### *VH-SIG-B*

Поле VHT-SIG-B є останнім полем в преамбулі перед полем даних. Це один символ, BPSK модульований, надає інформацію про довжину корисних даних в пакеті і в разі MU-MIMO забезпечує інформацію про MCS (в разі одного користувача інформація про MCS передається в VHT-SIG-A). Формат поля VHT-SIG-B залежить від того, чи є пакет SU-MIMO або MU-MIMO.

До речі, в 802.11n (HT) є різні формати кадрів (і режими роботи точки доступу): *mixed* - для сумісності з 802.11a/g/n пристроями або *greenfield* для роботи тільки 11n пристроїв. У 802.11ac використовується один універсальний формат, що включає заголовки 802.11a/ac.

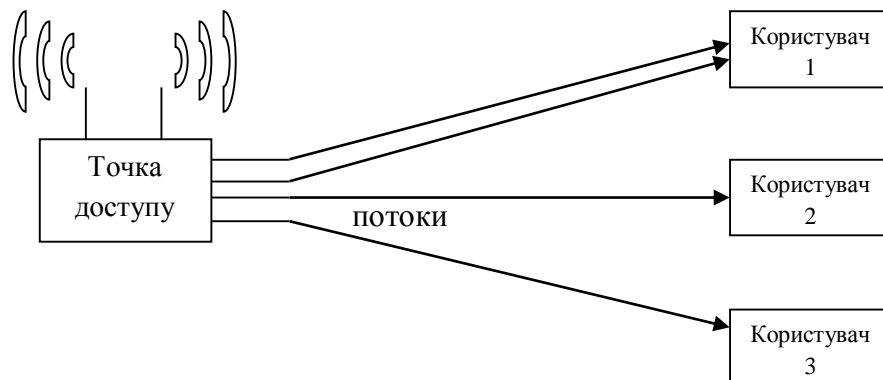


Рисунок 3.6 – Передача інформації одночасно всім користувачам за допомогою beamforming

Для передачі інформації одночасно всім користувачам нам необхідні властивості beamforming [12]. Після калібрування, кожен потік (або декілька потоків) надсилається кожному користувачеві зі своєю діаграмою спрямованості. Для запобігання інтерференції сигналу, що передається при багатокористувацькій передачі, діаграма спрямованості для кожного клієнта будується таким чином, що сигнал для сусідніх клієнтів приходить в протифазі. Це важливо, тому що клієнт повинен «чути» тільки той



просторовий потік, який адресований саме йому. Інакше просторові потоки будуть один на одного впливати, і клієнт нічого не розбере. Логічно припустити, що технологія не працює, якщо клієнти знаходяться на досить близькій відстані один до одного.

Точне калібрування вкрай важливе для такої передачі, тому воно відбувається в кілька разів частіше, ніж для single-user передачі.

### **3.2 Дослідження методу просторово-часової обробки**

Сьогодні зростає попит на високошвидкісні з'єднання з високою експлуатаційною якістю. Цьому сприяють впровадження таких нових послуг зв'язку, як Voice over Internet Protocol (VoIP), відеоконференції, Video on Demand (VoD) тощо. На момент їх впровадження не було ніяких безпроводних технологій, які могли б забезпечити високу якість стандартів зв'язку. Існуючі безпроводні технології не можуть забезпечити клієнтів високими стандартами з'єднання на межі службової зони, оскільки швидкість передачі даних досягає швидкого зменшення зі збільшенням відстані між клієнтом і базовою станцією. Це призводить до погіршення якості зв'язку, що призводить до неможливості отримання високоякісного зв'язку в режимі реального часу у всій мережі.

Підвищення ефективності досягається за рахунок використання методів просторово-часової обробки (STC – Space Time Coding), що забезпечують передачу і приймання паралельних потоків інформації. Теоретично пропускна здатність системи MIMO з STC може бути збільшена пропорційно кількості антен на передавальному боці (за умови, що кількість приймальних антен не менша ніж кількість передавальних антен) у порівнянні з традиційними системами радіозв'язку з однією передавальною антеною (SISO – Single-Input Single-Output).

Для просторового мультиплексування паралельних потоків в основному використовуються метод просторового мультиплексування через сингулярне

розкладання (ПМСР) каналної матриці та алгоритм V-BLAST (Vertical Bell Laboratories Layered Space Time Architecture) [6–15]. Метод ПМСР потребує передачі великого обсягу інформації по каналу зворотного зв'язку, що важко реалізувати для високомобільних абонентів. Ефективність алгоритму V-BLAST, який не використовує сингулярне розкладання, знижується через міжканальну інтерференцію. Тому, підвищити спектральну і енергетичну ефективність таких систем можливо за рахунок адаптації числа переданих потоків в каналі зв'язку при просторовому мультиплексуванні.

У загальному випадку структура системи MIMO при методі просторово-часової обробки складається з  $M_t$  передавачів (передавальні антени) і  $M_r$  приймачів (приймальні антени) (рис. 3.7). Сигнали, що передаються після впливу релєєвських завмирань і білого гаусівського шуму (БГШ) у радіоканалі, надходять в  $M_r$  приймальних трактів. Структурна схема традиційної системи MIMO з V-BLAST представлена на рис. 3.7 [16].

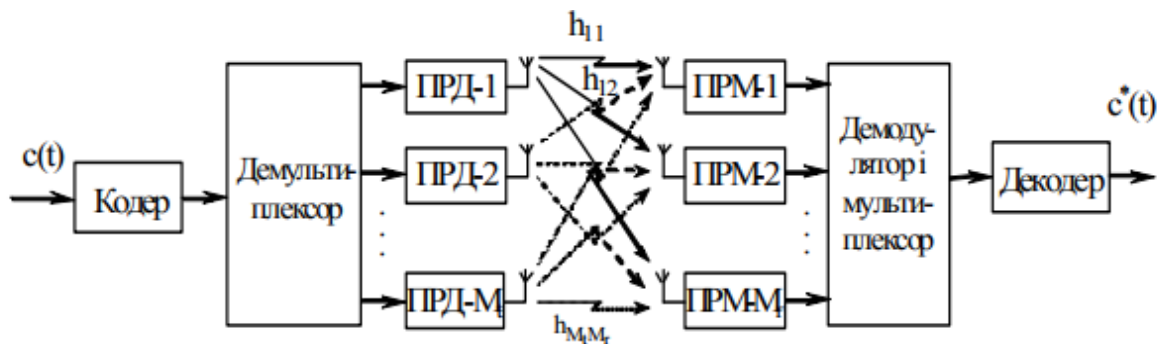


Рисунок 3.7 – Структурна схема системи MIMO з V-BLAST

Сигнали на вході  $M_r$  приймальних трактів системи MIMO описуються рівнянням [5; 10]:

$$Z = HA + B, \quad (3.1)$$

де  $Z$  – вектор прийнятих комплексних символів;

$H$  – матриця, кожний елемент якої  $h_{ij}$  – комплексний коефіцієнт передачі тракту поширення сигналу, який випромінюється  $j$ -ю антеною і приймається  $i$ -ю антеною;

$A$  – вектор переданих символів;

$B$  – вектор, кожний компонент якого  $b_i$  – відлік суміші гаусівського шуму та завади на  $i$ -му вході демодулятора.

Для прикладу розглянемо MIMO-канал з однаковою кількістю передавальних та приймальних антен, тобто при  $M_t = M_r$ .

Сингулярне розкладання матриці  $H$  має вигляд:

$$H = UDV^H, \quad (3.2)$$

де  $U$  і  $V$  – унітарні матриці з комплексними елементами; верхній індекс  $H$  означає транспонування матриці та комплексне сполучення її елементів;

$D$  – діагональна матриця сингулярних чисел  $\lambda$  (коефіцієнтів підсилення по напррузі для власних векторів),

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_{max} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{min} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Припустимо, що  $A = \{a_i\}$  – набір можливих переданих векторів (тобто багатовимірне сузір'я сигналу). Сигнал, прийнятий без шуму, належить набору  $Y = \{y_i\}$ , де  $y_i = H a_i$ . Імовірність помилки залежить від мінімальної евклідової відстані між векторами в наборі  $Y$ . Приймач максимальної правдоподібності вибирає елемент набору  $Y$ , що найбільш близький до прийнятого вектора  $Z$ . Тоді, щоб відбулася символна помилка, необхідне виконання умови, щоб норма шумового вектора  $B$  була б більше половини мінімальної евклідової відстані  $d_{min}$ :

$$\|B\| \geq d_{min}/2. \quad (3.4)$$

Мінімальна відстань може бути знайдена як:

$$d_{min} = \min_{i \neq j} \|y_i - y_j\| = \min_{i \neq j} \|H(a_i - a_j)\|. \quad (3.5)$$

З лінійної алгебри відомо [6], що для будь якого вектора справедлива нерівність:

$$\|H_s\| \geq \lambda_{min} \|s\|. \quad (3.6)$$

Тоді:

$$\|H(a_i - a_j)\| \geq \lambda_{min} \|a_i - a_j\|. \quad (3.7)$$

Отже,

$$d_{min} \geq \lambda_{min} \min_{i \neq j} \|a_i - a_j\|. \quad (3.8)$$

Таким чином, якщо мінімальна евклідова відстань на передачі дорівнює  $d_0$ , то після проходження радіоканалу  $d_{min}$ :

$$d_{min} \geq \lambda_{min} d_0. \quad (3.9)$$

Це означає, що велике мінімальне сингулярне число гарантує велику мінімальну евклідову відстань після проходження радіоканалу та, як наслідок, малу ймовірність бітової помилки на прийомі.

Використаємо матричне рівняння MIMO системи (1). Відношення сигнал/шум для k-го каналу може бути записано як:

$$Q_k^2 = \frac{E_c |g_k^H h_k|^2}{M_r G_0 |g_k|^2 + E_c \sum_{j \neq k} |g_k^H h_j|^2}, \quad (3.10)$$

де  $E_c$  – енергія сигналу,

$G_0$  – спектральна щільність шуму,

$g$  – вектор підставки в кореляторі k-го каналу.

Для спрощеного прийому методом форсування нуля [6; 16] відношення сигнал/шум визначається наступною формулою:

$$Q_k^2 = \frac{E_c}{M_r G_0 (H^H H)_{kk}^{-1}}. \quad (3.11)$$

Апроксимація для виразу (10) може бути отримана з використанням теореми Релея-Рітца [15]. Даний результат використається, щоб обмежити вираз (10):

$$Q_k^2 \geq \lambda_{\min}^2(H) \frac{E_c}{M_r G_0}. \quad (3.12)$$

Оскільки відношення сигнал/шум обмежено мінімальним сингулярним числом, то граничне мінімальне сингулярне число дорівнює:

$$(3.13)$$

Запропонована методика вибору числа каналів, схема алгоритму реалізації якої подана на рис. 2, складається з наступних етапів:

*Введення вихідних даних.* Вводяться параметри системи МІМО і каналу зв'язку  $\Phi = \{\varphi_i\}$ ,  $i = \overline{1,8}$ , де  $\varphi_1 \dots \varphi_8$  – кількість передавальних та приймальних антен, вид модуляції, розмірність ансамблю сигналів, тривалість кадру на виході демодулятора, тривалість кадру на виході декодера, швидкість коригувального коду, величина кодової відстані.

*Оцінка стану каналу зв'язку.* На даному етапі за допомогою одного з відомих методів [11–14] оцінюється стан багатопроменевого каналу зв'язку та визначається його канална матриця.

*Адаптивний вибір кількості каналів системи МІМО.* Проводиться розрахунок сингулярних чисел. Якщо мінімальне сингулярне число більше граничного (блок 4), то такий режим буде задовольняти вимогам до ймовірності бітової помилки – вихід із циклу. В іншому випадку зменшуємо число каналів на один (блок 5). Для кожної комбінації каналів, що залишилися, будемо мати по одному мінімальному сингулярному числу. Залишимо ті комбінації, у яких мінімальне сингулярне число більше порога.

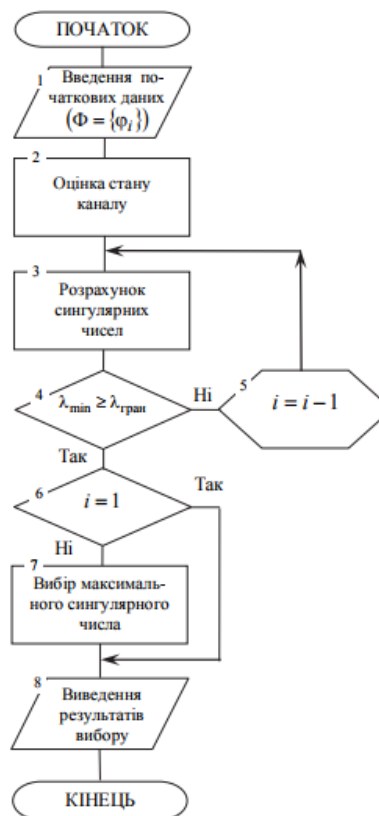


Рисунок 3.8– Схема алгоритму реалізації запропонованої методики

Якщо такі комбінації є, виберемо ту з них, у якої мінімальне сингулярне число є максимальним (блок 7) вихід із циклу. Якщо залишився один канал передачі – вихід із циклу (блок 6).

Запропонований алгоритм дозволяє не тільки визначити максимально припустиме число паралельних каналів для передачі даних, але й вибрати найбільш завадостійкі з них.

Для системи MIMO 4×4 з чотирьохпозиційною квадратурною модуляцією для релеєвського каналу зв'язку проведемо статистичне моделювання в середовищі MATLAB. На рис. 3.9 подано залежності ймовірності помилкового приймання відношення сигнал/шум, де крива 1 – завадостійкість алгоритму максимізації пропускної здатності, 2 – завадостійкість запропонованого алгоритму адаптивного вибору кількості каналів в системі MIMO, 3 – при використанні чотирьох одночасних просторово мультимплексуєчих каналів (V-BLAST 4×4), 4 – при використанні одного каналу передачі.

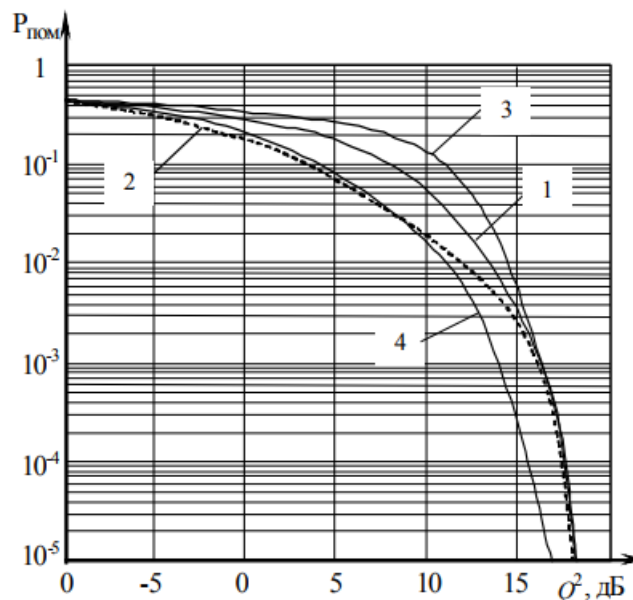


Рисунок 3.9 – Графіки залежностей ймовірності помилкового приймання від відношення сигнал/шум

Результати імітаційного моделювання показують, що запропонована методика дозволяє реалізувати адаптивне перемикання числа каналів при збереженні ймовірності бітової помилки нижче заданої межі й працювати при низьких значеннях відношення сигнал/шум в режимах з обмеженою кількістю паралельних каналів передачі.

Розглянемо практичну значимість отриманих наукових результатів. Структурна схема програмованої радіостанції [17], до складу якої входить блок просторо-часової адаптації, що вирішує завдання вибору параметрів системи MIMO в залежності від сигнально-завадової обстановки. Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок про те, що зазначені дослідження мають як теоретичне так і практичне значення.

### **3.3 Технологія MIMO-OFDMA**

Використання технологій ортогонального частотного (OFDM) і просторового (MIMO) рознесення в сучасних безпроводних системах зв'язку широкосмугового доступу дозволяє досягти збільшення інформаційної ефективності в умовах багатопроменевого поширення сигналу і, як наслідок, підвищити завадостійкість систем.

Технологія OFDM є поєднанням модуляції і мультиплексування і здатна підвищувати стійкість каналу зв'язку проти частотно-виборчих завмирань, викликаних широкосмуговим поширенням сигналів. Сигнал OFDM представляє собою безліч ортогональних підносійних, які входять до складу одного основного сигналу, при цьому кожна підносійна модулюється своїм двійковим потоком. При проходженні каналу зв'язку окремі підносійні OFDM сигналу можуть бути перекручені, що призведе до втрати інформаційних бітів, що входять до складу переданого пакета, однак застосування технології завадостійкого кодування на передавачі дозволяє їх відновити на приймальній стороні [3-5].



Зазвичай, система з широкосмуговим поширенням може викликати завмирання сигналу в каналі, яке розглядається як шкідливий чинник, що відноситься до безпроводного зв'язку [9]. Проте, дослідження показують, що в системі МІМО, при наявності широкосмуговості може бути в деяких випадках сприятливим явищем для безпроводного зв'язку. У передавачі послідовний потік символів даних після необхідної просторово-часової обробки спрямовується на елементи передавальної АР, а потім передаються на приймач. У приймачі прийняті символи даних витягають за допомогою різних просторовотимчасових технологій виявлення. Для того щоб гарантувати ефективне розділення різних потоків даних, елементи АР повинні бути рознесені на достатній відстані (зазвичай більше половини довжини хвилі носійної) для того, щоб запобігти занадто високій кореляції між прийнятими сигналами на різних антенах [11]. Рисунок 1 ілюструє систему МІМО.

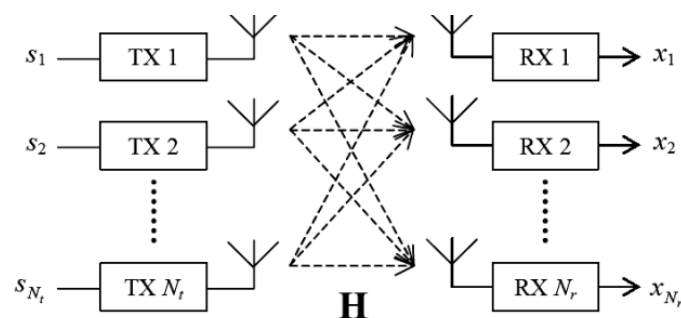


Рисунок 3.10 – Схематичне представлення системи МІМО

Як показано на рис. 3.10 [10], сигнали передаються від антен, а після розповсюджуються по безпроводному каналу, наприклад, в умовах міської забудови, і приймаються в приймальних антенах. Кожна приймальна антена отримує суперпозицію сигналів від передавальної антени.

OFDM є модуляцією з безліччю підносійних. В OFDM канал ділиться на безліч ортогональних підканалів і високошвидкісні сигнали передачі даних перетворюються в паралельні низькошвидкісні підпотоки [12-14, 18]. Щоб бути переданими, ці підпотоки модулюються в кожному підканалі.

OFDM є ефективним засобом в боротьбі проти частотно-селективних завмирань і міжсимвольної інтерференції (ISI) [8]. Використовуючи в якості підканалів ортогональні підносійні можна значно поліпшити спектральну ефективність. Як правило, в OFDM додається захисний інтервал певної довжини (GI), що дозволяє боротися з міжсимвольною інтерференцією, в разіколи тривалість GI більше максимального розкиду затримок багатоканального радіоканалу. Зазвичай, захисний інтервал заповнений циклічним префіксом (CP) [9, 15]. Основна перевага технології OFDM полягає в тому, що Швидке Перетворення Фур'є (БПФ)/Зворотношвидке перетворення Фур'є (ЗШПФ) може бути використано для здійснення модуляції і демодуляції ортогональних підканалів [23]. Для роботи N-точкового ШПФ, потрібно  $N \times \log(N)$  комплексних множень замість  $N^2$ , яке необхідно буде при прямому здійсненні.

У той час як сигнал в каналі поширення проходить від передавальної антени до приймальної антени, характеристики сигналу змінюються через наступні фактори: 1) відстань між двома антенами, 2) шляхом прийнятих сигналів і 3) навколишнє середовище (відображення від різних поверхонь і дна) на всьому шляху [16]. Вплив каналу поширення на проходження сигналу може бути охарактеризоване за допомогою передавальної характеристики.

Для MIMO-OFDM в частотній області прийнятий сигнал і переданий сигнал  $x$  може бути виражений як [1]

$$Y = Hx + n, \quad (3.14)$$

де  $H$  - матриця передачі каналу;

$y$  -  $NR \times 1$  вектор прийнятого сигналу;

$x$  -  $NT \times 1$  вектор переданого сигналу;

$n$  -  $NR \times 1$  вектор шумів приймача.

Рівняння, представлене нижче, описує систему MIMO з  $N_T$  передавальними антенами і  $N_R$  приймальними:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & & h_{2N_T} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \dots & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

де елементи  $N_R \times N_T$  каналної матриці  $H$  в позиціях  $(i, j)$  позначають канал від  $j$ -го передавача до  $i$ -ї приймальної антени [17].

Просторова кореляція завжди проявляється на практиці, оскільки канали між різними антенами часто корельовані. В ідеальних системах радіозв'язку шлях між передавачем і приймачем (LoS) називають шляхом прямої видимості. Наявність просторової кореляції підтверджено експериментально [12, 14]. Просторова кореляція знижує продуктивність системи MIMO. Тоді вигода від наявності незалежних каналів зменшується.

В роботі [12] передбачається, що кореляційні матриці для передавача і приймача можуть бути розділені. В літературі [14] вводиться модель Кронекера для моделювання просторової кореляції, яка широко використовується.

У моделі Кронекера кореляція між передавальними антенами і прийомними антенами передбачається незалежно і роздільно [14]. модель кореляції каналу Кронекера може бути представлена у вигляді

$$H = R_{N_R}^{1/2} H_\omega (R_{N_T}^{1/2})^T, \quad (3.16)$$

де  $R_{N_R}$  і  $R_{N_T}$  – кореляційні матриці приймальних і передавальних антен, тоді як  $H_\omega$  являє собою незалежний однаково розподілений канал Релея з завмираннями (при відсутності прямого шляху поширення).

### Висновки до розділу 3

В даному розділі виконано дослідження методів ефективності технології MIMO в стандарті 802.11ac. В даній технології існує можливість покращення характеристик за рахунок додаткових розширень. До методів, що дозволяють підвищити ефективність роботи антени належать:

- технологія направленої променя (beamforming), в якій формування діаграми спрямованості дозволяє збільшити відношення сигнал/шум на 2,5 дБ, що дає можливість використовувати більш високі значення MCS (більш високому значенню MCS відповідає більш висока швидкість передачі даних) при порівнянні з першою діаграмою відстанях;

- технологія ортогонального частотного (OFDM) і просторового (MIMO) рознесення в сучасних безпроводних системах зв'язку широкопasmового доступу дозволяє досягти збільшення інформаційної ефективності в умовах багатопроменевого поширення сигналу і, як наслідок, підвищити надійність систем;

- підвищення ефективності досягається також за рахунок використання методів просторово-часової обробки (STC – Space Time Coding), що забезпечують передачу і приймання паралельних потоків інформації. Теоретично пропускна здатність системи MIMO з STC може бути збільшена пропорційно кількості антен на передавальному боці.

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗПРОВІДНОГО КАНАЛУ СИГНАЛА ІЗ ТЕХНОЛОГІЄЮ MIMO

### 4.1 Організація мережі доступу

Для оцінки методів підвищення ефективності роботи технології MIMO, розглянутих у даній роботі, спроектуємо структурну схему організації безпроводної мережі у гуртожитку і розрахуємо теоретичну швидкість, потужність та зону дії сигналу.

Безпроводна мережа, яку плануємо реалізувати, буде заснована на новому стандарті IEEE 802.11ac з підтримкою технології MU-MIMO і beamforming.

Дана мережа буде керуватися сервером за допомогою безпроводного комутатора. Так як безпроводний комутатор і точки доступу поширюють сигнал сферично, планується встановлення по дві точки доступу на третьому, шостому і дев'ятому поверхах по всій площі гуртожитку, а безпроводний комутатор – на п'ятому поверсі, в центрі, для охоплення кожної точки доступу.

Схема бездротової мережі представлена на рисунку 4.1

Для побудови мережі безпроводного доступу необхідно встановити 6 точок доступу TP-LINK Archer C9[32] по 3 точки на другому і четвертому поверхах.

Безпроводний комутатор DWS-4026 [33] розмістити в робочому приміщенні на третьому поверсі.

Налаштувати безпроводний комутатор, визначити точки доступу. Забезпечити моніторинг та захист мережі.

Доступ до мережі Internet забезпечити через широкосмуговий/DSL модем.

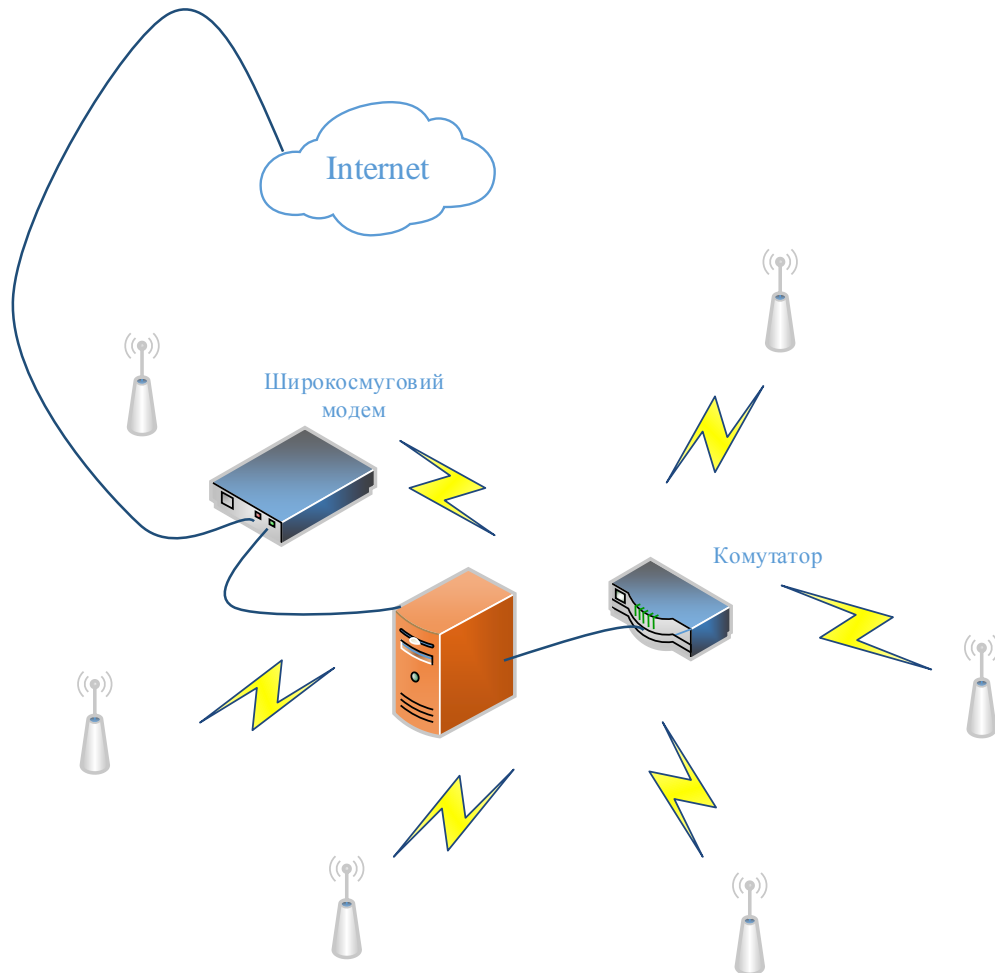


Рисунок 4.1 – Структурна схема безпроводної мережі

## 4.2 Розрахунок параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11ac

### 4.2.1 Розрахунок кількості точок доступу

Для мереж стандарту 802.11ac швидкість передачі 6,9 Гбіт/с, реальна продуктивність однієї точки доступу більше 300 Мбіт/с. Кожному користувачеві безпроводної мережі необхідно виділити канал з пропускною спроможністю не менше 70 Мбіт/с для передачі даних, відправки повідомлень, використання різних додатків.

Пропускную здатність каналу на одне з'єднання можна розрахувати за формулою[26]:

$$B = \frac{B_{т.д}}{n}, \quad (4.1)$$

де  $B_{т.д}$  – швидкість передачі даних однієї точки доступу ( $B$  нашому випадку  $B_{т.д}=1000\text{Мбіт/с}$ );

$n$  – кількість підтримуваних підключень одною точкою доступу.

Знаючи пропускну здатність каналу на одне з'єднання і тип цього з'єднання, можна виразити з формули (4.1) величину  $n$  і розрахувати кількість підключень до однієї точки доступу.

(4.2)

Відповідно виконаємо розрахунок кількості користувачів, які зможе одночасно підтримувати одна точка доступу при передачі даних, враховуючи, що середня кількість користувачів рівна 150. По формулі (2) маємо:

$$n = \frac{1000}{100} \approx 7.$$

Для розрахунку кількості точок доступу, необхідної для організації підключення до мережі на заданій швидкості, скористуємось формулою:

(4.3)

де  $N_{підкл.}$  – загальна кількість підключень ( $N_{підкл.} = N$ );

$n$  – кількість підключень до мережі на заданій швидкості, що підтримуються однією точкою доступу.

Для цього розрахуємо загальну кількість користувачів. Максимальна кількість користувацького обладнання в проєктованій мережі в загальному випадку складається з клієнтських станцій.

$$N = n_{\text{кор.}}, \quad (4.4)$$

де  $n_{\text{кор.}}$  – кількість користувачів мережі (в нашому випадку рівне максимальній кількості робочих місць  $n_{\text{кор.}} = 150$ ).

Підставивши в формулу (4.4) кількісні значення, отримаємо:

$$N = 150.$$

Тепер розрахуємо кількість точок доступу необхідних для підтримки 100 користувачів відповідно.

Отже, необхідне встановлення 2 точок доступу для забезпечення роботи 150 користувачам на 3 поверхах з мінімальною швидкістю 70 Мбіт/с. Тому для 9 поверхів гуртожитку, як і припускалось, вистачить 6 точок доступу.

#### **4.2.2 Розрахунок параметрів антени**

Ефективна ізотропна випромінювана потужність визначається за формулою[ 1]:

$$(4.5)$$



де  $P_{\text{ПРД}}$  – вихідна потужність передавача, дБм;

$W_{\text{АФТпрд}}$  – втрати сигналу в АФТ передавача, дБ;

$G_{\text{ПРД}}$  – посилення антени передавача, дБі.

Розрахунок ефективної ізотропної випромінюваної потужності однієї точки доступу (дані представлені в таблиці 4.1)

Таблиця 4.1 – Параметри даних

Позначення	Найменування	Одиниці вимірювання	Значення
$P_{\text{ПРД}}$	Вихідна потужність передавача	дБ	64
$W_{\text{АФТпрд}}$	Коефіцієнт підсилення антени	дБ	2
$G_{\text{ПРД}}$	Втрати сигналу передавача	дБ	6

За формулою (4.5) ефективна ізотропна випромінювана потужність складає:

$$\text{EIRP} = 64 - 6 + 2 = 60(\text{дБм}).$$

Далі розрахуємо зону дії сигналу. Ця методика дозволяє визначити теоретичну дальність роботи безпроводного каналу зв'язку, побудованого на обладнанні D-LINK. Зазначимо, що відстань між антенами, що отримується за формулою – максимально досяжна теоретично, але так як на безпроводний зв'язок впливає безліч факторів, отримати таку дальність роботи, особливо в межах міста, на жаль, практично неможливо.

Для визначення дальності зв'язку необхідно розрахувати сумарне значення посилення тракту і за графіком визначити відповідну цьому значенню дальність. Посилення тракту в дБ визначається за формулою:

$$Y_{\text{дБ}} = P_{\text{т,дБ}} + G_{\text{т,дБ}} + G_{\text{Т,дБ}} - P_{\text{min,дБ}}, \quad (4.6)$$

де  $P_{t,дБ}$  – потужність передавача;

$G_{t,дБ}$  – коефіцієнт посилення передавальної антени;

$G_{r,дБ}$  – коефіцієнт посилення приймальної антени;

$P_{min,дБ}$  – реальна чутливість приймача.

$$Y_{дБ} = 64 + 2 + 0 + 60 = 126 \text{ (дБ)}.$$

Розрахунок дальності роботи безпроводного каналу зв'язку береться з інженерної формули розрахунку втрат у вільному просторі:

$$FSL = Y_{дБ} - SOM, \quad (4.7)$$

де  $FSL$  (Free Space Loss) - втрати у вільному просторі (дБ);

$SOM$  (System Operating Margin) - запас в енергетиці радіозв'язку (дБ).

Враховуючи можливі фактори, що негативно впливають на дальність зв'язку, параметр  $SOM$  береться рівним 15 дБ. Вважається, що 15-ти децибельний запас щодо посилення достатній для інженерного розрахунку.

$$FSL = 126 - 15 = 111 \text{ (дБ)}.$$

Отже, формула для розрахунку дальності зв'язку має наступний вигляд:

$$D = 10^{\left(\frac{FSL}{20} - \frac{33}{20} - \lg F\right)}, \quad (4.8)$$

де  $F$  – центральна частота, яку вибираємо з таблиці 3.1.1

$$D = 10^{\left(\frac{111}{20} - \frac{33}{20} - \lg 5220\right)} = 1,522 \text{ (км)} \approx 10522 \text{ (м)}.$$

Таким чином бачимо, що вибрана точка доступу дозволить передавати дані на відстань 1,522 (км).

Далі розрахуємо швидкість передачі даних. Використаємо формулу (2.2), яка була наведена в 2 розділі, розглядаючи варіанти реалізації антен MIMO.

Теорема Шеннона [26] стверджує, що ємність каналу  $C$ , що означає теоретичну верхню межу швидкості передачі даних, які можна передати з даною середньою потужністю сигналу  $S$ , схильна до адитивного білого гаусівського шуму потужності  $N$  дорівнює:

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (4.9)$$

де  $C$  - ємність (пропускна здатність) каналу, біт / с;

$B$  - смуга пропускання каналу, Гц;

$S$  - повна потужність сигналу над смугою пропускання, Вт або  $B^2$ ;

$N$  - повна шумова потужність над смугою пропускання, Вт;

$S/N$  – відношення середньоквадратичної потужності сигналу до середньоквадратичної потужності гаусівського шуму на виході системи передачі, виражене як відношення потужностей (відношення сигнал / шум).

У загальному випадку, вираз  $\log_2 (1 + x)$  пропорційно  $x$  для малої значення  $x$ , що означає, що для малої відношення сигнал шум  $S/N$  пропускна здатність зростає приблизно пропорційно відношенню  $S/N$ . Однак, для великих  $x$ ,  $\log_2 (1 + x) \approx \log_2 (x)$ , що означає, що для більшого відношення  $S / N$  пропускна здатність зростає логарифмічно з збільшенням  $S/N$ .

Однією з переваг використання MIMO-антен є збільшення пропускної здатності при незмінних ширині смуги і рівні потужності. Пропускна здатність зростає пропорційно мінімальній кількості антен:

$$C = B \cdot \min\{N_T, N_R\} \cdot \log_2 \left( 1 + N_R \min\{N_T, N_R\} \cdot \frac{S}{N} \right). \quad (4.10)$$

При використанні технології MIMO пікова швидкість передачі даних визначається виразом:

$$C_{MIMO} = M \cdot f_d \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right). \quad (4.11)$$

Параметр  $M$  залежить від конфігурації MIMO:

$$M = \min\{M_{\text{прд}}, M_{\text{пр}}\}, \quad (4.12)$$

де  $M_{\text{прд}}$  - число передавальних антен;

$M_{\text{пр}}$  - число приймальних антен.

Швидкість передачі даних збільшується лінійно зі збільшенням числа антен.

Для несиметричних антенних конфігурацій MIMO швидкість передачі даних:

$$C_{\text{прд/пр}} = f_d \cdot \log_2 \left( 1 + M \left( \frac{S}{N} \right) \right). \quad (4.13)$$

Розрахуємо пропускну здатність для нашого випадку на лінії вниз: ширина смуги 80 МГц, циклічний префікс звичайний, MIMO 3×3.

Для того щоб оцінити швидкість передачі даних в низхідному каналі (downlink), спочатку обчислимо, скільки ресурсних елементів (або OFDM-символів) передається в мілісекундному кадрі в залежності від наявної смуги частот. Таким чином, число ресурсних елементів в кадрі дорівнюватиме:

$$N = 12 \cdot 7 \cdot N_{RB} \cdot 2, \quad (4.14)$$

де  $N_{RB}$  - число ресурсних блоків РБ;

7 – OFDMA-символів;

12 – число підносійних в ресурсному блоці;

2– слоти.

1) Знайдемо кількість ресурсних елементів в підкадрі:

$$N=12 \cdot 7 \cdot 36 \cdot 2 = 6048(\text{ресурсних елементів}).$$

2) Розрахуємо швидкість, з огляду на модуляцію 256-QAM:

$$V_1=(6 \cdot 6048) / 0,001 = 36,288(\text{Мбіт/с}).$$

3) З огляду на технологію MIMO 3X3, швидкість буде дорівнювати:

$$V_2=3 \cdot 36,288 = 108,864 (\text{Мбіт/с}).$$

4)PDCCH канал займає від 1 до 3 символів з 14 в субкадрі. Допускаючи, що в середньому це 2,5 символи, загальне число символів витрачених в каналі PDCCH буде:

$$N_{\text{симв.}} = (2,5 / 14) \cdot 100\% = 17,86\%.$$

5) 6,66% займається циклічним префіксом, 10% йде під захисний інтервал, 14,29% займається пілот-сигналами (2 передавальні антени). Решта каналів (PSS, SSS, PBCH, PCFICH, PHICH) займають 2,6% від загального числа символів. Загальна кількість витрат на 40 МГц:

$$N_{\text{витр.}} = 17,86 + 6,66 + 10 + 14,29 + 2,6 = 51\%.$$

З розрахунків видно, що з огляду на технологію MIMO 3X3 вибрана точка доступу дозволить передавати дані на відстань 1,522 (км) при швидкості передачі 108,864 (Мбіт/с).

### 4.2.3 Розрахунок втрати сигналу

Моделі розрахунку втрат радіосигналу дозволяють оцінити загасання електромагнітної хвилі, випромінюваної Wi-Fi адаптером, з урахуванням

кількості та типу перешкод на шляху проходження сигналу. У кваліфікаційній роботі розглядаються моделі розповсюдження сигналу, що використовуються для розрахунку рівня сигналу всередині будівель. Моделей, про які піде мова, і їх модифікацій існує велика кількість. У роботі розглядаються найбільш прості, якими можна скористатися навіть в польових умовах без глибоких математичних знань.

Перед початком розгляду різних моделей поширення радіосигналу відзначимо, що в ідеальних умовах (відсутні перешкоди на шляху проходження сигналу, і немає багаторазових перевідбиттів сигналу) оцінити потужність сигналу в будь-якій точці вільного простору (free space - FS) можна по так званій формулі Фріїса:

$$l_{FS} = 10 \log \left( \frac{G_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прм}} \cdot \lambda^2}{(4\pi d)^2} \right), \quad (4.15)$$

де  $G_{\text{прд}}$  – коефіцієнт підсилення антени передавача;

$G_{\text{прм}}$  – коефіцієнт підсилення антени приймача;

$\lambda$  – довжина хвилі (м);

$d$  – відстань між приймачем і передавачем (м).

Як правило, більшість моделей поширення використовують значення втрат у вільному просторі в якості базового, і додають до нього змінні, що вносять додаткове загасання в залежності від типу перешкод і їх електрофізичних властивостей. До таких моделей належать, наприклад, One slope і Log-distance. Крім того, існує стандартизована Міжнародним союзом електрозв'язку модель втрат - ITU-R 1238. Перераховані моделі втрат відносяться до класу емпіричних статичних моделей, тобто для їх використання потрібно загальний опис типу завдання (типу приміщення). Перераховані моделі втрат з розшифруванням вхідних до них змінних наведені в формулах (4.15-4.17).

One slope:

$$l(d) = l_{FS} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (4.15)$$

де  $d$  – відстань в метрах, на якій відбувається оцінка затування;

$l_{FS}$  – втрати на відстані  $d_0$  метрів;

$n$  – коефіцієнт, що залежить від кількості і матеріалу перешкод.

Log distance:

$$l(d) = l_{FS} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (4.16)$$

де  $X_\sigma$  – нормальна випадкова величина, що вимірює звичайне стандартне відхилення  $\sigma$ , дБ.

ITU-R 1238:

$$l(d) = 20 \log(f) + N \log(d) + L_f(n) - 28, \quad (4.17)$$

де  $d > 1$ ,  $m$  – відстань, на якій проводиться оцінка затування;

$f$  – частота центрального каналу Wi-Fi, МГц;

$N$  – коефіцієнт втрат рівня сигналу з відстанню;

$L_f(n)$  – коефіцієнт втрати потужності сигналу при проходженні через стіну (підлогу);

$n \geq 1$  – кількість стін (між приймальною і передавальною антенами).

Далі більш детально розглянемо модель ITU-R 1238, застосуємо її для визначення дальності зв'язку, і порівняємо результати розрахунків з результатами експерименту.

Про те, які значення в вищих формулах приймають змінні  $N$ ,  $n$ , детально розписано безпосередньо в самій рекомендації MCE-R P. 1238-5 під назвою "Дані про поширення радіохвиль і методи прогнозування для планування систем радіозв'язку всередині приміщень і локальних зонних радіомереж в

частотному діапазоні 900 МГц - 100 ГГц ". Для експерименту, який буде проведено нижче, значення змінних будуть обрані з вказаною рекомендації.

На жаль, перераховані моделі не враховують впливу на точку доступу (точніше на випромінюється їй електромагнітну хвилю) стороннього обладнання, яке функціонує в тому ж частотному діапазоні. Тому всі розрахунки проводяться виходячи з того, що пристрій єдиний в усьому радіусі його (обладнання) дії. Як показує практика розрахунків, якщо в радіусі чутності точки доступу знаходиться 20-30 безпроводних пристроїв, то радіус дії зменшується на 15-20%. Але варто мати на увазі, що ця цифра суто приблизна і в різних ситуація може проявлятися по-різному, бо дуже залежить від потужності сигналу, який приходить в пристрій, і від того на якій частоті працює навколишній обладнання.

Встановлена точка доступу Wi-Fi працює в діапазоні частот 5 ГГц. Приймальний пристрій (ПК) встановлюється в шести точках, схематичне розташування яких зображено на рисунку 4.2, і реєструє випромінювану потужність. Вибір розташування точок виміру проведений так, щоб мінімізувати вплив ефекту багатопроменевого поширення на рівень сигналу. Передбачається, що максимуми діаграм спрямованості приймальної і передавальної антени спрямовані один на одного.

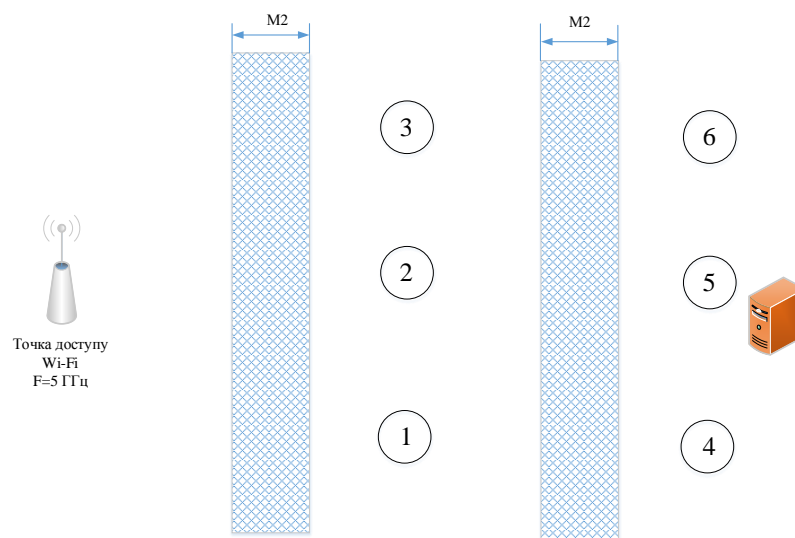


Рисунок 4.2 – Структурна схема розташування точок вимірювання



Перед тим як приступити до розрахунків, слід зазначити, що автори моделі ITU-R тисяча двісті тридцять вісім зробили її дуже гнучкою, зокрема за рахунок того, що входить коефіцієнт  $N$  може змінюватися в широких межах: від 20 до 40 дБ. Щоб зрозуміти яким значенням прирівнювати  $N$  для конкретної ситуації, краще звернутися безпосередньо до першоджерела рекомендації.

Для розглянутого діапазону коефіцієнт втрати потужності сигналу при проходженні через стіни для нашого типу завдання -  $L_{fn}$  розраховується за формулою  $L_{fn} = 15 + 4(n-1)$  Таким чином, для точок 1-3  $L_f(n) = 15$ . Для точок 4-6  $L_f(n) = 19$  (таблиця 3 рекомендації MCE-R P. 1238-5). Коефіцієнт  $N$ , який використовується при розрахунку втрат на передачу всередині приміщення приймемо рівним 30 (таблиця 2 рекомендації MCE-R P. 1238-5). З урахуванням обраної геометрії завдання, завмирання враховуватися не будуть.

Результати розрахунків в 6-ти точках по формулі ITU-R зведені в таблицю 4.1, а відстані до кожної точки вимірювання від Wi-Fi роутера зображені на малюнку 4.3.

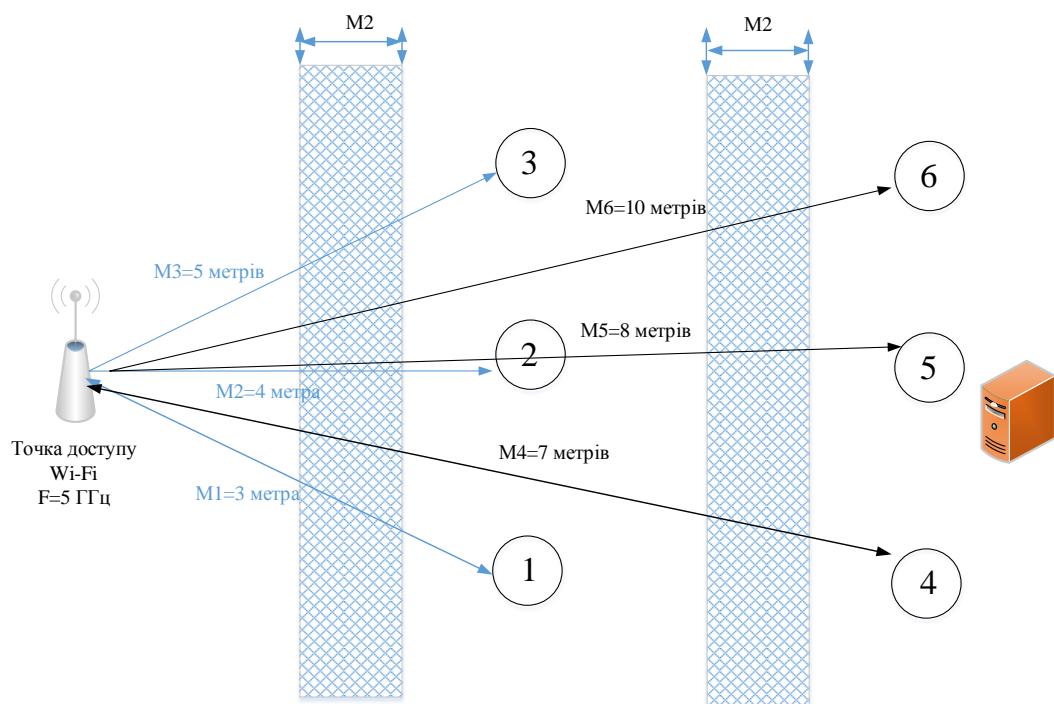


Рисунок 4.3 – Відстані до кожної точки вимірювання від Wi-Fi роутера

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків

Точка вимірювання (розрахунку) рівня сигналу	Розрахунок по рекомендації ITU-R 1238-5, дБ	Результати вимірювання по Wi- FiScanner, дБ
1 – 3 метри	-75,3	-74,4
2 – 4 метри	-79	-81,3
3 – 5 метрів	-81,9	-84,6
4 – 7 метрів	-90	-92,6
5 – 8 метрів	-92	-95,8
6 – 10 метрів	-94,98	-90,1

Отримані результати для більш наочного уявлення зображені на рисунку 4.4.

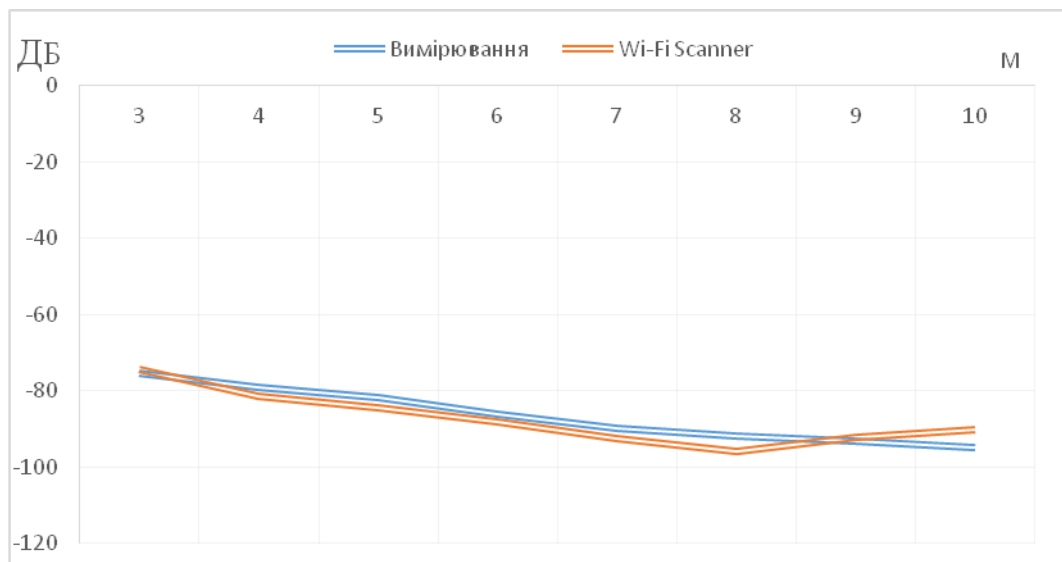


Рисунок 4.4 – Результати вимірювань

Найменша різниця експериментальних і розрахункових даних спостерігається в точках вимірювання 1 і 4. Пов'язано це з тим, що сигнал проходить через перешкоди (а даному випадку, стіни) по найкоротшому шляху. І навпаки, в точках 2,3 і 5,6 сигнал втрачає велику частину енергії

проходячи через перешкоди по більш довгому шляху. Цей ефект не враховується в використовуваній моделі розповсюдження сигналу, що і призводить до зростання різниці розрахункових і експериментальних даних.

### 4.3 Моделювання системи МІМО

Як описувалось раніше, двома основними напрямками технології МІМО в стандарті 802.11ac є просторове мультиплексування і просторово-часове кодування.

Просторово-часове кодування забезпечує досить високу стійкість системи передачі, однак швидкість передачі на біт залишається невисокою. При використанні просторового мультиплексування швидкість передачі зростає, але збільшується і ймовірність помилки на біт.

Різновидом просторово-часового кодування є просторово-тимчасове блочне кодування. Сутність ортогонального просторово-часового блокового кодування полягає в тому, що вихідна послідовність символів розділяється на блоки і спеціальним чином обробляється. Після цього всі сигнали випромінюються одночасно всіма передавальними антенами. На приймальній стороні кожна антена приймає суміш сигналів від всіх передавальних антен. Поділ прийнятих сигналів забезпечується за рахунок застосування спеціальної структури переданого блоку [1].

На основі теоретичних даних, описаних в роботі, побудуємо імітаційну модель МІМО системи зв'язку з просторово-тимчасовим блоковим кодуванням (рис.4.5).

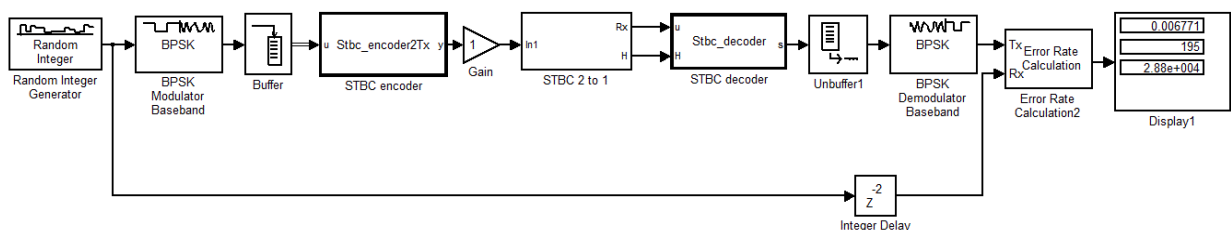


Рисунок 4.5 - Імітаційна модель системи МІМО

Далі проведемо дослідження ймовірності помилки прийому біта від відношення сигнал/шум для системи зв'язку з MIMO і без MIMO, при різних конфігураціях антен ( $2 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 1$  і  $3 \times 3$ ) і при різних видах модуляції. Результати моделювання представлені на рисунках 4.5 – 4.7.

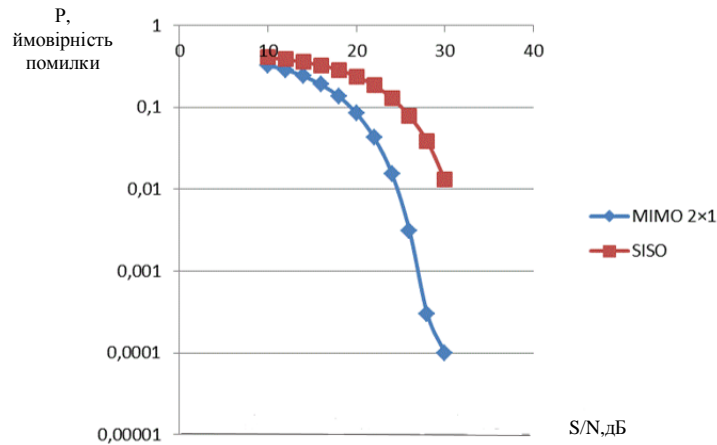


Рисунок 4.6 – Графік залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум для систем зв'язку з MIMO і без MIMO

З рисунку 4.6 видно, що для забезпечення ймовірності помилки, що дорівнює 0,1, для системи зв'язку з MIMO потрібно відношення сигнал/шум в 20 дБ. Для забезпечення тієї ж ймовірності помилки для системи зв'язку без MIMO (SISO) потрібно відношення сигнал шум в 26 дБ, тобто на 6 дБ більше.

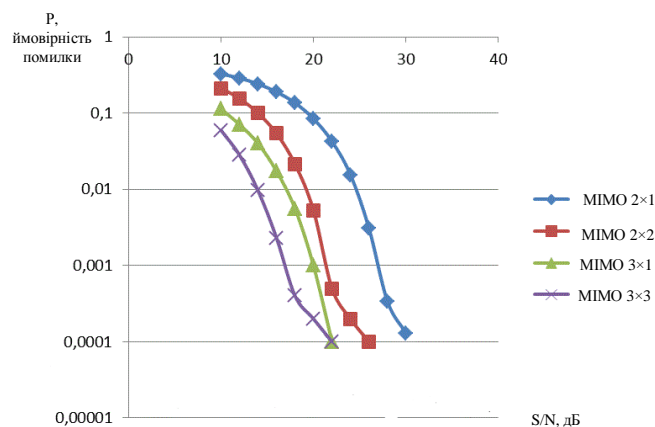


Рисунок 4.7 – Графік залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум

З рисунку 4.7 можна визначити, що ймовірність помилкового прийому зменшується при збільшенні відносини сигнал/шум. Для MIMO системи з конфігурацією антен  $2 \times 1$  при збільшенні кількості прийомних антен до 2-х для ймовірності помилкового прийому 0,01 необхідне відношення сигнал/шум зменшується на 6дБ. Для MIMO системи з конфігурацією антен  $3 \times 1$  при збільшенні кількості прийомних антен до 2-х для ймовірності помилкового прийому 0,01 необхідне відношення сигнал/шум зменшується на 4 дБ. З порівняння MIMO систем з конфігурацією антен  $2 \times 1$  і  $3 \times 1$  для ймовірності помилкового прийому 0,01 необхідне відношення сигнал/шум зменшується на 8 дБ.

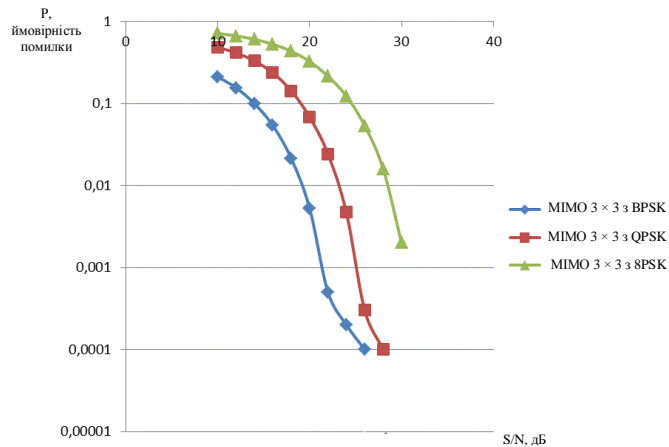


Рисунок 4.8 – Графік залежності ймовірності помилки від відносини сигнал/шум при різних видах модуляції

З рисунку 4.8 можна визначити, що ймовірність помилкового прийому збільшується при переході від модуляції BPSK до QPSK і від QPSK до 8PSK. При переході від модуляції BPSK до QPSK для ймовірності помилкового прийому 0,01 необхідне відношення сигнал/шум збільшується на 4 дБ. При переході від модуляції QPSK до 8PSK для ймовірності помилкового прийому 0,01 необхідне відношення сигнал/шум збільшується на 6 дБ.

Для оцінки ефективності технології MIMO в стандарті розглянемо ще два приклади, один з одним користувачем та інший з багатокористувацьким (чотири користувача).

Експеримент 1: Розглядаючи одного користувача з двома передавальними антенами можна побачити результати за рахунок збільшення кількості приймальних антен. Для кращого розуміння результати побудовані на рисунку 4.9.

В даному випадку використана QPSK модуляція та кодування просторового та часового блоків (STBC) для передачі та прийому символів. Для підготовки симуляційної моделі взято джерело як бінарний генератор, а потім сигнал був промодульований за допомогою модулятора QPSK.

Для передачі сигналу використовувався ортогональний блок-код блокування (OSTBC). Були використані дві антени в передавачі, і сигнали передавали через релеєвський канал, а AWGN використовувався для додавання білого гаусового шуму на вхідний сигнал. Цей сигнал потім був отриманий декодером OSTBC і, нарешті, демодулювався сигнал, використовуючи QPSK демодулятор для прогнозування вихідного сигналу.

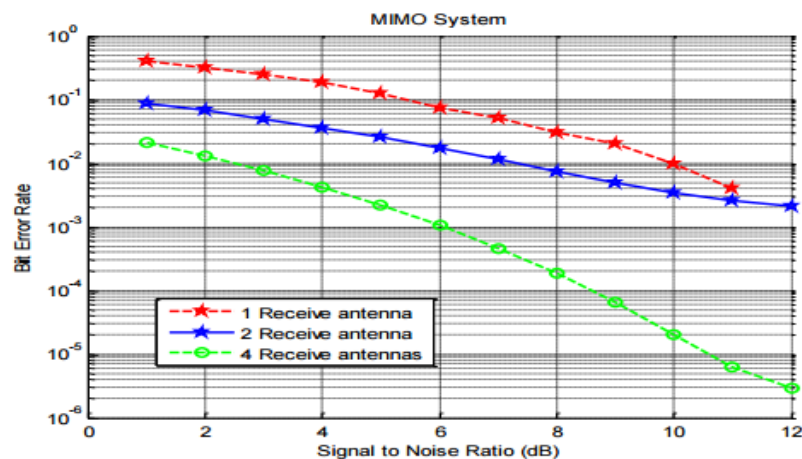


Рисунок 4.9– Однокористувацька система MIMO STBC з двома передавальними антенами та модуляцією QPSK

Порівнюючи вихідний сигнал і вхідний сигнал, побудований графік співвідношення сигнал/шум (SNR) та швидкості помилки (BER). Даний

метод використовувався для однієї, двох і чотирьох приймальних антен і їх результати порівняні на одному графіку.

Експеримент 2: Зроблено моделювання для багатокористувацької системи MIMO. В даному випадку був взятий цільний генератор і модулювався сигнал за допомогою 4-QAM, використовуючи ортогональне кодування блоків просторово-часового коду (OSTBC) та чотири передавальні антени для кожного користувача. З урахуванням інформації про стан каналу (CSI) був помножений сигнал з попереднім кодером. Додано прохідний канал сигналу та шум AWGN. OSTBC об'єднувач був використаний для отримання сигналу і використовувалась проста максимальна вірогідність (ML).

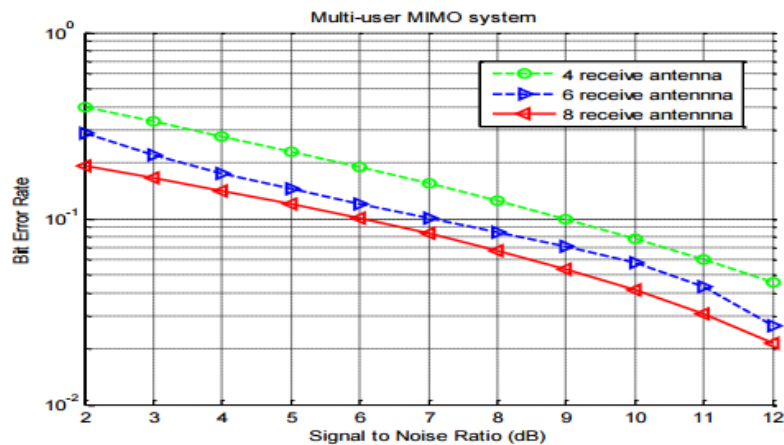


Рисунок 4.10– Чотири користувача MIMO з чотирма передавальними антенами для кожного користувача та модуляцією QAM

Далі сигнал був промодельований і порівняний з оригінальним переданим сигналом. За цією ж процедурою було виконано для чотирьох, шести та восьми передавальних антен та побудовані графіки результатів для співвідношення сигнал/шум (SNR) та швидкості помилки біт (BER).

## Висновки до розділу 4

У даному розділі була спроектована структурна схема для побудови безпроводної мережі у гуртожитку за допомогою технології MU-MIMO та «Beamforming» стандарту 802.11ac, а також виконувались розрахунки параметрів антени, кількості точок доступу, втрати сигналу, радіусу дії сигналу і швидкості передачі. Розрахунки показали, що необхідне встановлення 2 точок доступу для забезпечення роботи 150 користувачам на 3 поверхах з мінімальною швидкістю 70 Мбіт/с. Тому для 9 поверхів гуртожитку, як і припускалось, вистачить 6 точок доступу. При цьому вибрана точка доступу дозволить передавати дані на відстань 1,522 (км) зі швидкістю 108,864 (Мбіт/с). Результати моделювання показали ефективність використання антени MIMO в порівнянні з антеною SISO.



## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання робиться висновок щодо напрямів організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтингу.

Для проведення технологічного аудиту залучимо 3-х незалежних експертів.

Оцінювання комерційного потенціалу розробки виконаємо за 12-ю критеріями, наведеними в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри- тері й	0	1	2	3	4
<b>Технічна здійсненність концепції:</b>					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
<b>Ринкові переваги (недоліки):</b>					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів

Продовження таблиці 5.2

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-тер.	0	1	2	3	4
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
<b>Ринкові перспективи</b>					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
<b>Практична здійсненність</b>					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

## Продовження таблиці 5.2

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-тер.	0	1	2	3	4
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки занесемо у таблицю 5.3:

Таблиця 5.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Кичак В.М., доктор технічних наук, професор, декан ФІРЕН	Бортник Г.Г., к.т.н., професор, завідувач каф. ТКСТБ	Михалевський Д.В., к.т.н, доцент каф. ТКСТБ
Бали, виставлені експертами:			
Достовірність концепції	4	4	4
Наявність аналогів на ринку	2	2	2
Ціна продукту	3	3	4
Переваги в технічних властивостях продукту	4	4	4
Обсяг експлуатаційних витрат	2	3	3
Величина ринку та його динаміка	3	3	3
Наявність конкуренції на ринку	2	2	1

Продовження таблиці 5.3

Наявність фахівців для реалізації ідеї	4	4	4
Потреба в фінансових ресурсах	3	2	3
Потреба в матеріалах	2	3	3
Термін реалізації та окупності інвестиції	4	4	4
Потреба у розробці регламентованих документів та отримання дозвільних документів	2	2	3
Сума балів	35	36	38
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{35+36+38}{3} = 36,3$		

Для оцінки рівня комерційного потенціалу розробки скористаємось даними з таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$ , розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Виходячи з даних, розробка забезпечує вище середнього рівня комерційного потенціалу. Це пов'язано з тим, що даний інноваційний товар відноситься до апаратури побудови Wi-Fi мереж. А на сьогоднішній день великого розвитку в області передачі даних досягли саме безпроводні мережі–мережі радіозв'язку. Це можна пояснити зручністю їх використання, дешевизною і прийнятною пропускнуою здатністю. Виходячи з такої динаміки розвитку, можна зробити висновок про те, що за кількістю і поширеністю безпроводні мережі в найближчий час перевершать провідні мережі. Ця

динаміка безпосереднім чином впливає на вимоги до високошвидкісних каналів із технологіями підвищення ефективності.

Для реалізації проекту використаємо шлях інжинірингу, який є галуззю людської інтелектуальної діяльності і процесом, завданням якого є проектування, створення, використання, підтримка, переробка або знищення концепції, моделі, продукту, процесу, системи або технології для вирішення конкретних технічних завдань. За кінцеву мету даний шлях має мету отримання найкращих результатів від капіталовкладень або інших видатків.

Розробка є якісно новим рішенням, яка дозволить шляхом конфігурації та розширень МІМО антени в безпроводній мережі стандарту 80211ac покращити ефективність – підвищити швидкість, якість передачі та радіус дії в приміщенні гуртожитку. Хоча виробник самостійно розроблює продукцію на основі літературних джерел та статистичних даних, з урахуванням потреб споживачів, такий товар на ринку вважатиметься як «поліпшений товар».

Одними з основних конкурентів даного інноваційного рішення можуть бути виробники компанії ПрАТ «Київстар». Основними послугами компанії є послуги мобільного зв'язку (у стандартах GSM-EDGE та UMTS-HSPA+) і доступу до мережі Інтернет (на базі технології FTTB).

ПрАТ «Київстар» задовольняє потреби внутрішнього ринку України у створенні систем безпроводного зв'язку. ПрАТ «Київстар» є найбільшим оператором мобільного зв'язку (понад 25 млн. абонентів), а також одним із найбільших інтернет-провайдерів (близько 800 тис. підключень широкопasmового доступу) в Україні.

Згідно специфіки інноваційного товару, він призначений для надання послуг як фізичним так і юридичним особам. Таким чином, усі ринки збуту в основному будуть направлені на цих споживачів.

Для успішної реалізації ідеї необхідне залучення незначних фінансових ресурсів.

## 5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської, конструкторсько-технологічної роботи

Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи складається з таких етапів[34]:

- 1) розрахунок витрат, які безпосередньо стосуються виконавців даного розділу роботи;
- 2) розрахунок загальних витрат на виконання даної роботи;
- 3) прогнозування загальних витрат на виконання та впровадження результатів даної роботи.

*1-й етап:* Розрахуємо витрати, які безпосередньо стосуються виконавців даного розділу роботи:

1. Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників)  $Z_o$ , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ (грн)}, \quad (5.1)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.

$T_p$  – число робочих днів в місяці; приблизно  $T_p = (21 \dots 23)$  дні;

$t$  – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Результат прогнозування витрат зведемо у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Результат прогнозування витрат

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, грн.	Примітка
1. Керівник проекту	11 200	486	15	7 290	
2. Інженер по телекомунікаціях	9 100	395	10	3 950	
3. Інженер-монтажник	8 400	365	10	3 652	
4. Наладчик системи	8 400	365	10	3 652	
Всього				18 544	

2. Основна заробітна плата робітників  $Z_p$ , якщо вони беруть участь у виконанні даного етапу роботи і виконують роботи за робочими професіями у випадку, коли вони працюють в наукових установах бюджетної сфери, розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \text{ (грн)}, \quad (5.2)$$

де  $t_i$  – норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

$n$  – число робіт по видах та розрядах;

$C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує дану роботу.  $C_i$  визначається за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}} \text{ (грн./годину)}, \quad (5.3)$$

де  $M_m$  – розмір мінімальної заробітної плати за місяць у 2017 році, грн. ( $M_m = 3200$  грн.);

$K_i$  – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду.

$T_p$  – число робочих днів в місяці;  $T_p = 23$  дні;

$T_{zm}$  – тривалість зміни,  $T_{zm} = 8$  годин.

Таблиця 5.6 – Основна заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, нормо-годин	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
1. Проектування і синтез системи	8	6	34	272

Продовження до таблиці 5.6

2. Налаштування мережі	8	4	26	208
3. Тестування мережі	8	4	26	208
Всього				688

У випадку, коли робітники беруть участь у виконанні даного етапу роботи, працюючи при цьому на підприємствах промисловості, то погодинна тарифна ставка  $C_i$  робітника відповідного розряду розраховується за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_{\text{мкс}} \cdot K_c}{T_p \cdot T_{\text{зм}}}, \quad (5.4)$$

де  $M_m$  – розмір мінімальної заробітної плати за місяць, грн./міс.;

$K_{\text{мкс}}$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7 – Міжкваліфікаційні співвідношення для встановлення тарифних ставок робітникам (для цього випадку)

Розряд	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{\text{мкс}}$	1,0	1,1	1,35	1,5	1,7	2,0	2,2	2,4

3. Додаткова заробітна плата  $Z_d$  всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Z_o = (0,1...0,12) \cdot Z_o + Z_p. \quad (5.5)$$

$$Z_o = 0,1 \cdot (18544 + 688) = 1923(\text{грн}).$$



4. Нарахування на заробітну плату  $H_{зп}$  розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$H_{зп} = (З_о + З_р + З_д) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (5.6)$$

де  $З_о$  – основна заробітна плата розробників, грн.;

$З_р$  – основна заробітна плата робітників, грн.;

$З_д$  – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

$\beta$  – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, %.

Станом на сьогоднішній день ставка ЄСВ складає 22%.

Таким чином:

$$H_{зп} = (18544 + 688 + 1923) \cdot 0,22 = 4654(\text{грн}).$$

5. Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень  $A$ , які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо. У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування  $A$  в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T}{12} (\text{грн}), \quad (5.7)$$

де  $Ц$  – загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн;

$H_a$  – річна норма амортизаційних відрахувань. Для нашого випадку можна прийняти, що  $H_a = (10...25)\%$ ;

$T$  – термін, використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Зроблені розрахунки зведемо до таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Амортизація обладнання

Найменування обладнання, приміщень тощо	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
Програмно-апаратний комплекс	50 000	25	1	1 041
Програмно апаратне забезпечення	20 000	20	1	332
Апаратура зв'язку (точка доступу, комутатор, модем)	40 000	25	1	830
Тестер	10 000	25	1,5	20,7
Приміщення	25 000	5	2	10375
Всього				12 598,7

Витрати на матеріали  $M$ , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot C_v \text{ (грн)}, \quad (5.8)$$

де  $H_i$  – витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$C_i$  – вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн./кг.;

$K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,12$ ;

$B_i$  – маса відходів матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$C_v$  – ціна відходів матеріалу  $i$ -го найменування, грн/кг;

$n$  – кількість видів матеріалів.

Розрахунки занесемо у таблицю 5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на матеріал

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено, кг., шт.	Величини на відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн.
1. Точка доступу TP-LINK Archer C9	4 000	6	0	0	26 880
2. Безпроводний комутатор DWS-4026	1 500	1	0	0	1 680
3. DSL-модем	3 600	1	0	0	4 032
4. ПК	10 000	1	0	0	11 200
Всього					43 792

7. Витрати на комплектуючі  $K$ , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i \cdot K_i \text{ (грн)}, \quad (5.9)$$

де  $N_i$  – кількість комплектуючих  $i$ -го виду, шт.;

$C_i$  – ціна комплектуючих  $i$ -го виду, грн.;

$K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,12$ ;

$n$  – кількість видів комплектуючих.

Зроблені розрахунки бажано зведемо до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектувальних	Кількість	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
1. Стабілізатор напруги	3	1 200	4 032
Всього			4 032

8. Витрати на силову електроенергію  $V_e$ , якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$V_e = V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi} \text{ (грн)}, \quad (5.10)$$

де  $V$  – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2017 р.  $V \approx 2,50$  грн./кВт;

$\Pi$  – установлена потужність обладнання, кВт;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин,

$K_{\Pi}$  – коефіцієнт використання потужності;  $K_{\Pi} < 1$ .

$$V_e = 2,50 \cdot 0,8 \cdot 24 \cdot 0,9 = 43,2 \text{ (грн)}.$$

#### 9. Інші витрати $V_{\text{ін}}$ .

Інші витрати  $V_{\text{ін}}$  охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Інші витрати  $I_v$  можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які були виконували дану роботу, тобто:

$$V_{\text{ін}} = (1..3) * (3_o + 3_p). \quad (5.11)$$

$$V_{\text{ін}} = 2 \cdot 1923 = 3846 \text{ (грн)}.$$

10. Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати на виконання даної частини (розділу, етапу) роботи –  $V$ .

*2-й етап:* розрахунок загальних витрат на виконання даної роботи. Розрахунок загальних витрат здійснюється у тому випадку, коли дипломник виконує тільки певну частину даної роботи. У подальшому ця наукова робота буде продовжена.

Тоді загальна вартість всієї наукової роботи визначається за  $V_{\text{заг}}$  формулою:

$$B_{\text{заг}} = \frac{B_{\text{ін}}}{\alpha}, \quad (5.12)$$

$$B_{\text{заг}} = \frac{B_{\text{ін}}}{\alpha} = \frac{3846}{0,1} = 38460(\text{грн}).$$

де  $\alpha$  – частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даного етапу роботи, у відн. одиницях.

*3-й етап:* прогнозування загальних витрат на виконання та впровадження результатів виконаної наукової роботи. Прогнозування загальних витрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної наукової роботи здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{\text{заг}}}{\beta}, \quad (5.13)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання даної роботи. Так, якщо розробка знаходиться:

- на стадії науково-дослідних робіт, то  $\beta \approx 0,1$ ;
- на стадії технічного проектування, то  $\beta \approx 0,2$ ;
- на стадії розробки конструкторської документації, то  $\beta \approx 0,3$ ;
- на стадії розробки технологій, то  $\beta \approx 0,4$ ;
- на стадії розробки дослідного зразка, то  $\beta \approx 0,5$ ;
- на стадії розробки промислового зразка,  $\beta \approx 0,7$ ;
- на стадії впровадження, то  $\beta \approx 0,9$ .

Так як розробка знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то застосуємо  $\beta \approx 0,1$ :

$$ЗВ = \frac{38460}{0,1} = 384300(\text{грн}).$$

### 5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів обробки

Виконаємо кількісний прогноз вигоди/зиску [35], який можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи.

Для розробки проекту та впровадження результатів розробки необхідно близько 1 року. Позитивний результат прогнозується впродовж 3 років після впровадження проекту, і за рахунок покращених характеристик, технології антени МІМО у порівнянні з аналогами, що існують на ринку, актуальність нова розробка буде мати вже впродовж року.

Впровадження нової розробки дозволить у порівнянні з аналогом збільшити радіус дії сигналу, а відповідно і кількість абонентів-користувачів, пропускну здатність каналу і якість переданого сигналу.

Виходячи з того, що в умовах ринку узагальнюючим позитивним результатом, що його отримує підприємство (організація) від впровадження результатів тієї чи іншої розробки, є збільшення чистого прибутку підприємства (організації). Зростання чистого прибутку ми оцінимо у теперішній вартості грошей. Адже саме зростання чистого прибутку забезпечить підприємству (організації) надходження додаткових коштів, які дозволять покращити фінансові результати діяльності та виплатити кредити (якщо вони потрібні для впровадження результатів розробки).

Тут можливі два основні випадки [34].

*1-й випадок:* коли можна прямо оцінити зростання чистого прибутку підприємства від впровадження результатів наукової розробки. У цьому випадку збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta \Pi_i$  для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки.

*2-й випадок:* коли не можливо прямо оцінити зростання чистого прибутку підприємства від впровадження результатів наукової розробки. У цьому випадку збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta \Pi_i$  для кожного

із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки

Так як не можливо прямо оцінити зростання чистого прибутку підприємства від впровадження результатів наукової розробки, то будемо використовувати 2-й випадок.

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right), \quad (5.14)$$

де  $\Delta\Pi_o$  – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.  $\Delta\Pi_o=10\ 000$ .

$N$  – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки,  $N=510$  аб.

$\Delta N$  – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки;  $\Delta N_1=400$ ,  $\Delta N_2=200$ ,  $\Delta N_3=100$ .

$\Pi_o$  – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;  $\Pi_o=20\ 000$  грн.

$n$  – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки;  $n=3$ .

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість,  $\lambda = 0,8547$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати  $\rho = 0,25$ ;

$v$  – ставка податку на прибуток. У 2012 році  $v = 16\%$ .

До впровадження розробки ціна продукту-аналога складала 20 000 грн з абонента, після впровадження – 30 000 грн. До впровадження проекту кількість абонентів-користувачів складала 510, після впровадження кількість абонентів також збільшиться: протягом першого року – на 400 аб., протягом другого року – ще на 200 аб., протягом третього року – ще на 100 аб.

Потрібно спрогнозувати збільшення чистого прибутку підприємства від впровадження результатів наукової розробки у кожному році відносно базового.

Збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta \Pi_1$  протягом першого року складе:

$$\Delta \Pi_1 = [10000 \cdot 510 + 30000 \cdot 510 + 400] \cdot 0,8547 \cdot 0,25 \cdot \left(1 - \frac{16}{100}\right) = 5815378,8 \text{ (грн)}.$$

Збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta \Pi_2$  протягом другого року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\begin{aligned} \Delta \Pi_2 &= [10000 \cdot 510 + 30000 \cdot (510 + 400 + 200)] \cdot 0,8547 \cdot 0,25 \cdot \left(1 - \frac{16}{100}\right) = \\ &= 6892300,8 \text{ (грн)}. \end{aligned}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta \Pi_3$  протягом третього року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\begin{aligned} \Delta \Pi_3 &= [10000 \cdot 510 + 30000 \cdot (510 + 400 + 200 + 100)] \cdot 0,8547 \cdot 0,25 \cdot \left(1 - \frac{16}{100}\right) = \\ &= 7430761,8 \text{ (грн)}. \end{aligned}$$

#### **5.4 Розрахунок ефективності вкладених коштів та періоду їх окупності**

Основними показниками, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності [36].

*1-й крок.* Розрахуємо теперішню вартість інвестицій PV, що вкладаються в наукову розробку. Такою вартістю ми можемо вважати прогнозовану величину загальних витрат ЗВ на виконання та впровадження результатів



НДДКР, розраховану нами раніше за формулою (5.13), тобто будемо вважати, що  $ЗВ = PV = 384300$  (грн.).

*2-й крок.* Розрахуємо очікуване збільшення прибутку  $\Delta\Pi_i$ , що його отримає підприємство (організація) від впровадження результатів наукової розробки, для кожного із років, починаючи з першого року впровадження. Таке збільшення прибутку також було розраховане нами раніше за формулою 5.14.  $\Delta\Pi_1 = 5815378,8$  (грн.),  $\Delta\Pi_2 = 6892300,8$  (грн.),  $\Delta\Pi_3 = 7430761,8$  (грн.).

*3-й крок.* Для спрощення подальших розрахунків будемо вісь часу, на яку нанесемо всі платежі (інвестиції та прибутки), що мають місце під час виконання науково-дослідної роботи та впровадження її результатів.



Рисунок 5.1 – Вісь часу з фіксацією платежів, що мають місце під час розробки та впровадження результатів НДДКР

*4-й крок.* Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій  $E_{\text{абс.}}$ .

$$E_{\text{абс}} = (\text{ПП} - PV), \quad (5.15)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство (організація) від реалізації результатів наукової розробки, грн.;  
 $PV$  – теперішня вартість інвестицій  $PV = ЗВ$ , грн.

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків ПП розраховується за формулою:

$$ПП = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.16)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн;

$t$  – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,1;

$t$  – період часу (в роках) від моменту отримання чистого прибутку до точки „0”.

$$ПП = \frac{5815378,8}{(1+0,1)^2} + \frac{6892300,8}{(1+0,1)^3} + \frac{7430761,8}{(1+0,1)^4} = 15059696,1(\text{грн}).$$

Підставимо значення у формулу 5.15:

$$E_{\text{абс}} = 15059696,1 - 384300 = 14675396,1.$$

5-й крок. Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій  $E_{\text{в}}$ .

$$E_{\text{в}} = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (5.17)$$

де  $E_{\text{абс}}$  – абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн;  $PV$  – теперішня вартість інвестицій  $PV = 3B$ , грн;  $T_{\text{ж}}$  – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_g = \sqrt[4]{1 + \frac{14675396,1}{384300}} - 1 = 1,502$$

Далі, розрахована величина  $E_B$  порівнюється з мінімальною (бар'єрною) ставкою дисконтування  $\tau_{\text{мін}}$ , яка визначає ту мінімальну дохідність, нижче за яку інвестиції вкладатися не будуть. У загальному вигляді мінімальна (бар'єрна) ставка дисконтування  $\tau_{\text{мін}}$  визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (5.18)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках;  $d = 0,16$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина  $f = 0,07$ .

$$\tau = 0,16 + 0,07 = 0,23.$$

Так як  $E_B > \tau_{\text{мін}}$ , то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

*6-й крок.* Розраховують термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій. Термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій  $T_{\text{ок}}$  можна розрахувати за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B}. \quad (5.19)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{1,502} = 0,66.$$

Так як  $T_{\text{ок}} < 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки є доцільним.

## Висновки до розділу 5

В даній частині магістерської кваліфікаційної роботи виконано обґрунтування економічної доцільності розробки і побудови безпроводної мережі з підвищеною ефективністю технології МІМО стандарту 802.11ac.

В першому підрозділі виконана оцінка комерційного потенціалу розробки. Для проведення технологічного аудиту залучено 3-х незалежних експертів, а оцінювання комерційного потенціалу розробки виконувалось за 12-ю критеріями. Виходячи з даних, розробка забезпечує вище середнього рівня комерційного потенціалу.

В другому підрозділі виконували прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи, який складався з декількох етапів. Загальні витрати на виконання та впровадження результатів наукової роботи склали 38 4300 грн.

У третьому підрозділі кількісно спрогнозували, яку вигоду/зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Для розробки проекту та впровадження результатів розробки необхідно близько 1 року. Позитивний результат прогнозується впродовж 3 років після впровадження проекту, і за рахунок покращених характеристик, технології антени МІМО у порівнянні з аналогами, що існують на ринку, актуальність нова розробка буде мати вже впродовж року.

У четвертому підрозділі виконаний розрахунок ефективності вкладених інвестицій. Так як абсолютна ефективність вкладених інвестицій більша за мінімальну (бар'єрну) ставку дисконтування  $\tau_{\text{мін}}$ , яка визначає ту мінімальну дохідність, нижче за яку інвестиції вкладатися не будуть, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки. Термін окупності є меншим одного року, тому фінансування даної наукової розробки є доцільним.



## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Зменшення імовірності виникнення виробничого травматизму та захворювань при забезпеченні нормованих показників умов праці є основною метою охорони праці.

Незадовільний рівень охорони праці і цивільного захисту може викликати соціально-економічні проблеми працівників та членів їх сімей. Тому соціально-економічне значення охорони праці полягає у: підвищенні продуктивності праці, збільшенні сукупного національного продукту, скороченні виплат за лікарняними та компенсаційних виплат за шкідливі умови праці та інше.

В цьому розділі проводиться аналіз шкідливих, небезпечних і уражаючих для людини та навколишнього довкілля чинників, які виникають під час проведення удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ас. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, розрахунок допустимої сили струму в провіднику (антені), при якій напруженість магнітного поля на робочому місці знаходиться в межах норми, технічні рішення з безпеки під час проведення удосконалення, безпека в надзвичайних ситуаціях.

В процесі удосконалення даного пристрою на працівників впливають ті або інші небезпечні і шкідливі виробничі фактори (НШВФ) фізичної та психофізіологічної груп відповідно до [37].

Фізичні НШВФ: підвищена або понижена температура повітря робочої зони, підвищений рівень шуму на робочому місці, підвищений рівень статичної електрики, недостатність або відсутність природного освітлення, недостатня освітленість робочої зони, відбита або пряма блискучість, підвищена яскравість світла.

Психофізіологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори: нервово-психічні перевантаження: розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження аналізаторів.

## 6.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 6.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Під мікрокліматом виробничих приміщень розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, який визначається діючими на організм людини поєднаннями температури, вологості та швидкості руху повітря, а також інтенсивності теплового випромінювання.

Коли з технічних чи економічних міркувань оптимальні норми не забезпечуються, то встановлюються допустимі величини показників мікроклімату.

Вибираємо для приміщення, в якому проводяться роботи з удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ас, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

Згідно із [38] допустимі параметри мікроклімату у робочій зоні для теплового та холодного періодів року приведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату в приміщенні [38]

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іа	21-25	18-26	75	≤0,1
Теплий	Іа	22-28	20-30	55 при 28°С	0,1-0,2

Розкид значень температури повітря вздовж висоти робочої зони для всіх категорій робіт допускається до 3°C. При опроміненні менше 25% поверхні тіла працівника, нормована інтенсивність теплового опромінення – 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), які використовуються при проектуванні виробничих приміщень (будівель), обладнання, технологічних процесів, вентиляцій, для контролю за якістю виробничого середовища. ГДК шкідливих речовин, які використовуються в даному виробничому приміщенні наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Назва речовини	Параметр	Значення	Клас небезпеки
Пил нетоксичний	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	0,15	4
Іони n <sup>+</sup> , n <sup>-</sup>	число іонів в 1 см <sup>3</sup> повітря	50000	–

Для забезпечення необхідних за нормативами показників мікроклімату і чистоти повітря робочої зони запропоновано:

- 1) в приміщенні повинна бути розміщена система кондиціонування для теплого і опалення для холодного періодів року;
- 2) щоденне вологе прибирання;
- 3) припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

### 6.1.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях значні вимоги висуваються до кількісних та якісних параметрів освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводяться роботи з удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ас, відповідно до [39] знаходимо, що вони відповідають III розряду зорових робіт. Приймаємо



контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд 2.

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості при штучному освітленні наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Нормативні значення КПО та мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізн., мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО, %	
						комбіноване		загальне	Природне освітлення (бокове)	Суміщене освітлення (бокове)
						всього	у т. ч. від загального			
Високої точності	0,3-0,5	III	г	великий	середній	400	200	200	2	1,2

Так як приміщення знаходиться у м. Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а вікна розташовані за азимутом  $180^\circ$ , то за таких умов КЕО розраховується за формулою [39,40]

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (5.1)$$

де  $e_n$  – табличне значення КЕО, %;

$m_N$  – коефіцієнт світлового клімату;

$N$  – номер групи забезпеченості природним світлом.

Підставляючи відомі значення отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N, б} = 2 \cdot 0,85 = 1,7 (\%);$$

$$e_{N, с} = 1,2 \cdot 0,85 = 1,02 (\%).$$

Для забезпечення нормативних значень показників освітлення передбачено такі заходи:

- 1) при недостатньому природному освітлені в світлий час доби доповнення штучним за допомогою газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;
- 2) використання загального штучного освітлення у темний час доби.

### **6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання**

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого устаткування застосовується обладнання, робота якого супроводжується шумом та вібрацією, необхідно передбачити захист від шуму та вібрації.

Визначено, що приміщення, в якому відбувається робота з удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ас може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що створюється електродвигунами системи вентиляції.

З метою запобігання травмуванню працюючих під дією шуму та вібрації вони підпадає під нормування.

Головним нормативом стосовно промислового шуму, діючим на території нашої країни, є [41], у відповідності з яким допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в промислових приміщеннях не повинні перевищувати значень, які приведені в таблиці 5.4.

Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 6.5 для 3-ї категорії (технологічна) типу "в".

Таблиця 6.4 – Нормовані рівні звукового тиску та еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку та еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Таблиця 6.5 – Нормовані рівні віброприскорення [6]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц						Коректовані рівні віброприскорення, дБА
2	4	8	16	31,5	63	
36	33	33	39	45	51	33

З метою покращення віброакустичного клімату в приміщенні запропоновано такі заходи:

- 1) своєчасне проведення профілактичного ремонту;
- 2) проведення контролю рівнів шуму та вібрації.

#### **6.1.4 Виробничі випромінювання**

Аналіз умов праці показав, що приміщення, де виконується робота з удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ас може містити електромагнітні випромінювання.

Гранично допустимі рівні електромагнітних полів показані в таблиці 5.6.

Таблиця 6.6 – Гранично допустимі рівні електромагнітних полів (безперервне випромінювання, амплітудна або кутова модуляція)

Номер діапазону	Метричний розподіл діапазонів	Частоти	Довжина хвиль, $\lambda$	ГДР, В/м
5	Кілометрові хвилі (низькі частоти, НЧ)	30-300 кГц	10-1 км	25
6	Гептаметрові хвилі (середні частоти, СЧ)	0,3-3 МГц	1-0,1 км	15
7	Декаметрові хвилі (високі частоти, ВЧ)	3-30 МГц	100-10 м	$3 \cdot \lg \lambda$
8	Метрові хвилі (дуже високі частоти, ДВЧ)	30-300 МГц	10-1 м	3

Для забезпечення захисту та досягнення нормативних рівнів випромінювань потрібно застосовувати екранні фільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

### 6.1.5 Розрахунок допустимої сили струму в провіднику (антені), при якій напруженість магнітного поля на робочому місці знаходиться в межах норми

Виконати розрахунок допустимої сили струму в провіднику (антені) довжиною  $L = 0,5$  м, при якій напруженість магнітного поля на робочому місці, віддаленому на  $r = 0,18$  м, знаходиться в межах норми.

Біля джерела ЕМВ виділяють ближню зону (зону індукції), що знаходиться на відстані  $r \leq \lambda / 2\pi$ , і далеку зону (зону випромінювання), для якої  $r > \lambda / 2\pi$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі, м.

Допустиму силу струму в провіднику (антені) від джерела магнітного поля для ближньої зони можна визначити з формули

$$H_{bl} = \frac{IL}{4\pi r^2} \text{ [А/м]}, \quad (6.2)$$

звідки

$$I = \frac{4\pi r^2 H_{\text{бл}}}{L} \text{ [A]}, \quad (6.3)$$

де  $H_{\text{бл}}$  – напруженість магнітного поля дальньої зони, А/м;

$r$  – віддаленість робочого місця, м;

$L$  – довжина провідника (антени), м.

Для діапазону частот 0,06...3 МГц  $H_{\text{ГД}} = 50$  А/м.

Підставляючи відомі значення у формулу (5.3), отримаємо:

$$I = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,18^2 \cdot 50}{0,5} = 40,694 \text{ (A)}.$$

## **6.2 Технічні рішення щодо безпеки під час проведення удосконалення технології MIMO в стандарті 802.11 ac**

### **6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць**

Конструкція робочого місця, його розміри та взаємне розташування його елементів мають відповідати антропометричним, психофізіологічним та фізіологічним характеристикам працівника, а також характеру роботи [42].

Площа одного робочого місця повинна становити не менше 6,0 м<sup>2</sup>, об'єм приміщення – не менше ніж 20 м<sup>3</sup>, висота – не менше 3,2 м [8].

Інтер'єр приміщень потрібно оздоблювати дифузно-віддзеркалювальними матеріалами з коефіцієнтом відбиття: стелі 0,7-0,8; стін 0,4-0,5; підлоги 0,2-0,3. Поверхня підлоги повинна бути рівною, не слизькою, без вибоїн, зручною для вологого прибирання, мати антистатичні властивості. Забороняється використовувати під час оснащення інтер'єру полімерні матеріали, що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини.

## **6.2.2 Електробезпека**

Причинами ураження електричним струмом у даному приміщенні можуть бути: робота під напругою під час проведення ремонтних робіт, несправність устаткування, випадковий дотик до металевих частин, що опинилися під напругою або струмоведучих частин.

У відповідності до [43] це приміщення відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через наявність високої (понад 75 %) відносної вологості.

Тому безпека експлуатації електрообладнання має забезпечуватись комплексом заходів, що передбачають використання ізоляції струмовідних елементів, захисних блокувань, захисного заземлення та ін [44].

## **6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях**

### **6.3.1 Пожежна безпека**

#### **6.3.1.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі**

Відповідно до [45] приміщення, в якому проводиться робота з удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ас, відноситься до категорії пожежної небезпеки В, що характеризується наявністю паперу в сухому стані, який використовується під час проведення удосконалення.

Це приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

### 6.3.1.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці 6.7.

В таблиці 6.8 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Вибираємо, що приміщення, де проводиться робота з удосконалення, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [47].

Таблиця 6.7 – Мінімальні межі вогнестійкості приміщення [11]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті кінці	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
2	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	REI 15 M0	R 30 M0

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 –  $M \leq 25$  см – для горизонтальних конструкцій;  $M \leq 40$  см – для вертикальних і похилих конструкцій; M2 –  $M > 25$  см – для горизонтальних конструкцій;  $M > 40$  см – для вертикальних і похилих конструкцій, nn – не нормується.

Таблиця 6.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [12]

Об'єм приміщення, тис. м <sup>3</sup>	Категорія пожежної небезпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, при щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м <sup>2</sup>			Кількість людей на 1 м ширини евакуйованого	Відстань між будівлями та спорудами, м, при ступені їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Максимально допустима площа поверху, м <sup>2</sup> , для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	В	2	100	60	40	110	9	9	12	8	н.о.	н.о.	н.о.

Примітка: н.о. – не обмежується

### 6.3.2 Дія радіації на стійкість роботи об'єктів господарської діяльності

Критерієм стійкості роботи об'єкта в умовах дії радіації може бути допустима доза радіації, яку можуть отримати робітники і службовці за час роботи зміни в конкретних умовах.

Оскільки умови роботи в різних цехах можуть відрізнятись, то при оцінці стійкості розраховуються дози опромінення для кожної групи робітників і службовців, які знаходяться в однакових умовах.

Якщо при цьому з'ясується, що люди можуть отримати дозу опромінення більше допустимої (встановленої), об'єкт вважається нестійким до радіації [48].

### 6.3.3 Визначення області працездатності РЕС приладу в умовах дії іонізуючих випромінювань

Вихідні дані:  $K_{носл} = 5$ ,  $t_n = 1$  год.



Проводимо аналіз і визначаємо радіоелектронні елементи, від яких залежить її функціонування: діоди, резистори, конденсатори, напівпровідники, мікросхеми, інтегральні схеми, діелектрики.

Знаходимо максимально допустимі рівні радіації, при яких в елементах можуть виникнути незворотні зміни [49 Дані заносимо в таблицю 6.9.

Приймемо час закінчення опромінення рівним терміну служби приладу

$$t_k = 5 \text{ (років)} = 43800 \text{ (год)}.$$

Проаналізувавши дані, визначаємо межу стійкості  $P_{zp}$  роботи РЕС, враховуючи коефіцієнт послаблення радіації:

$$P_{zp} = \frac{D_{zpi} K_{носл}}{2(\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})} \text{ [Р/год];} \quad (5.10)$$

$$P_{zp} = \frac{10^4 \cdot 5}{2(\sqrt{43800} - \sqrt{1})} = 120,03 \text{ (Р/год)}.$$

Таблиця 6.9 – Максимально допустимі рівні радіації елементів РЕС

№	Елементи РЕС	$D_{zpi}$ , Р	$D_{zp}$ , Р
1	Діоди	$10^5$	$10^4$
2	Резистори	$10^6$	
3	Конденсатори	$10^6$	
4	Напівпровідники	–	
5	Мікросхеми	$10^4$	
6	Інтегральні схеми	$10^5$	
7	Діелектрики	$10^4$	

Таким чином, область працездатності РЕС приладу в умовах дії іонізуючих випромінювань обмежена рівнем радіації від 0 до 120,03 Р/год.

## **Висновки до розділу 6**

Під час написання цього розділу було розглянуто такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, розрахунок допустимої сили струму в провіднику (антені), при якій напруженість магнітного поля на робочому місці знаходиться в межах норми, технічні рішення з безпеки при проведенні удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ac, безпека у надзвичайних ситуаціях.

## ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі виконаний аналіз та дослідження методів підвищення ефективності технології MIMO в стандарті 802.11ac, а також на основі цієї технології розроблена структурна схема для побудови безпроводної мережі у гуртожитку. В ході роботи дослідили методи, які дозволяють збільшити пропускну здатність і відповідно швидкість передачі інформації в стандарті IEEE 802.11ac. Таким чином це досягається шляхом:

- збільшення смуги пропускання каналу до 80/160 МГц, що дозволяє збільшити в два і чотири рази швидкість передачі порівняно з попереднім стандартом 802.11n;
- збільшення максимального числа потоків (Spatial Streams) до 8, що дозволяє збільшити швидкість передачі інформації вдвічі;
- використання модуляції 256-QAM з ефективністю кодування 3/4 та 5/6, а це в свою чергу дозволяє збільшити швидкість передачі;
- використання MU-MIMO – (Multi-user MIMO – багатокористувацького доступу MIMO) і алгоритму STA (Spanning Tree Algorithm – алгоритму покривного/зв'язуючого дерева мережі) при роботі з однією чи декількома антенами, що дозволяє приймати або передавати одночасно кілька незалежних потоків даних;
- використання SDMA - Space Division Multiple Access - множинного доступу з просторовим розділенням каналів, при якому потоки розділені не за частотою, а в просторі, аналогічно MIMO в стандарті 802.11n
- використання спадного (downlink) потоку MU-MIMO (один передавальний пристрій, кілька приймальних пристроїв) як додаткового.

Крім збільшення швидкості передачі інформації у стандарті 802.11ac існує два ключових поліпшення:

1. Можливість динамічно змінювати діаграму спрямованості антен (Beamforming), що реально для антенної решітки 8 елементами. В ідеалі це означає, що зона покриття точки доступу оптимально підлаштовується під

поточне розташування клієнтів. Технологія «Beamforming» вводиться для досягнення максимального ефекту при використанні технології MU-MIMO.

2. Використання технології MU-MIMO дозволяє в повній мірі задіяти канал зв'язку і забезпечити можливість паралельної роботи декількох клієнтів. В існуючих мережах Wi-Fi зв'язок здійснюється в напів-дуплексному режимі. В той час, як один клієнт передає дані інші можуть тільки приймати сигнал. Пакети передаються послідовно - в один момент часу передається один пакет.

З огляду на вищевведені методи для підвищення ефективності технології MIMO стандарту 802.11ac була спроектована структурна схема для побудови безпроводної мережі у гуртожитку за допомогою технології MU-MIMO та «Beamforming», а також виконувались розрахунки параметрів антени, кількості точок доступу, втрати сигналу, радіусу дії сигналу і швидкості передачі. Розрахунки показали, що необхідне встановлення 2 точок доступу для забезпечення роботи 150 користувачам на 3 поверхах з мінімальною швидкістю 70 Мбіт/с. Тому для 9 поверхів гуртожитку, як і припускалось, вистачить 6 точок доступу. При цьому вибрана точка доступу дозволить передавати дані на відстань 1,522 (км) зі швидкістю 108,864 (Мбіт/с). А результати моделювання показали ефективність використання антени MIMO в порівнянні з антеною SISO.

В економічній частині магістерської кваліфікаційної роботи виконано обґрунтування економічної доцільності розробки і побудови безпроводної мережі з підвищеною ефективністю технології MIMO стандарту 802.11ac. А саме: в першому підрозділі виконана оцінка комерційного потенціалу розробки. Виходячи з розрахунків, розробка забезпечує вище середнього рівня комерційного потенціалу. В другому підрозділі виконували прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи. Загальні витрати на виконання та впровадження результатів наукової роботи склали 38 4300 грн. У третьому підрозділі кількісно спрогнозували, яку вигоду/зиск можна отримати у

майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Для розробки проекту та впровадження результатів розробки необхідно близько 1 року. Позитивний результат прогнозується впродовж 3 років після впровадження проекту, і за рахунок покращених характеристик, технології антени МІМО у порівнянні з аналогами, що існують на ринку, актуальність нова розробка буде мати вже впродовж року. У четвертому підрозділі виконаний розрахунок ефективності вкладених інвестицій. Так як абсолютна ефективність вкладених інвестицій більша за мінімальну (бар'єрну) ставку дисконтування  $\tau_{\text{мін}}$ , яка визначає ту мінімальну дохідність, нижче за яку інвестиції вкладатися не будуть, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки. Термін окупності є меншим одного року, тому фінансування даної наукової розробки є доцільним.

Під час написання розділу з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях було розглянуто такі питання як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, розрахунок допустимої сили струму в провіднику (антені), при якій напруженість магнітного поля на робочому місці знаходиться в межах норми, технічні рішення з безпеки при проведенні удосконалення технології МІМО в стандарті 802.11 ac, безпека у надзвичайних ситуаціях.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. «Системы МІМО: принципы построения и обработка сигналов» / Слюсар В. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, №8, 2005.
2. МІМО - Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/МІМО>. – Назва з екрану.
3. «Широкополосные беспроводные сети передачи информации»/ Вишневикий В.М. [та ін.]. - М.: Техносфера, 2005.592 с.
4. «Беспроводные линии связи и сети» : пер. с англ. / В. Столлингс. - М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.
5. «Современные технологии беспроводной связи»/ Шахнович И. - Изд. второе, М.: Технология, 2006. – 288с.
6. IEEE 802.11 – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](https://uk.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11)
7. IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003), Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Specifications
8. IEEE Std 802.11a-1999 (Reaff 2003), Supplement to IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks— Specific requirements.
9. IEEE Std 802.11b-1999, Supplement to IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan Огляди Вісник Національного технічного університету України "КПІ" 181 Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування.-2010.-№41 area networks— Specific requirements.
10. IEEE Std 802.11g-2004, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements— Specifications.

11. IEEE Std 802.11i-2004, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements
12. «Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11» / Педжман Р., Джонатан Л. - М.: Вильямс, 2004 – 304 с.
13. Основные особенности технологии 802.11ac – Режим доступа: <http://wi-life.ru/stati/wi-fi/tehnicheskie-stati/main-benefits-802-11ac-technology> - Назва з екрану.
14. «Особенности стандарта беспроводной связи IEEE 802.11ac (WiFi)» / Макаренко В. - ЭКИС – Киев: VD MAIS, 2012, № 7.
15. Wi-Fi смуги частот і каналів – Режим доступа: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-frequency-bands-and-channels> – Назва з екрану.
16. Основные особенности – Режим доступа: <http://wifi.kz/articles/osnovnye-osobennosti-802-11ac/> - Назва з екрану.
17. 802.11ac: beamforming и MU-MIMO – Режим доступа: <http://twistedminds.ru/2015/05/802-11ac-beamforming-mu-mimo/> - Назва з екрану.
18. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper – Режим доступа: [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white\\_paper\\_c11-713103.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html) – Назва з екрану.
19. A base station switching on-off algorithm using traditional MIMO and spatial modulation – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6708091/> - Назва з екрану.
20. Свободная энциклопедия «Википедия» – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi> (21.10.2010). – Назва з екрану.
21. Аспекты реализации стандарта IEEE 802.11ac – Режим доступа: <http://asp24.com.ua/blog/aspekty-realizacii-standarta-ieee-802-11ac/> - Назва з екрану.
22. Особенности стандарта беспроводной связи IEEE 802.11ac (Wi-Fi) – Режим доступа: <http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/>

V.Makarenko\_STANDARD%20IEEE%20802.11ac%20%28WiFi%29\_EKIS\_7\_2012-3.pdf – Назва з екрану.

23. « Rayleigh fading Channels in mobile digital communication systems» / B. Sklar. – P. : Prentice-Hall, Sept. 2000. – 146 pp.

24. Ipass wifi-growth-map Режим доступу: <https://www.ipass.com/wifi-growth-map/> - Назва з екрану.

25. MU-MIMO - Режим доступу: [http://habrahabr.ru/post/132247.](http://habrahabr.ru/post/132247/) - Назва з екрану.

26. Пропускная способность MIMO – систем – Режим доступу: <http://siblec.ru/index.php?dn=html&way=bW9kL2h0bWwvY29udGVudC84c2VtLzA3NS8zLTItMi5odG0=> - Назва з екрану.

27. Технология передачи данных MIMO в беспроводных сетях WIFI – Режим доступу: [http://www.getwifi.ru/p\\_mimo.html](http://www.getwifi.ru/p_mimo.html) - Назва з екрану.

28. SU-MIMO vs. MU-MIMO – Режим доступу: <https://blogs.umass.edu/Techbytes/2017/01/19/su-mimo-vs-mu-mimo/> - Назва з екрану.

29. «802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi» / Cisco - Technical White Paper, August 2012.

30. Beamforming in 802.11ac. - Режим доступу: [/http://chimera.labs.oreilly.com/books/123400\\_0001739/ch04.html.](http://chimera.labs.oreilly.com/books/123400_0001739/ch04.html)- Назва з екрану.

31. 802.11ac in - depth. - Режим доступу: [http://standards.ieee.org/news/2014/ieee\\_802\\_11ac\\_ballot.html.](http://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html) - Назва з екрану.

32. Tr link archer c9 – Режим доступу: [https://rozetka.com.ua/tr\\_link\\_archer\\_c9](https://rozetka.com.ua/tr_link_archer_c9) – Назва з екрану.

33. DWS-4026 Режим доступу: [http://www.dlink.ru/ru/products/1/1305\\_b.html](http://www.dlink.ru/ru/products/1/1305_b.html) - Назва з екрану.

34. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. В. О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 22 с.



35. Козловський В. О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2003. – 75 с.
36. Козловський В. О. Економіка, організація виробництва та менеджмент в дипломних роботах. Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 94 с.
37. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
38. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
39. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
40. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
41. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
42. ДСН 3.3.6.039 99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
43. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
44. Методичні вказівки до опрацювання розділу “Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях” в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов’язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
45. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
46. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
47. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об’єктів будівництва.

48. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.

49. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.

50. Сакевич В.Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 109 с.

51. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), МОЗ України. – К., 1997.

52. Бортник Г.Г., Стальченко О.В. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2009.- 54 с.

## ДОДАТКИ