

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ  
Циклова комісія (кафедра) комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему

**ЕВОЛЮЦІЯ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ВІД WI-FI 4 ДО WI-FI 6**

Виконав: студент групи 1К-21

Спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

Антон АНТАШЯН

Керівник:

Павло РАТАЙЧУК

Черкаси 2025

**ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ**

Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітня програма Комп'ютерна інженерія

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри КІ та ІТ

Владислав ХОТУНОВ

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ****НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Анташяну Антону Артуровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи «Еволюція бездротових мереж від Wi-Fi 4 до Wi-Fi 6»

Керівник роботи Ратайчук Павло Єгорович, викладач методист

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» жовтня 2024 року № 68у.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 02.06.2025

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи Проаналізувати еволюцію технологій Wi-Fi, порівняти характеристики Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6, а також оцінити їх вплив на продуктивність та безпеку бездротових мереж.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити)  
Вивчити основи бездротових мереж та історію розвитку стандартів Wi-Fi, розглянути архітектуру та технічні характеристики Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6, провести порівняльний аналіз: максимальна швидкість передачі даних, частотні діапазони, використання смуги пропускання, алгоритми модуляції та ефективність роботи, підтримка багатокористувацьких режимів (MU-MIMO, OFDMA), енергоефективність (TWT – Target Wake Time), захист даних (WPA2, WPA3), виконати експериментальне тестування продуктивності Wi-Fi 4, 5 та 6 у різних умовах (завантаження мережі, відстань, перешкоди), оцінити перспективи розвитку стандартів Wi-Fi 7 та майбутніх бездротових технологій.

5. Дата видачі завдання 16.09.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання з підписами керівника і студента
1	Вступ	14.10.2024	
2	Розділ 1 (ОСНОВИ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ТА СТАНДАРТІВ WI-FI)	9.12.2024	
3	Розділ 2 (АНАЛІЗ СТАНДАРТІВ WI-FI 4 (802.11N), WI-FI 5 (802.11AC) ТА WI-FI 6 (802.11AX))	10.03.2025	
4	Розділ 3 (ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ WI-FI 4, WI-FI 5 ТА WI-FI 6)	28.04.2025	
5	Висновки	12.05.2025	
6	Оформлення кваліфікаційної роботи (чистовий варіант)	26.05.2025	
7	Перевірка кваліфікаційної роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	02.06.2025	
8	Подання кваліфікаційної роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	10.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Антон АНТАШЯН

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Павло РАТАЙЧУК

## АНОТАЦІЯ

У сучасному світі технології бездротового зв'язку стали невід'ємною частиною повсякденного життя. Від звичних смартфонів та планшетів до інтернету речей (IoT) – всі ці технології базуються на бездротових мережах, серед яких Wi-Fi є найпоширенішим і важливим стандартом. Розвиток бездротових технологій, таких як Wi-Fi, значно вплинув на швидкість та ефективність передачі даних у сучасному світі. Вони створили нові можливості для спілкування, роботи, розваг та навчання, зокрема в умовах глобалізації та розвитку цифрових технологій. Підвищена потреба у швидкісному та стабільному зв'язку ставить завдання щодо постійного вдосконалення бездротових стандартів. Зокрема, такі стандарти як Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6 забезпечують нові рівні швидкості та ефективності передачі даних, що стало основою для розвитку інтернет-сервісів і цифрової інфраструктури в цілому.

Розвиток бездротових технологій як основа сучасного зв'язку

Безумовно, бездротові технології забезпечують безперебійний зв'язок та доступ до інформації в будь-якому місці, де є покриття. Починаючи з Wi-Fi 4 (802.11n) і закінчуючи новітнім Wi-Fi 6 (802.11ax), технології бездротового зв'язку постійно розвиваються, відповідаючи на зростаючі вимоги користувачів і підприємств. Поширення смартфонів, планшетів, розумних пристроїв та інших інтернет-з'єднаних об'єктів призводить до значного збільшення навантаження на бездротові мережі. Це потребує постійного оновлення та поліпшення стандартів Wi-Fi, щоб забезпечити високу якість з'єднання в умовах великої кількості користувачів і пристроїв.

Необхідність підвищення швидкості та ефективності Wi-Fi

З кожним роком вимоги до бездротових мереж зростають. Прогресивні користувачі та бізнеси очікують високошвидкісного доступу до Інтернету без затримок і збоїв. Стандарти Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6 відповідають на ці вимоги, забезпечуючи максимальну швидкість передачі даних, покращену стабільність і знижену затримку. Однак збільшення кількості пристроїв, що підключаються до мереж, а також розвиток нових технологій, таких як 4K/8K

відео, доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR), вимагає подальшого вдосконалення існуючих стандартів. Розвиток Wi-Fi 6, в особливості, дозволяє збільшити швидкість та ефективність роботи в умовах високої насиченості мережі, що є важливим аспектом для задоволення потреб користувачів у швидкому та безперервному зв'язку.

#### Вплив стандартів Wi-Fi на цифрову інфраструктуру

Безперебійний і високошвидкісний Wi-Fi зв'язок є основою для розвитку цифрової інфраструктури у багатьох сферах – від освіти та медицини до промисловості та розваг. Зокрема, вдосконалення бездротових мереж дає змогу реалізувати нові можливості для бізнесу та соціальних комунікацій, підвищуючи ефективність організацій та забезпечуючи доступ до послуг у віддалених та сільських районах. Сучасні стандарти Wi-Fi, такі як Wi-Fi 6, дозволяють підключати більшу кількість пристроїв, що важливо для IoT, «розумних» будинків, промислових систем і міських інфраструктур. Інтернет речей, автоматизація та цифровізація виробництва неможливі без надійних і швидких бездротових з'єднань. Тому важливим аспектом є вплив новітніх стандартів Wi-Fi на розвиток технологічної інфраструктури, забезпечуючи базу для інновацій та трансформацій в різних галузях економіки. Таким чином, актуальність дослідження еволюції бездротових мереж, від Wi-Fi 4 до Wi-Fi 6, полягає в потребі забезпечити високоякісне підключення та ефективне використання наявних ресурсів, а також у сприянні розвитку інфраструктури, яка відповідає вимогам сучасного цифрового світу

## ABSTRACT

In the modern world, wireless communication technologies have become an integral part of everyday life. From familiar smartphones and tablets to the Internet of Things (IoT) - all these technologies are based on wireless networks, among which Wi-Fi is the most common and important standard. The development of wireless technologies, such as Wi-Fi, has significantly influenced the speed and efficiency of data transmission in the modern world. They have created new opportunities for communication, work, entertainment and learning, especially in the context of globalization and the development of digital technologies. The increased need for high-speed and stable communication poses the task of constantly improving wireless standards. In particular, standards such as Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 and Wi-Fi 6 provide new levels of speed and efficiency of data transmission, which has become the basis for the development of Internet services and digital infrastructure in general.

The development of wireless technologies as the basis of modern communication

Undoubtedly, wireless technologies provide uninterrupted communication and access to information in any place where there is coverage. Starting with Wi-Fi 4 (802.11n) and ending with the latest Wi-Fi 6 (802.11ax), wireless communication technologies are constantly evolving, responding to the growing demands of users and enterprises. The spread of smartphones, tablets, smart devices and other Internet-connected objects leads to a significant increase in the load on wireless networks. This requires constant updating and improvement of Wi-Fi standards to ensure high-quality connections in conditions of a large number of users and devices.

The need to increase the speed and efficiency of Wi-Fi

Every year, the requirements for wireless networks are increasing. Progressive users and businesses expect high-speed Internet access without delays and failures. Wi-Fi 4, Wi-Fi 5, and Wi-Fi 6 standards address these requirements by delivering maximum data rates, improved stability, and reduced latency. However, the increasing number of devices connected to networks, as well as the development of new technologies such as 4K/8K video, augmented reality (AR), and virtual reality

(VR), require further improvements to existing standards. The development of Wi-Fi 6, in particular, allows for increased speed and efficiency in conditions of high network saturation, which is an important aspect to meet user needs for fast and uninterrupted communication.

#### Impact of Wi-Fi standards on digital infrastructure

Uninterrupted and high-speed Wi-Fi communication is the basis for the development of digital infrastructure in many areas - from education and medicine to industry and entertainment. In particular, the improvement of wireless networks allows for new opportunities for business and social communications, increasing the efficiency of organizations and providing access to services in remote and rural areas. Modern Wi-Fi standards, such as Wi-Fi 6, allow for the connection of a larger number of devices, which is important for IoT, smart homes, industrial systems and urban infrastructures. The Internet of Things, automation and digitalization of production are impossible without reliable and fast wireless connections. Therefore, an important aspect is the impact of the latest Wi-Fi standards on the development of technological infrastructure, providing a basis for innovation and transformation in various sectors of the economy.

Thus, the relevance of studying the evolution of wireless networks, from Wi-Fi 4 to Wi-Fi 6, lies in the need to ensure high-quality connectivity and efficient use of available resources, as well as in promoting the development of infrastructure that meets the requirements of the modern digital world

## ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ РОЗВИТКУ WIFI.....	12
1.1 Необхідність підвищення швидкості та ефективності Wi-FiРозвиток бездротових технологій як основа сучасного зв'язку .....	Ошибка! Закладка не определена.
1.2 Вплив стандартів Wi-Fi на цифрову інфраструктуру ...	Ошибка! Закладка не определена.
1.3 Сфери застосування .....	15
1.4 Історія розвитку стандартів .....	Ошибка! Закладка не определена.
1.5 Архітектура бездротових мереж .....	Ошибка! Закладка не определена.
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СТАНДАРТІВ WI-FI 4 (802.11N), WI-FI 5 (802.11AC) ТА WI-FI 6 (802.11AX) .....	20
2.1 Методи дослідження.....	20
2.2 Протоколи та технології взаємодії хмарних сервісів з мережами .....	21
2.3 Використання SD-WAN, VPN та MPLS у хмарній інфраструктурі .....	22
2.4 Використання 5G, Edge Computing та Fog Computing у хмарних середовищах.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.5 Методи захисту даних у хмарних середовищах .....	Ошибка! Закладка не определена.
2.6 Використання криптографії та шифрування для захисту хмарних сервісів	Ошибка! Закладка не определена.
2.7 Політики безпеки та відповідність стандартам (ISO/IEC 27017, NIST, GDPR).....	Ошибка! Закладка не определена.
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ІНТЕГРАЦІЇ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ З КОМП'ЮТЕРНИМИ МЕРЕЖАМИ .....	27
3.1 Вибір інструментів для моделювання (Cisco Packet Tracer, GNS3, EVE-NG, AWS CloudFormation) .....	27

3.2	Проектування мережевої інфраструктури для інтеграції з хмарними сервісами .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.3	Аналіз продуктивності мережі при використанні хмарних технологій	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.4	Оптимізація роботи мереж при взаємодії з хмарними сервісами..	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.5	Оцінка ефективності впроваджених рішень .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
	ВИСНОВОК.....	35
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37

## ВСТУП

**Актуальність обраної теми** зумовлена стрімким зростанням обсягів цифрового трафіку, широким впровадженням концепції Інтернету речей, збільшенням кількості мобільних пристроїв і зростаючими вимогами до якості сервісу в бездротових середовищах. Сучасна інформаційна інфраструктура орієнтована на забезпечення високої швидкості, низької затримки, енергоефективності та надійності з'єднання, що особливо критично у контексті хмарних обчислень, відеоконференцій, стримінгових сервісів, промислових бездротових мереж і систем розумного міста. Wi-Fi 4, будучи першим широкомасштабно впровадженим стандартом з підтримкою MIMO, відкрив нову еру ефективної передачі даних, однак виявився обмеженим у сценаріях із високою щільністю користувачів. Перехід до Wi-Fi 5 забезпечив підвищення пропускної здатності, однак не розв'язав повною мірою проблеми конкуренції за ресурси в багатокористувацьких системах. Саме Wi-Fi 6, як технологія нового покоління, відповідає вимогам часу, завдяки інтеграції OFDMA, MU-MIMO, механізмів керування енергоспоживанням та покращеної ефективності спектру, що дає змогу забезпечити стабільну роботу мереж у складних умовах. Тому вивчення етапів розвитку стандартів Wi-Fi та їх архітектурних змін має ключове значення для розуміння тенденцій у сфері телекомунікацій і формування підходів до побудови сучасних бездротових інфраструктур.

**Метою роботи** є систематизований аналіз еволюції бездротових мереж на основі стандартів Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6 з акцентом на технологічні зміни в архітектурі, механізмах доступу до середовища, пропускній здатності, енергоефективності та здатності до масштабування в умовах підвищеної щільності підключень. Дослідження спрямоване на виявлення ключових переваг і обмежень кожного покоління Wi-Fi у контексті сучасних викликів цифрової трансформації, зокрема необхідності забезпечення надійного та високошвидкісного бездротового зв'язку в середовищах з великою кількістю користувачів та інтелектуальних пристроїв. Робота покликана поглибити

розуміння принципів функціонування стандартів Wi-Fi та їхнього впливу на побудову ефективної телекомунікаційної інфраструктури наступного покоління.

**Об'єкт дослідження** є бездротові локальні мережі, що функціонують на основі стандартів IEEE 802.11, зокрема технології Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6, які забезпечують передачу даних у середовищі з використанням радіочастотного спектру. У фокусі уваги перебуває їхня функціональна структура, принципи організації доступу до середовища, архітектурні особливості, а також зміни, що відбулися в процесі еволюції стандартів з метою підвищення ефективності, продуктивності та масштабованості бездротових мереж.

**Предмет дослідження** є технологічні засади, архітектурні рішення та принципи функціонування стандартів Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 і Wi-Fi 6, а також методи оптимізації передачі даних у бездротових мережах з урахуванням змін у механізмах доступу до середовища, модуляції, багатокористувацького обслуговування та енергоефективності. Аналізується вплив цих змін на якість обслуговування, продуктивність і здатність мереж до адаптації в умовах зростання навантаження та щільності підключень.

**Методами дослідження** є аналіз науково-технічної літератури та нормативної документації стандартів IEEE 802.11n, 802.11ac та 802.11ax, порівняльний аналіз технічних характеристик і архітектурних особливостей відповідних версій Wi-Fi, метод систематизації для узагальнення еволюційних змін у функціональних параметрах бездротових мереж, а також моделювання сценаріїв застосування з метою виявлення практичних переваг новітніх технологій у різних умовах експлуатації.

**Структура роботи** включає вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел і додатки.

## РОЗДІЛ 1

### ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ РОЗВИТКУ СТАНДАРТІВ WI-FI

#### 1.1 Необхідність підвищення швидкості та ефективності Wi-Fi Розвиток бездротових технологій як основа сучасного зв'язку

Бездротові технології стали невід'ємною частиною цифрової епохи, у якій ми живемо. Їхній вплив охоплює практично всі аспекти людської діяльності — від особистого користування смартфоном до управління мегаполісами та промисловими об'єктами. Вони забезпечують не лише комфорт, а й відкривають шлях до принципово нових моделей комунікації, взаємодії та організації життя. Завдяки ним людство отримало змогу розвивати гнучкі, адаптивні системи, які здатні оперативно реагувати на виклики часу — пандемії, зміни клімату, соціальні та економічні трансформації.

Подальше вдосконалення бездротових технологій, зокрема перехід до шостої генерації зв'язку (6G), обіцяє ще більше: надшвидкісний інтернет, повну автоматизацію, розумні середовища, що самі приймають рішення на основі аналізу великих даних. Це не лише нові технічні можливості, а й серйозний виклик — зокрема в питаннях етики, кібербезпеки та екологічної стійкості. Проте вже зараз очевидно: бездротовий зв'язок — це не просто зручність, а ключова технологічна платформа, яка формує обличчя майбутнього.

У сучасному цифровому суспільстві бездротові технології стали фундаментом глобального інформаційного обміну, охоплюючи всі сфери життя — від особистого спілкування до високотехнологічного виробництва. Розвиток стандартів Wi-Fi, мобільного зв'язку (3G, 4G, 5G) і технологій ближнього поля (Bluetooth, NFC) забезпечив користувачам і бізнесу безперервний, зручний та швидкий доступ до мережевих ресурсів. Така еволюція бездротового зв'язку стала рушієм для хмарних сервісів, дистанційного навчання, цифрової медицини, автоматизації виробництва та появи Інтернету речей (IoT). Завдяки

цьому будь-який пристрій — від смартфона до промислового сенсора — здатен обмінюватися інформацією у реальному часі, що раніше було технічно неможливо або надто дорогим.

Останні покоління бездротових технологій, зокрема Wi-Fi 6 та 5G, орієнтовані на підвищення пропускної здатності, зменшення затримок, енергоефективність та надійність зв'язку в умовах високої щільності підключень. Це дозволяє підтримувати стабільну роботу в середовищах з великою кількістю пристроїв — у сучасних офісах, кампусах, стадіонах, торговельних центрах. Одночасно виникають нові виклики: потреба в стандартизації, безпека переданих даних, захист від кібератак, зменшення електромагнітного навантаження. Проте розвиток таких технологій є критично важливим для підтримки «розумних» міст, логістики, енергетичних мереж, систем громадської безпеки, де затримка навіть у кілька мілісекунд може вплинути на ефективність або безпеку процесу.

Таким чином, бездротові технології стали не просто засобом комунікації, а основою нової ери — ери тотального підключення. Вони сприяють демократизації доступу до знань, підвищують мобільність суспільства, створюють умови для інновацій і глобального цифрового розвитку. У найближчі роки ми спостерігатимемо ще стрімкіші зміни: впровадження Wi-Fi 7, 6G, супутникових систем нового покоління. Саме на основі надійного та розумного бездротового зв'язку будується сучасна інфраструктура, яка дозволяє суспільству адаптуватися до викликів майбутнього, реагувати на кризи, підвищувати ефективність управління та впроваджувати нові технології у всі сфери життя.

Конкуренція з мобільними мережами 5G. Для того, щоб Wi-Fi залишався конкурентоздатним рішенням, він має відповідати високим стандартам швидкості, надійності та енергозбереження.

Саме тому з'являються нові покоління Wi-Fi, зокрема Wi-Fi 6 (802.11ax) і Wi-Fi 7 (802.11be), які спрямовані на підвищення пропускної здатності, зменшення затримок, кращу роботу у перевантажених мережах,

енергоефективність при підключенні великої кількості пристроїв.

Удосконалення Wi-Fi — це не просто питання зручності користувачів, а ключовий фактор підтримки цифрових екосистем, «розумного» міста, промислової автоматизації та розвитку майбутніх технологій зв'язку.

## **1.2 Вплив стандартів Wi-Fi на цифрову інфраструктуру**

Стандарти Wi-Fi мають визначальний вплив на розвиток та ефективність цифрової інфраструктури, яка охоплює як персональні пристрої, так і складні системи зв'язку в міському, промисловому та національному масштабах. Кожне нове покоління стандарту Wi-Fi визначає новий рівень можливостей бездротової комунікації, сприяючи впровадженню інноваційних сервісів та розширенню функціональності інфраструктурних рішень.

Основні напрями впливу стандартів Wi-Fi.

Підвищення якості послуг (QoS). Нові стандарти Wi-Fi (особливо Wi-Fi 6 і Wi-Fi 6E) забезпечують вищу пропускну здатність, менші затримки та стабільне підключення, що критично важливо для відеоконференцій, хмарних сервісів, онлайн-освіти, телемедицини.

Оптимізація навантаження в мережах. Сучасні стандарти дозволяють ефективно керувати великою кількістю пристроїв у мережі. Завдяки технологіям MU-MIMO, OFDMA та BSS Coloring зменшується кількість конфліктів у передачі даних, особливо в густонаселених середовищах.

Розвиток «розумних» середовищ. Надійний Wi-Fi є критично важливим компонентом для функціонування систем "розумного будинку", "розумного міста", автоматизованих будівель і транспортної інфраструктури, де тисячі пристроїв передають дані в режимі реального часу.

Підтримка IoT і промислової автоматизації. Стандарти Wi-Fi нового покоління дозволяють бездротове підключення датчиків, камер, машин і роботизованих систем, що є основою концепцій Індустрії 4.0 та промислового IoT.

Зменшення залежності від дротових рішень. Завдяки високій швидкості передачі даних та надійності Wi-Fi, організації дедалі частіше відмовляються

від кабельних мереж, знижуючи витрати на інфраструктуру та забезпечуючи більшу гнучкість при переплануванні або розширенні офісів, кампусів, виробничих майданчиків.

Приклади впливу в реальному житті. Університети впроваджують Wi-Fi 6 для одночасного обслуговування тисяч студентів із мінімальними затримками.

У торгових центрах Wi-Fi використовується не лише для інтернет-доступу, а й для аналітики поведінки відвідувачів.

У транспортній інфраструктурі (аеропорти, вокзали) Wi-Fi дозволяє працювати сервісам навігації, розумним табло, мобільним додаткам.

### **1.3 Сфери застосування**

З кожним новим поколінням стандарту Wi-Fi розширюються можливості його практичного застосування. Покращення швидкості, зниження затримки, збільшення кількості підтримуваних пристроїв та підвищення енергоефективності дозволяють впроваджувати бездротові технології в нові сфери. Розглянемо ключові напрямки використання Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 і Wi-Fi 6:

Побут та особисте використання. Wi-Fi 4 був широко розповсюджений у домашніх умовах: підключення ноутбуків, смартфонів, телевізорів до Інтернету. З появою Wi-Fi 5 зросла якість потокового відео (4K), онлайн-ігор і відеозв'язку. Wi-Fi 6 забезпечив ще більшу стабільність, особливо в багатоповерхових будинках і великих квартирах, де багато пристроїв використовують мережу одночасно.

Освіта. Сучасні навчальні заклади активно використовують електронні ресурси, хмарні сервіси та платформи дистанційного навчання. Wi-Fi 6 особливо важливий для шкіл, коледжів і університетів з великою кількістю студентів, які одночасно підключаються до мережі.

Бізнес та офісні приміщення. Wi-Fi 5 став стандартом для офісів завдяки високій швидкості та стабільності з'єднання. У великих open-space

приміщеннях або під час конференцій із багатьма підключеннями переваги Wi-Fi 6 (MU-MIMO, OFDMA) забезпечують якісний зв'язок навіть при великому навантаженні.

Промисловість та виробництво (Industrial IoT). У промислових умовах потрібна висока надійність зв'язку між сенсорами, контролерами та аналітичними системами. Wi-Fi 6 підходить для «розумного» виробництва (Smart Manufacturing), де одночасно працюють десятки або сотні пристроїв, а затримка має бути мінімальною.

Охорона здоров'я. Медичні заклади використовують Wi-Fi для передачі даних з медичних приладів, телемедицини та систем моніторингу пацієнтів у реальному часі. Завдяки низькій затримці та високій пропускну здатності Wi-Fi 6 забезпечує швидкий доступ до діагностичних зображень, електронних карток пацієнтів та підтримку життєво важливих систем.

Транспорт та логістика. У сучасних аеропортах, вокзалах і логістичних центрах використовуються Wi-Fi-мережі для обміну інформацією, управління вантажами, обслуговування клієнтів і систем контролю. Wi-Fi 6 підвищує ефективність в умовах високого трафіку.

Муніципальна інфраструктура та розумні міста. В рамках концепції Smart City Wi-Fi мережі використовуються для управління вуличним освітленням, відеоспостереженням, громадським транспортом, екологічним моніторингом тощо. Завдяки підвищеній надійності та масштабованості Wi-Fi 6 краще підходить для таких завдань.

#### **1.4 Історія розвитку стандартів**

Еволюція бездротових мереж від Wi-Fi 4 до Wi-Fi 6 зумовлена стрімким розвитком цифрових технологій, зростанням кількості підключених пристроїв, а також потребою в підвищенні пропускну здатності, ефективності та стабільності з'єднання. Основним поштовхом до переходу від Wi-Fi 4 (IEEE

802.11n) до новіших стандартів стала недостатня продуктивність мереж у середовищах з високою щільністю користувачів, таких як офіси, аеропорти, освітні установи або смарт-доми.

Wi-Fi 4, що був стандартизований у 2009 році, запровадив підтримку множинного прийому та передавання (MIMO), що дозволило значно підвищити швидкість порівняно з попередніми версіями. Проте з подальшим зростанням кількості мобільних пристроїв і обсягів переданого трафіку ця технологія виявилася недостатньо гнучкою та масштабованою. У відповідь на ці виклики з'явився Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac), який запровадив використання ширших каналів (до 160 МГц), більш високої модуляції (256-QAM) та покращеної обробки MIMO. Однак навіть ці вдосконалення не забезпечували належного рівня ефективності в умовах навантажених мереж.

Подальший перехід до Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) був викликаний необхідністю не лише підвищення швидкості, але й оптимізації використання спектру в багатокористувацькому середовищі. Застосування технологій OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) та MU-MIMO (Multi-User MIMO) в uplink і downlink дозволило суттєво покращити здатність мережі обслуговувати одночасно велику кількість пристроїв. Крім того, Wi-Fi 6 запроваджує функцію таргетованого пробудження пристроїв (Target Wake Time), що підвищує енергоефективність, особливо для пристроїв Інтернету речей.

Таким чином, еволюція Wi-Fi від версії 4 до версії 6 є результатом комплексної технологічної трансформації, що відповідає сучасним вимогам до бездротових мереж у контексті цифровізації, автоматизації та зростання кількості підключених об'єктів у рамках концепції Інтернету речей.

## **1.5 Архітектура бездротових мереж**

Архітектура бездротових мереж у період еволюції від Wi-Fi 4 до Wi-Fi 6 зазнала суттєвих змін, що відображають поступову адаптацію до зростаючих

вимог сучасних комунікаційних систем. У своїй основі архітектура залишалась ієрархічною та ґрунтувалася на моделі клієнт-сервер, де точка доступу (AP) виступає центральним елементом, який забезпечує зв'язок між клієнтськими пристроями та дротовою мережею. Водночас, з розвитком стандартів змінювались внутрішні механізми доступу до середовища, методи модуляції, а також моделі взаємодії між клієнтами та інфраструктурою.

На етапі Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n) архітектура вперше отримала підтримку просторового мультиплексування завдяки технології MIMO (Multiple Input Multiple Output), що дозволило точці доступу одночасно працювати з кількома потоками даних. Це значно підвищило теоретичну пропускну здатність, однак зв'язок залишався в основному одноюзерним – пристрій обслуговувався по черзі, що обмежувало ефективність у багатокористувацькому середовищі.

Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) зберіг подібну архітектурну основу, однак запровадив удосконалення у вигляді розширених каналів (до 160 МГц), вищих схем модуляції (256-QAM) та підтримки технології downlink MU-MIMO, яка вперше дала змогу точці доступу паралельно передавати дані декільком клієнтам. Це розширило функціональні можливості інфраструктури без змін у її базовій логіці, однак залишило uplink MU-MIMO та розподіл ресурсу між клієнтами на примітивному рівні.

Із впровадженням Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) архітектура набула принципово нових рис, орієнтованих на масовий, щільний та динамічний трафік. Основною трансформацією стало впровадження OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), що дозволило точці доступу логічно поділяти канал на менші підканали та динамічно розподіляти їх між пристроями, знижуючи затримки та підвищуючи ефективність. Крім того, Wi-Fi 6 реалізував повноцінну підтримку MU-MIMO як у напрямку передавання, так і в прийомі (uplink), що забезпечило симетричний мультикористувацький доступ. Удосконалена архітектура також включає механізми управління енергоспоживанням, такі як Target Wake Time (TWT), що дозволяє точці

доступу планувати активність пристроїв і мінімізувати колізії у середовищі з великою кількістю клієнтів.

Таким чином, архітектура бездротових мереж у період від Wi-Fi 4 до Wi-Fi 6 демонструє поступовий перехід від базових схем обміну до адаптивних, масштабованих і контекстно-чутливих структур, які здатні ефективно функціонувати в умовах високого навантаження, підвищеної мобільності користувачів і різноманітності трафіку.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ СТАНДАРТІВ WI-FI 4 (802.11N), WI-FI 5 (802.11AC) ТА WI-FI 6 (802.11AX).

#### 2.1 Методи дослідження

У дослідженні еволюції бездротових мереж від Wi-Fi 4 до Wi-Fi 6 можуть застосовуватись такі основні методи:

1. Аналіз літературних джерел — вивчення наукових статей, технічної документації, стандартів IEEE (802.11n, 802.11ac, 802.11ax) з метою виявлення особливостей кожної версії Wi-Fi.

2. Порівняльний аналіз — зіставлення характеристик Wi-Fi 4, 5 і 6 за такими критеріями, як швидкість передачі, модуляція, використання частотного спектру, підтримка MU-MIMO, OFDMA, ефективність у багатокористувацькому середовищі тощо.

3. Метод систематизації — узагальнення інформації для виявлення тенденцій розвитку бездротових технологій та формування висновків щодо їх впливу на архітектуру мереж.

4. Експертна оцінка — використання висновків фахівців галузі, включно з аналітиками IEEE, розробниками обладнання та дослідниками, для підтвердження переваг нових технологій.

5. Моделювання та емуляція — створення моделей роботи бездротових мереж у середовищах з різною щільністю трафіку (в інструментах типу Cisco Packet Tracer, GNS3 або MATLAB) з метою аналізу продуктивності та стабільності стандартів.

6. Статистичний аналіз — обробка емпіричних даних, отриманих у ході тестування реальних мереж або на основі відкритих джерел, для кількісного порівняння продуктивності різних версій Wi-Fi.

Ці методи у поєднанні забезпечують повноцінне дослідження технічної еволюції, архітектурних змін і практичного значення бездротових технологій у сучасних телекомунікаційних системах.

## 2.2 Аналіз технічної літератури

Для теоретичного обґрунтування дослідження було проведено детальний аналіз технічної літератури, що охоплює сучасні стандарти бездротового зв'язку Wi-Fi, їхні технічні характеристики, а також сфери застосування та перспективи розвитку. У ході аналізу було вивчено наукові статті, стандарти IEEE (зокрема 802.11n, 802.11ac, 802.11ax), технічні звіти провідних виробників мережевого обладнання (Cisco, TP-Link, Intel), а також огляди і дослідження, опубліковані у фахових журналах і на конференціях.

Аналіз літературних джерел дав змогу систематизувати знання про основні технології, які впроваджені у Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6, виявити їхні переваги і обмеження. Особливу увагу було приділено нововведенням Wi-Fi 6, таким як OFDMA, MU-MIMO, BSS Coloring, які значно підвищують ефективність роботи мережі в умовах високої щільності користувачів. Також було досліджено питання енергозбереження в нових стандартах, що є актуальним для розвитку Інтернету речей (IoT).

Крім того, огляд включав аналіз проблем безпеки бездротових мереж, зокрема впровадження сучасних протоколів шифрування, таких як WPA3, що забезпечують надійний захист інформації в умовах збільшення кількості підключених пристроїв.

Результати аналізу технічної літератури стали теоретичною основою для подальших експериментальних досліджень, а також для порівняльного аналізу продуктивності різних стандартів Wi-Fi

У процесі інтеграції хмарних технологій у традиційну мережеву інфраструктуру важливу роль відіграють протоколи та технології, які забезпечують стабільну, безпечну і масштабовану взаємодію між локальними мережами, користувачами та хмарними середовищами. Оскільки хмара — це розподілене середовище з численними сервісами, її ефективне функціонування можливе лише за наявності налагоджених мережевих механізмів обміну даними, маршрутизації, тунелювання, шифрування тощо.

### **2.3 Практичне тестування мереж Wi-Fi**

Практичне тестування було проведено для перевірки теоретичних положень та оцінки продуктивності бездротових мереж різних стандартів Wi-Fi — Wi-Fi 4 (802.11n), Wi-Fi 5 (802.11ac) та Wi-Fi 6 (802.11ax). Метою тестування було отримання емпіричних даних про швидкість передачі даних, стабільність з'єднання, затримки та якість сигналу в різних умовах експлуатації.

Для проведення тестів було використано сучасне мережеве обладнання, що підтримує відповідні стандарти, а також клієнтські пристрої з адаптерами Wi-Fi 6. Тестування виконувалося в контрольованому середовищі, яке імітувало типові умови домашніх та офісних мереж з наявністю фізичних перешкод — стін, меблів та інших джерел інтерференції.

Вимірювання проводилися на різних відстанях від джерела сигналу (1 м, 5 м, 10 м, 15 м), а також з урахуванням кількості підключених пристроїв для оцінки впливу навантаження на продуктивність мережі. Для збору даних використовувалися спеціалізовані програми та сервіси (Speedtest, iPerf), що дозволили отримати точні показники швидкості завантаження і відвантаження, рівня затримок (ping) та втрат пакетів.

### **2.4 Характеристики Wi-Fi 4 (802.11n)**

Wi-Fi 4, що відповідає стандарту IEEE 802.11n, став важливим етапом у розвитку бездротових мереж і першим з-поміж стандартів Wi-Fi, який запровадив підтримку багатопотокової передачі даних за допомогою технології MIMO (Multiple Input Multiple Output). Технічною особливістю Wi-Fi 4 стало поєднання фізичного та канального рівнів, оптимізованих для підвищення ефективності пропускної здатності та збільшення надійності передавання даних у середовищах із перешкодами.

Стандарт працює в двох частотних діапазонах — 2,4 ГГц та 5 ГГц, що

забезпечує більшу гнучкість у плануванні бездротового покриття, а також зменшення рівня перешкод завдяки менш завантаженому діапазону 5 ГГц. Максимальна теоретична швидкість передавання даних у Wi-Fi 4 досягає 600 Мбіт/с, що є результатом використання ширших каналів (до 40 МГц), вдосконалених методів модуляції та агрегації кадрів.

Важливою інновацією Wi-Fi 4 стала реалізація MIMO, яка передбачає використання кількох передавачів і приймачів для просторового мультиплексування, що дозволяє одночасно передавати кілька потоків даних, підвищуючи ефективність використання спектра та покращуючи якість сигналу за рахунок зменшення впливу багатопроменевого поширення. Усе це зробило Wi-Fi 4 значним кроком уперед порівняно з попередніми стандартами, заклавши основу для подальшої еволюції бездротових технологій.

## **2.5 Характеристики Wi-Fi 5 (802.11ac)**

Wi-Fi 5, що відповідає стандарту IEEE 802.11ac, став логічним продовженням розвитку бездротових технологій після Wi-Fi 4 і запровадив низку ключових технічних удосконалень, спрямованих на підвищення швидкодії, стабільності та ефективності роботи мереж у середовищах із високим навантаженням. Основною відмінністю Wi-Fi 5 є повна орієнтація на роботу в діапазоні 5 ГГц, що дозволяє мінімізувати перешкоди, спричинені перенасиченням спектра у діапазоні 2,4 ГГц, і забезпечити стабільніший рівень сигналу в умовах багатокористувацького доступу.

Значним технічним досягненням стало використання широких каналів зв'язку – 80 МГц як базовий варіант і 160 МГц як розширений, що дало змогу істотно збільшити пропускну здатність мережі та досягти пікових швидкостей до 6,9 Гбіт/с у багатопотоковому режимі.

Водночас було вдосконалено схему модуляції за рахунок застосування 256-QAM, що підвищує щільність передачі інформації в одиниці спектра. Одним із ключових нововведень стала технологія спрямованого формування променя (beamforming), яка забезпечує активне фокусування радіосигналу в

напрямку клієнтського пристрою. Завдяки цьому істотно підвищується якість прийому сигналу, знижується рівень втрат при передачі та покращується робота мережі в умовах складної радіообстановки. Усі ці вдосконалення роблять Wi-Fi 5 ефективним стандартом для мультимедійного контенту, хмарних сервісів і інтенсивного використання бездротового зв'язку в корпоративних і домашніх мережах.

## **2.6 Характеристики Wi-Fi 6 (802.11ax)**

Wi-Fi 6, що відповідає стандарту IEEE 802.11ax, став революційним кроком у розвитку бездротових мереж, запропонувавши вдосконалення, орієнтовані на продуктивність, ефективність і надійність зв'язку в умовах зростаючого навантаження та високої щільності клієнтів. На відміну від Wi-Fi 5, який переважно підвищував швидкість передачі, Wi-Fi 6 спрямований на оптимізацію роботи в багатокористувацьких середовищах за рахунок вдосконаленого управління ресурсами спектра. Однією з ключових технологій є OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), що дозволяє поділити канал на менші підканали (ресурсні блоки) і обслуговувати декількох клієнтів одночасно навіть за наявності невеликих обсягів даних, що істотно зменшує затримки та підвищує загальну ефективність.

На відміну від попередніх стандартів, де технологія MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) підтримувалась лише для downlink, у Wi-Fi 6 вона реалізована як для downlink, так і для uplink, що дає змогу одночасно передавати та приймати дані між точкою доступу та кількома пристроями, забезпечуючи рівномірне навантаження та більш стабільну якість сервісу. Для підвищення енергоефективності впроваджено механізм Target Wake Time (TWT), який дозволяє пристроям домовлятися із точкою доступу про точний час виходу з режиму сну, зменшуючи непотрібні періоди активності та подовжуючи термін роботи акумуляторів.

Крім того, Wi-Fi 6 вперше інтегрує підвищені вимоги до безпеки, зокрема обов'язкову підтримку протоколу WPA3, що забезпечує покращений захист від

атак перебору паролів та вдосконалене шифрування персональних і корпоративних мереж. У сукупності ці характеристики роблять Wi-Fi 6 надзвичайно ефективним рішенням для інфраструктури Інтернету речей, розумних будівель, промислових середовищ та цифрових кампусів.

## 2.7 Порівняння продуктивності

Порівняння продуктивності стандартів Wi-Fi 4 (802.11n), Wi-Fi 5 (802.11ac) та Wi-Fi 6 (802.11ax) демонструє суттєвий прогрес у швидкості, ефективності використання спектра та здатності працювати в умовах великої кількості пристроїв. Максимальні швидкості передачі даних для Wi-Fi 4 досягають 600 Мбіт/с завдяки використанню MIMO та каналів шириною до 40 МГц. У Wi-Fi 5 ці показники значно зростають: завдяки підтримці 256-QAM, більшій кількості просторових потоків та каналів шириною 80 і 160 МГц максимальна швидкість може сягати 6,9 Гбіт/с у багатопотоковому режимі. Wi-Fi 6, попри схожі пікові швидкості (до 9,6 Гбіт/с), робить акцент не лише на швидкості, а й на оптимізацію використання смуги пропускання. Стандарт використовує розширені можливості модуляції (1024-QAM) та впроваджує технологію OFDMA, яка забезпечує ефективне розділення каналу між багатьма користувачами навіть при вузьких обсягах переданих даних.

У сфері використання смуги пропускання спостерігається послідовне розширення можливостей: Wi-Fi 4 підтримує до 40 МГц, Wi-Fi 5 – до 160 МГц, а Wi-Fi 6, попри аналогічну ширину, реалізує ефективніше управління ресурсами спектра завдяки гнучкому розподілу підканалів, що дозволяє одночасно обслуговувати більше пристроїв. У багатокористувацькому середовищі Wi-Fi 4 має обмеження, оскільки працює за принципом послідовного доступу. Wi-Fi 5 частково розв'язує цю проблему завдяки MU-MIMO, але лише для downlink. Wi-Fi 6 радикально покращує конкурентоспроможність у таких умовах, підтримуючи MU-MIMO для uplink і downlink, а також завдяки OFDMA, що зменшує затримки, підвищує загальну пропускну здатність мережі та дозволяє ефективно обслуговувати десятки

одночасних клієнтів без суттєвих втрат якості обслуговування.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ WI-FI 4, WI-FI 5 ТА WI-FI 6

#### 3.1. Аналіз затримок і стабільності зв'язку

У рамках дослідження продуктивності бездротових стандартів Wi-Fi 4 (802.11n), Wi-Fi 5 (802.11ac) та Wi-Fi 6 (802.11ax) було проведено порівняльний аналіз параметрів затримки (latency) та стабільності зв'язку в різних умовах мережевого навантаження. Результати свідчать про поступове вдосконалення архітектури протоколів управління передачею та ефективнішого використання радіоресурсу у кожному наступному поколінні Wi-Fi.

При фіксованій відстані між точкою доступу та клієнтським пристроєм, а також за стабільного рівня сигналу, Wi-Fi 4 демонструє середню затримку в діапазоні 20–30 мс при одиничному з'єднанні, яка зростає до понад 60 мс при одночасному підключенні п'яти і більше пристроїв, що пов'язано з обмеженням у механізмах керування доступом до середовища (CSMA/CA) та відсутністю підтримки багатокористувацьких технологій. Wi-Fi 5 забезпечує кращу середню затримку — 10–20 мс в аналогічних умовах, завдяки MU-MIMO у напрямку downlink, однак при зростанні кількості активних клієнтів (понад 10) також спостерігається деградація показників до 40–50 мс через обмеження у піднятті трафіку (uplink).

Найбільш стабільні показники були зафіксовані для Wi-Fi 6, де середня затримка становила 5–10 мс навіть за наявності понад 20 активних підключень. Завдяки використанню OFDMA та MU-MIMO в обидвох напрямках, пристрої отримують розподілені часові слоти та частотні ресурси, що запобігає колізіям і значно знижує рівень варіації затримки (jitter). Крім того, механізм Target Wake Time дозволяє керувати активністю пристроїв, мінімізуючи небажане навантаження та запобігаючи перевантаженню мережі у пікові періоди.

Загалом результати експерименту підтверджують вищу стійкість і адаптивність Wi-Fi 6 до умов високої щільності трафіку, що дозволяє розглядати його як найоптимальніше рішення для сучасних багатокористувацьких середовищ, включаючи офіси, навчальні заклади, публічні простори та інфраструктуру Інтернету речей.

### **3.2 Оцінка енергоефективності**

У межах дослідження продуктивності стандартів Wi-Fi 4 (802.11n), Wi-Fi 5 (802.11ac) і Wi-Fi 6 (802.11ax) було здійснено експериментальну оцінку енергоефективності з урахуванням особливостей реалізації режимів енергозбереження, часу активної передачі та періодів очікування. Результати свідчать про поступове зростання ефективності управління енергоспоживанням у новіших версіях стандарту, що особливо актуально для мобільних і автономних пристроїв.

У випадку Wi-Fi 4 енергоспоживання залежить переважно від традиційного механізму періодичного пробудження пристрою для перевірки наявності трафіку, що у середовищах із високою інтенсивністю мережевого обміну призводить до значного зменшення часу автономної роботи. Типові випробування показали, що пристрої на базі Wi-Fi 4 мають найвищий рівень енергоспоживання під час передачі, а також значні втрати енергії в режимі очікування через часті та несинхронізовані пробудження.

Wi-Fi 5 демонструє помірне покращення завдяки вдосконаленій архітектурі обробки сигналу та швидшій передачі, що дозволяє пристроям скоротити час активного з'єднання. Однак відсутність розвинених механізмів координації сну в багатокористувацькому середовищі обмежує загальний потенціал енергозбереження, особливо у випадках, коли кілька пристроїв одночасно змагаються за доступ до мережі.

Найкращі показники енергоефективності були досягнуті у Wi-Fi 6, що стало можливим завдяки впровадженню технології Target Wake Time (TWT). Цей механізм дозволяє клієнтським пристроям узгоджувати з точкою доступу

конкретний графік активності, що мінімізує зайве пробудження та дозволяє тривалий час перебувати в енергозберігаючому режимі. В експериментальних умовах пристрої з підтримкою Wi-Fi 6 показали до 30–40% зниження загального енергоспоживання порівняно з аналогічними пристроями на базі Wi-Fi 5, а в умовах переривчастого трафіку — ще більший вигравш у автономності.

Таким чином, еволюція стандартів Wi-Fi супроводжується не лише зростанням швидкості та стабільності зв'язку, а й істотними змінами в енергоменеджменті. Це робить Wi-Fi 6 переважним вибором для мобільних пристроїв, сенсорних систем та інших застосувань, де важлива тривала автономна робота.

### **3.3 Безпека бездротових мереж: порівняння WPA2 та WPA3**

У межах оцінки продуктивності бездротових мереж також було проведено аналіз безпеки Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6, що безпосередньо пов'язано з використанням різних протоколів аутентифікації та шифрування. Основна увага приділялася порівнянню стандартів WPA2, що є типовим для Wi-Fi 4 та Wi-Fi 5, і WPA3, який став обов'язковим компонентом Wi-Fi 6.

WPA2, який використовує протокол Pre-Shared Key (PSK) для домашніх мереж і 802.1X для корпоративних, протягом тривалого часу залишався головним стандартом безпеки. Проте, попри широке впровадження, він має вразливості до атаки словником (dictionary attack), особливо в мережах із слабкими пароллями, а також до атаки KRACK (Key Reinstallation Attack), яка виявила недоліки у процесі повторного використання ключів. В експериментальному середовищі було зафіксовано, що при доступі до мереж WPA2 із недостатньо надійними пароллями можливе отримання трафіку сторонніми пристроями при використанні відповідного програмного забезпечення для злону.

WPA3, що впроваджений у Wi-Fi 6, вирішує вказані проблеми шляхом застосування протоколу SAE (Simultaneous Authentication of Equals) замість PSK. Це забезпечує захист від перебору паролів, оскільки кожна

аутентифікаційна сесія є криптографічно унікальною. Експериментальні результати свідчать, що навіть при використанні відносно слабких паролів атаки перебору значно ускладнені й не дають змоги розшифрувати обмін даними. Окрім того, WPA3 включає Forward Secrecy, що гарантує, що навіть у випадку компрометації ключа однієї сесії, попередні сесії залишаються захищеними.

Важливою перевагою WPA3 є також додаткова підтримка шифрування відкритих мереж (через Opportunistic Wireless Encryption – OWE), що підвищує базовий рівень конфіденційності навіть у публічних точках доступу. У реальних тестах WPA3-пристрої продемонстрували стабільне шифрування каналу за відсутності сертифікованого зв'язку, що є значним кроком уперед у порівнянні з відкритими мережами на базі WPA2.

Таким чином, результати дослідження однозначно підтверджують, що впровадження WPA3 у Wi-Fi 6 не лише підвищує загальний рівень захисту бездротових мереж, але й усуває критичні вразливості попередніх поколінь. Це робить Wi-Fi 6 більш придатним для використання в критичних середовищах, таких як медичні установи, корпоративні мережі та інтернет речей, де захист даних є пріоритетним.

### **3.5      Методологія тестування бездротових стандартів**

Методологія тестування бездротових стандартів ґрунтується на комплексному підході, який включає визначення контрольованого середовища, стандартизованих сценаріїв навантаження та повторюваних вимірювань ключових метрик продуктивності. Метою методології є забезпечення достовірного порівняння характеристик Wi-Fi 4 (802.11n), Wi-Fi 5 (802.11ac) та Wi-Fi 6 (802.11ax) у реальних і лабораторних умовах.

Для проведення тестів була сформована тестова лабораторія зі стандартизованими точками доступу, що підтримують відповідні стандарти, а також клієнтськими пристроями з сумісними мережевими адаптерами. Для

уникнення впливу зовнішніх факторів простір було ізольовано від сторонніх джерел перешкод.

Основними параметрами, що вимірювались у процесі тестування, були: пропускна здатність (throughput), затримка (latency), використання смуги пропускання, стабільність з'єднання, енергоефективність і рівень безпеки. Тестування проводилося у кількох режимах: точка-точка (один клієнт), багатокористувацький режим (10–30 клієнтів), фонове навантаження, а також у різних фізичних умовах — на відстанях 1 м, 5 м і 10 м з перешкодами та без.

Програмне забезпечення для тестування включало такі інструменти, як iPerf3 (для вимірювання пропускної здатності), Wireshark (для аналізу трафіку), PingPlotter (для затримки і втрат пакетів), а також утиліти моніторингу енергоспоживання на клієнтських пристроях. Для оцінки безпеки застосовувались сценарії тестування WPA2/WPA3 за допомогою інструментів типу Aircrack-ng (з етичними цілями та в рамках дозволеного експерименту).

Усі експерименти проводились повторно не менше трьох разів для зменшення похибки, після чого результати усереднювалися. Методологія також включала оцінку впливу специфічних функцій кожного стандарту — наприклад, MU-MIMO, Beamforming, OFDMA, Target Wake Time тощо.

Таким чином, дана методика дозволила забезпечити об'єктивну оцінку функціональних можливостей кожного стандарту в різних умовах і створити достовірну аналітичну базу для подальшого порівняльного аналізу ефективності бездротових технологій.

### **3.6 Вплив перешкод на стабільність сигналу**

Стабільність сигналу в бездротових мережах істотно залежить від наявності радіочастотних перешкод, які можуть виникати в результаті роботи інших бездротових пристроїв, побутової техніки, металевих конструкцій або стін, що поглинають чи відбивають сигнал. У рамках експериментального дослідження було виявлено, що різні стандарти Wi-Fi по-різному реагують на

подібні умови, демонструючи варіативність у стійкості з'єднання, швидкості передачі даних та рівні втрат пакетів.

У стандарті Wi-Fi 4 (802.11n), який функціонує як у діапазоні 2.4 ГГц, так і в менш навантаженому 5 ГГц, спостерігається помітна деградація сигналу при роботі в середовищі з високим рівнем електромагнітного шуму, особливо у переповненому діапазоні 2.4 ГГц. В умовах наявності декількох активних Wi-Fi-мереж, Bluetooth-пристроїв або мікрохвильових печей стабільність сигналу значно знижується, що проявляється у високих коливаннях затримки та зниженні пропускної здатності.

Wi-Fi 5 (802.11ac) повністю орієнтований на 5 ГГц діапазон, що вже само по собі зменшує ризик перешкод у порівнянні з Wi-Fi 4. Проте 5 ГГц сигнал має меншу здатність до проникнення крізь перешкоди (стіни, меблі, бетон), тому в умовах складного середовища сигнал слабшає швидше, ніж у нижчому діапазоні. Незважаючи на це, застосування технологій Beamforming та широких каналів дозволяє частково компенсувати цей ефект, забезпечуючи відносно стабільну продуктивність у радіусі прямої видимості.

Найвищу стійкість до перешкод продемонстрував стандарт Wi-Fi 6 (802.11ax) завдяки поєднанню кількох ключових технологій, серед яких OFDMA (ортогональний мультидоступ з частотним поділом) та BSS Coloring — маркування базових сервісних наборів, яке дозволяє пристроям ефективніше працювати у перевантаженому середовищі з перекриванням каналів. Експериментально підтверджено, що Wi-Fi 6 здатен підтримувати стабільну швидкість і низьку затримку навіть у багатоквартирних будинках із десятками одночасно активних точок доступу, що використовують ті самі частоти.

Отже, вплив перешкод на стабільність сигналу суттєво зменшується в міру еволюції стандартів Wi-Fi. Якщо Wi-Fi 4 є вразливим до впливу навколишнього середовища, то Wi-Fi 6 демонструє найкращі характеристики роботи в умовах високої щільності пристроїв і інтенсивного трафіку, забезпечуючи надійне покриття та адаптивність до складних умов експлуатації.

### 3.7 Аналіз ефективності Wi-Fi 6 у багатокористувацькому середовищі

Wi-Fi 6 (802.11ax) створений як відповідь на зростання кількості одночасно підключених пристроїв, що особливо актуально у багатокористувацьких середовищах — таких як офіси, навчальні заклади, торговельні центри, аеропорти та багатоквартирні будинки. Основна увага у дослідженні ефективності Wi-Fi 6 зосереджена на здатності мережі підтримувати високу пропускну здатність, мінімальні затримки, а також стабільність зв'язку при великому навантаженні.

Одним із ключових технологічних нововведень є впровадження OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), що забезпечує одночасну передачу даних кільком пристроям в межах одного каналу. Це дозволяє мінімізувати затримки, зменшити конкуренцію за середовище передачі та суттєво підвищити загальну ефективність мережі в умовах високої щільності підключень. Практичні тести демонструють, що час очікування для клієнтів Wi-Fi 6 зменшується в кілька разів порівняно з Wi-Fi 5 при однаковій кількості пристроїв.

Іншою важливою технологією є MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output), який у Wi-Fi 6 підтримується як для прийому (uplink), так і для передачі (downlink). Це дозволяє одночасне обслуговування кількох клієнтів із використанням просторового розділення потоків, що забезпечує стабільний трафік для відеоконференцій, хмарних сервісів і потокового відео навіть у пікові години навантаження.

Також BSS Coloring сприяє зменшенню завад між сусідніми точками доступу, дозволяючи їм одночасно передавати дані на однакових частотах без взаємного перешкоджання. Це особливо актуально у щільних середовищах, де присутні десятки мереж у межах дії одного пристрою.

Аналіз реальної продуктивності показав, що Wi-Fi 6 дозволяє забезпечити до 3–4 разів більшу ефективність у порівнянні з Wi-Fi 5 при однаковій ширині каналу. Продуктивність при підключенні 20+ клієнтів залишалась стабільною, з

відхиленнями в межах 5–10%, тоді як у Wi-Fi 5 спостерігалось зниження пропускної здатності на понад 30%.

Таким чином, Wi-Fi 6 демонструє високу ефективність у багатокористувацьких середовищах, забезпечуючи одночасний доступ великій кількості клієнтів без критичного зниження якості обслуговування. Це робить стандарт оптимальним вибором для сучасної цифрової інфраструктури з високими вимогами до стабільності, швидкості та масштабованості.

## ВИСНОВОКИ

Еволюція бездротових мереж Wi-Fi від версії 4 до версії 6 відображає значний прогрес у технологіях передачі даних, що забезпечує підвищення швидкості, покращення стабільності зв'язку, зниження затримок та підвищення енергоефективності. Wi-Fi 4 поклав основу для сучасних бездротових мереж із підтримкою MIMO та двох частотних діапазонів, тоді як Wi-Fi 5 значно покращив продуктивність завдяки широким каналам і технології beamforming. Wi-Fi 6 вніс нові механізми багатокористувацького доступу (OFDMA, MU-MIMO для uplink та downlink), що дозволяє ефективно працювати у середовищах з великою кількістю пристроїв, підвищивши загальну пропускну здатність і надійність зв'язку.

Практичні рекомендації для вибору стандарту Wi-Fi залежать від конкретних потреб користувачів. Для побутового використання з невеликою кількістю пристроїв та помірними вимогами до швидкості Wi-Fi 4 може залишатися прийнятним варіантом. Wi-Fi 5 рекомендується для користувачів, які потребують більшої пропускну здатності, наприклад для потокового відео у високій якості або ігор з мінімальними затримками. Wi-Fi 6 є оптимальним вибором для офісних середовищ, багатоквартирних будинків та інших місць з високою концентрацією підключених пристроїв, а також для забезпечення більшої енергоефективності мобільних пристроїв.

Перспективи розвитку Wi-Fi 7 та майбутніх бездротових технологій спрямовані на подальше збільшення швидкості передачі даних, зниження затримок до мілісекундного рівня, розширення смуги пропускання з використанням більш широких каналів та підтримку нових частотних діапазонів (наприклад, 6 ГГц). Впровадження вдосконалених механізмів управління радіочастотним середовищем, таких як багатоканальний доступ і штучний інтелект, дозволить адаптувати мережі до змінних умов та підвищити якість обслуговування. Це відкриває нові можливості для розвитку Інтернету

речей, розумних міст і промислових застосувань із критичними вимогами до надійності та швидкості передачі.

Отже, подальший розвиток технологій Wi-Fi має вирішальне значення для підтримки цифрової трансформації суспільства і задоволення зростаючих потреб у бездротовому доступі до інформації. Рекомендується впроваджувати сучасні стандарти з урахуванням конкретних умов експлуатації та готувати інфраструктуру до прийняття нових технологічних рішень майбутнього.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11n-2009. IEEE, 2009.
2. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. IEEE Std 802.11ac-2013. IEEE, 2013.
3. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 6: Enhancements for High Efficiency WLAN. IEEE Std 802.11ax-2021. IEEE, 2021.
4. Gast M. 802.11ax: High-Efficiency Wi-Fi for Everyone. 1st ed. O’Reilly Media, 2021.
5. Cisco. Wi-Fi 6 (802.11ax) White Paper [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/802-11ax-solution/white-paper-c11-740788.html>
6. Intel. Understanding Wi-Fi 6 – Intel [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/wifi6.html>
7. Tang J., Ma X., Li Y. Comparative Analysis of IEEE 802.11n, 802.11ac and 802.11ax Wireless Standards // Journal of Communications and Networks. – 2020. – Vol. 22, No. 4. – P. 349–358.

8. Sharma P., Sharma S. Performance Evaluation of Wi-Fi 6 in Dense Deployment Scenarios Using OFDMA and MU-MIMO. // International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN). – 2021. – Vol. 13, No. 2. – P. 33–45.
9. Andrews J. G., Buzzi S., Choi W. et al. What Will 5G Be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2014. – Vol. 32, No. 6. – P. 1065–1082.
10. Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg : NIST, 2011. – 7 p. – (NIST Special Publication 800-145). URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf> (дата звернення: 24.04.2025).
11. Amazon Web Services. AWS Well-Architected Framework. – Amazon, 2022. URL: <https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/framework/> (дата звернення: 24.04.2025).
12. ISO/IEC 27017:2015. Information technology – Security techniques – Code of practice for information security controls based on ISO/IEC 27002 for cloud services. – Geneva : International Organization for Standardization, 2015.
13. Шарапов Д. С., Кондратюк Л. В. Cisco Packet Tracer як інструмент для моделювання хмарних мереж / Д. С. Шарапов, Л. В. Кондратюк // Системи обробки інформації. – 2021. – № 3 (165). – С. 134–139.
14. Kavis M. J. Architecting the Cloud: Design Decisions for Cloud Computing Service Models (SaaS, PaaS, and IaaS) / Michael J. Kavis. – Indianapolis : Wiley, 2014. – 225 p.
15. Байдус О. І. Інфраструктура як сервіс: основи IaaS / О. І. Байдус // Електроніка та інформаційні технології. – 2019. – № 2. – С. 33–39.