Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛІВ 5G/WI-FI НА БАЗІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-21б
спеціальності 172 –Телекомунікації та радіотехніка
Чумак М. М.

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІКСТ
Михалевський Д.В.
«11» 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., доц. каф. ІРТС
Осадчук Я. О.
«11» 06 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., проф. Кичак В.М.
«11» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
«5» 05 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Чумаку Максиму Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності безпровідних каналів 5G/Wi-Fi на базі інтелектуальної системи аналізу
керівник роботи Михалевський Дмитро Валерійович, д.т.н професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ВНТУ від "20" березня 2025 року № 97

2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: тип інфокомунікаційної мережі – програмно-керована мережа; режим роботи інфокомунікаційної мережі – багатоканальна; тип стандарту з'язку – 5G / IEEE 802.11; сумарна швидкість інформаційних потоків – 1 Гбіт/с; імовірність помилки в радіотракті - 10^{-6}; збереження даних – локальне продовж сесії; середовище розробки – PyCharm; мова розробки – Python; операційна система – Windows 11.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз стану проблеми сучасних бездротових технологій, методи та технології підвищення ефективності бездротових каналів зв'язку, архітектура та реалізація інтелектуальної системи підвищення ефективності безпровідних каналів, висновки, перелік посилань, додатки, графічна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): таблиці порівняння аналогів/результатів, схеми алгоритмів роботи модулів, структури проекту, тип зберігання даних, інтеграція трансформеру та функції.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ	05.05.25	11.06.25
Охорона праці	Дембіцька С. В. професор кафедри БЖДПБ	05.05.25	11.06.25

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент _____ (підпис) Чумак М.М.

Керівник роботи _____ (підпис) Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.396.67

Чумак М. М. Підвищення ефективності безпровідних каналів 5G/Wi-Fi на базі інтелектуальної системи аналізу. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. 90 стор., 39 рис., 14 табл., 34 бібл.

Мета роботи – розробка інтелектуальної системи аналізу для підвищення ефективності бездротових каналів через інтеграцію машинного навчання та спрощення управління мережею. Проєкт включав аналіз сучасних бездротових технологій, ідентифікацію факторів зниження ефективності та обмежень існуючих інструментів. Обґрунтовано гібридний підхід, що поєднує знання доменів з моделями машинного навчання (лінійна/поліноміальна регресія, випадковий ліс).

Ключові слова: 5G, Wi-Fi, бездротові канали, інтелектуальна система, машинне навчання, управління мережею, ефективність.

ABSTRACT

UDC: 621.396.67

Chumak M. M. Increasing the Efficiency of 5G/Wi-Fi Wireless Channels Based on an Intelligent Analysis System. Bachelor's Qualification Paper. – Vinnytsia: VNTU, 2025. 90 p., 39 fig., 14 tab., 34 bibl.

The aim is to develop an intelligent analysis system for enhancing wireless channel efficiency by integrating machine learning and simplifying network management. The project analyzed modern wireless technologies, identified efficiency reduction factors and existing tool limitations. A hybrid approach combining domain knowledge with machine learning models (linear/polynomial regression, random forest) was justified.

Keywords: 5G, Wi-Fi, wireless channels, intelligent system, machine learning, network management, efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний світ стрімко розвивається завдяки бездротовим технологіям, де 5G та новітні стандарти Wi-Fi (6/6E/7) відіграють ключову роль. Вони забезпечують безпрецедентні швидкості передачі даних, наднизьку затримку та високу надійність, відкриваючи шлях для застосувань – від промислового інтернету речей (IoT) та автономних транспортних засобів до доповненої та віртуальної реальності[1,18].

Однак, попри значні досягнення, ці мережі стикаються з низкою фундаментальних викликів, що призводять до проблем з продуктивністю[19]. До таких викликів належать різноманітні форми інтерференції, затухання сигналу, перевантаження мережі, а також динамічні умови каналу. Ці фактори є взаємопов'язаними та створюють складне, непередбачуване середовище, де прості метрики швидкості не відображають реальну якість обслуговування.

Аналіз останніх досліджень. Традиційні підходи до моніторингу та оптимізації бездротових мереж виявляються недостатніми в умовах зростаючої складності та динамічності сучасних комунікаційних систем, що створює критичний розрив між можливостями мереж та інструментами їх управління[27, 32]. Це обґрунтовує нагальну потребу у впровадженні інтелектуальних рішень, здатних адаптуватися до мінливих умов, прогнозувати поведінку мережі та оптимізувати її продуктивність[9, 30]. Останні дослідження активно вивчають інтеграцію штучного інтелекту та машинного навчання для подолання усіх наведених обмежень[2, 4, 31]. Вони застосовуються для динамічного управління ресурсами, прогнозування стану каналу, виявлення аномалій, оптимізації, а також для пом'якшення інтерференції[3].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка інтелектуальної системи аналізу для підвищення ефективності бездротових каналів 5G/Wi-Fi шляхом інтеграції методів машинного навчання.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

Аналіз сучасних бездротових технологій 5G та Wi-Fi 6/7, а також факторів, що знижують ефективність бездротових каналів зв'язку, та обмежень існуючих інструментів моніторингу та оптимізації мережі.

Синтез та обґрунтування інтелектуальних методів та технологій інтелектуальних систем для подолання виявлених обмежень традиційних підходів до оптимізації бездротових мереж.

Розробка архітектури та структурних компонентів інтелектуальної системи аналізу, що включає модулі моніторингу, обробки та візуалізації даних, інтелектуального аналізу та прогнозування, а також інтерактивного чат-асистента.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНИХ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Особливості сучасних бездротових технологій 5G, Wi-Fi 6/7

5G, п'яте покоління мобільних мереж, являє собою значний крок вперед порівняно з попередніми поколіннями, пропонуючи високу пропускну здатність, низьку затримку та високу надійність. Ці можливості роблять 5G ідеальною технологією для широкого спектру застосувань, включаючи промисловий інтернет речей, автоматизовану робототехніку та доповнену реальність. Основні переваги 5G визначаються трьома основними напрямками розвитку[12]:

Розширена мобільна широкосмугова передача: Ця функція забезпечує надвисокі швидкості передачі даних, що можуть досягати до 10 Гбіт/с. Це дозволяє користувачам швидко завантажувати великі файли та безперебійно здійснювати потокову передачу відео високої якості.

Наднадійний зв'язок з низькою затримкою: 5G має цільову затримку до 1 мілісекунди, що є критично важливим для застосувань, які вимагають реакції в реальному часі. Прикладами таких застосувань є автономні транспортні засоби та віддалена хірургія, де будь-яка затримка може мати серйозні наслідки.

Масштабна комунікація типу "машина-машина": Ця можливість дозволяє підключати до 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр, підтримуючи таким чином зростаючу екосистему інтернету речей та забезпечуючи зв'язок для великої кількості сенсорів та пристроїв.

З архітектурної точки зору, 5G розширює існуючу інфраструктуру 4G, впроваджуючи віртуалізацію архітектури ядра та радіодоступу (RAN). Це дозволяє створювати відносно недорогі тестові стенди для експериментів та інновацій. Мережа 5G складається з трьох основних компонентів: кінцевих

пристроїв (User Equipment, UE), мережі радіодоступу (RAN), яка включає базову станцію gNodeB (gNB), та основного ядра 5G (5GC). 5GC відповідає за координацію між базовими станціями, управління автентифікацією та встановлення сесій між пристроями та зовнішніми мережами.

На фізичному рівні 5G визначено шість фізичних каналів, кожен із яких виконує унікальні функції[12, 16]. Серед них: фізичний канал широкомовного розповсюдження (PBCH) – для трансляції параметрів синхронізації; фізичний канал випадкового доступу (PRACH) – для початкового доступу абонентського пристрою (UE) до базової станції (gNB); фізичний канал керування у низхідній лінії (PDCCH) та фізичний канал керування у висхідній лінії (PUCCH) – для передавання керувальних сигналів; а також фізичний спільний канал у низхідній лінії (PDSCH) та фізичний спільний канал у висхідній лінії (PUSCH) – для обміну даними між базовою станцією (gNB) та абонентським пристроєм (UE).

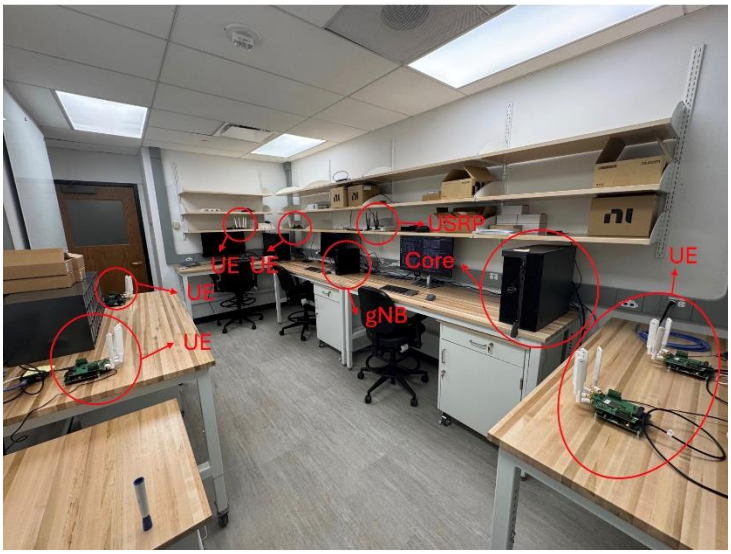

Рисунок 1.1 – Концептуальна архітектура мережі 5G

Рисунок 1.1 ілюструє основні компоненти мережі 5G та їх взаємодію. У центрі розташоване Ядро мережі 5G (5GC), яке є мозком системи, що керує сесіями, автентифікацією та маршрутизацією. До ядра підключена Мережа радіодоступу (RAN), що складається з базових станцій (gNB). Ці gNB

забезпечують бездротовий зв'язок з кінцевими пристроями (UE), такими як смартфони, IoT-пристрої та інші підключені гаджети. Стрілки показують потік даних між цими компонентами, демонструючи, як UE підключаються до мережі через RAN, а 5GC координує зв'язок та доступ до зовнішніх мереж.

Незважаючи на значні переваги, 5G-NR має певні обмеження. Це асиметрична технологія доступу, де швидкість завантаження завжди перевищує швидкість вивантаження. Ця особливість оптимізована для комерційних користувачів, які переважно завантажують дані. Крім того, 5G має обмеження у задоволенні жорстких вимог до затримки та надійності для промислової автоматизації в реальному часі.

Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax): Цей стандарт забезпечує значно вищу ефективність мережі, особливо в перевантажених середовищах, завдяки вдосконаленням у технологіях MU-MIMO та OFDMA[31].

MU-MIMO (Multi-user Multiple Input, Multiple Output): Дозволяє точці доступу одночасно обслуговувати кілька користувачів (див. рис1.2), що значно збільшує ефективність мережі за рахунок паралелізації трафіку даних. Wi-Fi 6 запровадив MU-MIMO для аплінку, що було значним покращенням порівняно з попередніми версіями[18].

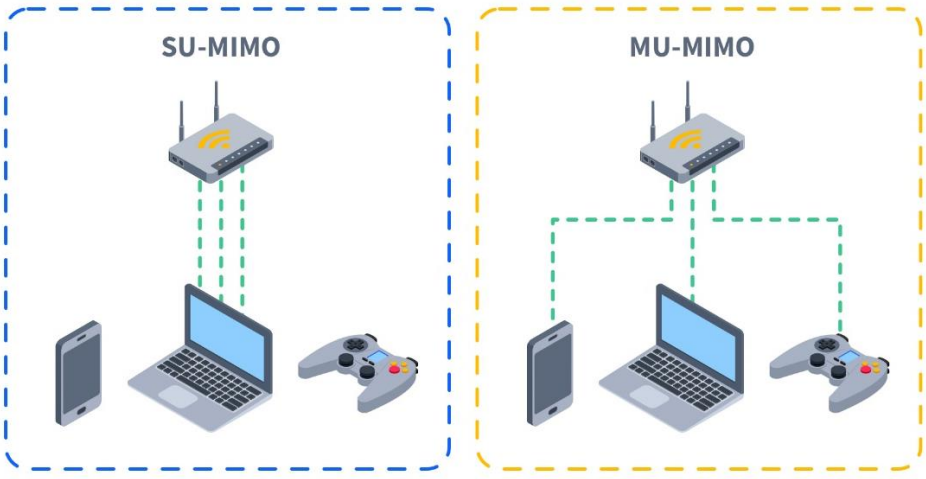

Рисунок 1.2 – Концепція SU-MIMO та MU-MIMO

OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access): Ця технологія ділить доступну смугу пропускання на менші ресурсні одиниці, дозволяючи більшій кількості користувачів одночасно підключатися до точки доступу. Це також покращує співіснування з іншими вузькосмуговими технологіями, такими як Bluetooth та Zigbee[3].

Рисунок 1.3 – Концепція OFDM та OFDMA

TWT (Target Wake Time): Функція енергозбереження, особливо корисна для IoT-пристроїв, яка дозволяє їм переходити в глибокий сон і прокидатися за попередньо узгодженим графіком, мінімізуючи конфлікти та значно зменшуючи споживання енергії.

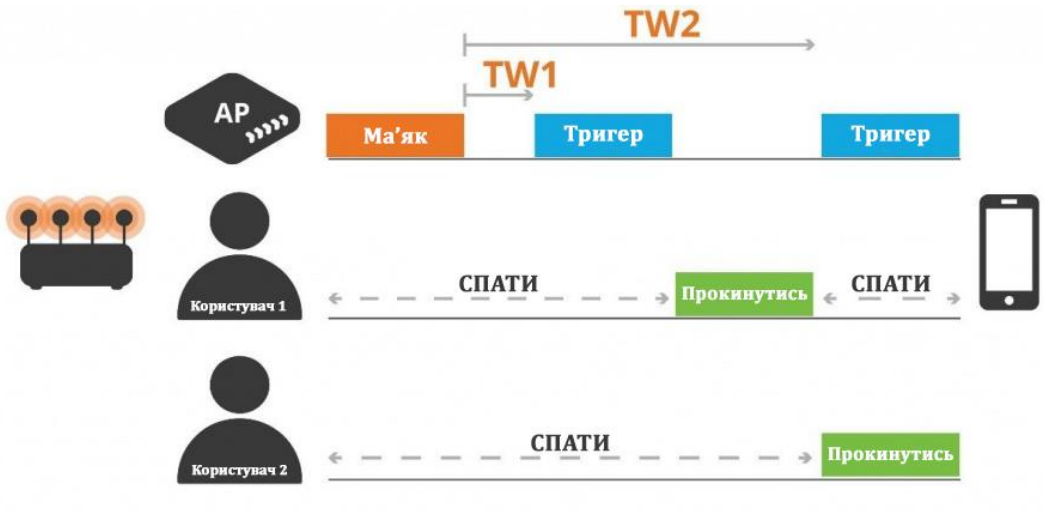

Рисунок 1.4 – Концепція TWT

Wi-Fi 6E (Розширення Wi-Fi 6), використовує новий діапазон 6 ГГц (від 5.925 ГГц до 7.125 ГГц). Це додає додаткову смугу пропускання 1.2 ГГц, що забезпечує до 7 каналів шириною 160 МГц або 14 каналів шириною 80 МГц. Це значно зменшує перевантаження та забезпечує кращу якість обслуговування (QoS) з меншою затримкою, що є особливо важливим для застосувань, таких як ігри та AR/VR гарнітури[18]. Однак, діапазон 6 ГГц має більш обмежений радіус дії та зменшену здатність до проникнення крізь стіни та стелі.

Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be): обіцяє значні досягнення, які роблять його майже в 5 разів швидшим за попередній. Підтримка до 320 МГц ширини каналу, доступна лише в діапазоні 6 ГГц. Збільшена конфігурація MIMO: До 16x16 MIMO, з попередніх 8x8. Використання 4K QAM максимальної модуляції, порівняно з 1K QAM у Wi-Fi 6/6E. Також впровадження таких технологій:

MLO (Multi-Link Operation) - дозволяє агрегувати два канали з однієї або різних смуг для збільшення пропускної здатності, обходу перешкод та зменшення затримки. Це може бути будь-яка комбінація, наприклад, два роз'єднані канали 160 МГц у діапазоні 6 ГГц або комбінація каналів 6 ГГц та 5 ГГц[18].

MRU (Multi-Resource Unit) - дозволяє агрегувати дві суміжні або роз'єднані ресурсні одиниці в одному каналі для одного користувача, щоб задовольнити вимоги до пропускної здатності[18].

Зазвичай, Wi-Fi 6/7 мають домінувати у внутрішніх середовищах, тоді як 5G більше підходить для зовнішніх та великомасштабних застосувань. Важливою відмінністю є ліцензування: 5G працює як на ліцензованих, так і на неліцензованих діапазонах, тоді як Wi-Fi 6 працює тільки на неліцензованих частотах, що може створювати інтерференцію між ними, вимагаючи додаткового планування розгортання[6, 20].

Таблиця 1.1 – Порівняння ключових характеристик 5G, Wi-Fi 6/6E/7

Характеристика	5G	Wi-Fi 6/6E (IEEE 802.11ax)	Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be)
Пікова пропускна здатність	До 10 Гбіт/с	До 9.6 Гбіт/с	Майже в 5 разів швидше за Wi-Fi 6/6E
Типова затримка	Цільова 1 мс (URLLC)	Зменшена в умовах високої щільності	Зменшена, особливо з MLO
Діапазони частот	Ліцензовані та неліцензовані	2.4 ГГц, 5 ГГц (Wi-Fi 6E: 6ГГц)	2.4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц
Ключові особливості	eMBB, URLLC, mMTC	MU-MIMO, OFDMA, TWT	MLO, MRU, 4K QAM
Типове середовище	Зовнішнє/Макропокриття	Внутрішнє/ Щільне	Внутрішнє/ Щільне
Тип спектру	Ліцензований, Неліцензований	Неліцензований	Неліцензований
Ємність	До 1 млн пристроїв/км²	До 250 пристроїв/AP	Покращена завдяки MLO/MRU

Порівняння вказують на те, що 5G та Wi-Fi 6/7 не є суто конкуруючими технологіями, а скоріше взаємодоповнюючими. Їхні сильні сторони є взаємодоповнюючими: 5G домінує у покритті та мобільності, тоді як Wi-Fi 6/7 є оптимальним для щільних внутрішніх середовищ. Це означає, що для досягнення максимальної ефективності бездротових каналів у гібридних сценаріях, наприклад, у розумних будівлях або на промислових підприємствах, потрібна інтеграція та інтелектуальне керування обома технологіями, а не вибір однієї[27,30]. Оптимізація ефективності бездротових каналів у сучасних умовах вимагає не лише розуміння індивідуальних можливостей 5G та Wi-Fi, але й розробки систем, здатних інтелектуально керувати їхнім співіснуванням та перемиканням.

5G-NR є асиметричною технологією, оптимізованою для завантаження даних. Ця особливість може створювати вузькі місця для застосувань, що вимагають високої швидкості. Водночас, використання 5G як ліцензованого,

так і неліцензованого спектру може призвести до інтерференції з Wi-Fi 6, який працює виключно на неліцензованих діапазонах. Ці архітектурні та спектральні особливості створюють приховані джерела неефективності, які не можуть бути вирішені лише збільшенням пропускної здатності. Вони вимагають інтелектуальних механізмів для динамічного управління спектром, оптимізації та уникнення інтерференції, що підкреслює потребу в інтелектуальному аналізі[6, 20, 28].

Еволюція стандартів Wi-Fi, від Wi-Fi 6 до Wi-Fi 7, демонструє чітку тенденцію до підвищення ефективності в умовах високої щільності, впроваджуючи такі функції, як MU-MIMO, OFDMA, MLO та MRU[31]. Це не просто збільшення швидкості, а фундаментальна зміна підходу до управління ресурсами в перевантажених середовищах. Ця зміна свідчить про те, що проблема ефективності каналів у щільних середовищах є настільки критичною, що вимагає вбудованих архітектурних рішень.

1.2 Аналіз факторів зниження ефективності бездротових каналів зв’язку

Інтерференція є одним з найпоширеніших факторів, що знижують продуктивність бездротових мереж[20]. Вона виникає, коли сигнали від різних пристроїв або мереж перекриваються або конфліктують, що призводить до погіршення якості сигналу, зниження швидкості передачі даних та проблем з підключенням. Існує кілька основних типів інтерференції:

Перешкоди на спільних каналах (Co-channel Interference): Цей тип інтерференції виникає, коли кілька Wi-Fi мереж або пристроїв працюють на одному каналі. Це призводить до перекриття сигналів та зниження продуктивності, оскільки пристрої конкурують за обмежену смугу пропускання. Це особливо поширено в густонаселених районах, де багато мереж працюють одночасно.

Інтерференція сусідніх каналів (Adjacent Channel Interference): Відбувається, коли Wi-Fi мережі використовують канали, що перекриваються і знаходяться близько за частотою. Це викликає перешкоди, навіть якщо вони технічно знаходяться на різних каналах, оскільки сигнали можуть "розливатися" на сусідні частоти[3].

Електромагнітна інтерференція (EMI): Виникає від інших електронних пристроїв, що працюють на подібних частотах. Прикладами є мікрохвильові печі, бездротові телефони, Bluetooth-пристрої та дитячі монітори. Ці пристрої можуть випромінювати електромагнітні поля, що порушують роботу Wi-Fi сигналів.

Фізична інтерференція: Включає перешкоди, такі як стіни, підлоги або великі об'єкти, які блокують або послаблюють сигнали Wi-Fi. Це може створювати "мертві зони" або значно зменшувати силу сигналу в певних областях.

Екологічна інтерференція: Зовнішні фактори, такі як погодні умови, великі водойми, температура, вологість і навіть рух людей, можуть впливати на поширення та стабільність сигналу, викликаючи його флуктуації.

Іншим фактором є затухання сигналу, або ослаблення, є природним явищем, при якому сила сигналу зменшується зі збільшенням відстані від джерела та при проходженні крізь різні перешкоди. Основні фактори, що викликають затухання:

Втрати на шляху (Path Loss) – це зменшення потужності сигналу зі збільшенням відстані від базової станції або точки доступу. Сила сигналу експоненційно погіршується з відстанню, що безпосередньо впливає на пропускну здатність.

Ефект завмирання включає як великі, так і малі коливання сигналу, спричинені багатопроменевим поширенням (коли сигнал досягає приймача кількома шляхами) та рухом пристроїв.

Фізичні перешкоди, такі як стіни, двері, меблі, бетон, метал та гіпсокартон, можуть блокувати або послаблювати сигнали Wi-Fi. Це призводить до утворення "мертвих зон" або зниження швидкості інтернету в певних областях. Наслідком затухання сигналу є зниження швидкості передачі даних, проблеми з підключенням та загальне погіршення якості зв'язку.

Перевантаження мережі виникає, коли обсяг трафіку перевищує пропускну здатність доступних мережевих ресурсів. Це створює "вузьке місце", де пакети даних накопичуються швидше, ніж можуть бути оброблені або переслані. Наслідки перевантаження:

а) втрата пакетів – буфери в мережевих пристроях, таких як маршрутизатори, переповнюються, що призводить до відкидання вхідних пакетів через брак місця в буфері;

б) зниження пропускної здатності – перевантаження може спричинити "стрибкоподібну" поведінку пропускної здатності, оскільки система намагається адаптуватися до обмежених ресурсів;

в) збільшення затримки та PLR – накопичення пакетів у буферах призводить до збільшення часу відгуку (RTT) та зростання коефіцієнта втрати пакетів (PLR).

Загалом, перевантаження мережі призводить до зниження загальної продуктивності, затримок та підвищення джиттера.

Бездротові системи характеризуються швидкозмінними умовами каналу, динамічними шаблонами трафіку, мобільністю користувачів та періодичними або сезонними змінами використання мережі. Ці фактори створюють значні виклики для підтримки стабільної та ефективної роботи.

Хендовер (Handover) - це процес зміни базової станції, коли мобільний термінал переміщується з зони покриття однієї стільники в іншу. Метою хендовера є забезпечення безперервного зв'язку з найкращою якістю сигналу. Головною проблемою є те, що він може призводити до тимчасових стрибків, оскільки з'єднання втрачається на деякий час, поки дві базові станції

встановлюють передачу. Це також викликає великі сигнальні накладні витрати та тривалий час переривання з'єднання, який може сягати до 90 мс. Якщо він спрацьовує занадто пізно, радіолінк до джерела gNB може бути втрачений, що призводить до тривалого переривання обслуговування[21].

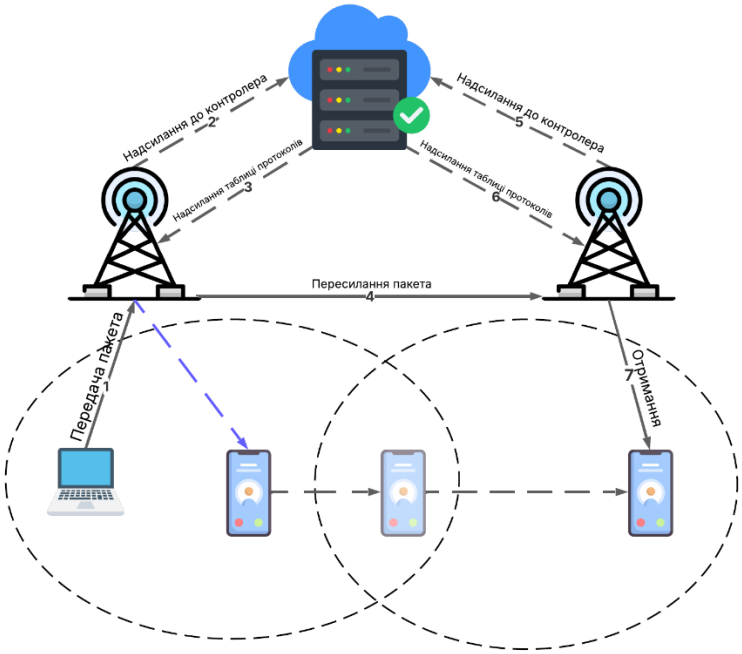

Рисунок 1.5 – Процес хендовера у бездротовій мережі

Пакети не по порядку (Out-of-order packets) - проблема виникає, коли пакети даних надходять до приймача не в тій послідовності, в якій вони були відправлені. Може бути спричинена множинна адресація (використанням декількох інтерфейсів, наприклад, Wi-Fi та 5G) або динамічною маршрутизацією.

Втрата пакетів (Packet Loss) виникає, коли пакети даних не досягають свого призначення. Основними причинами є перевантаження мережі, несправності обладнання (маршрутизатори, комутатори, кабелі). Як наслідок, порушення плавного потоку даних, помилки та невідповідності у зв'язку, затримки, "заїкання" та порушення користувацького досвіду для додатків реального часу.

Таблиця 1.2 – Вплив втрати пакетів

Втрати	Вплив на комунікації	Вплив на програми	Заг. вплив
Незначні	Може спричиняти збої в аудіо/відеодзвінках	Мінімальні перешкоди	Без суттєвого впливу
Помірні	Знижують швидкість передачі даних	Затримки в додатках реального часу (відеоконференції, онлайн-ігри)	Погіршення продуктивності
Сильні	Робить зв'язок непридатним для використання	Збої в роботі програм та перебої в роботі сервісів	Мережа непридатна для використання

Взаємозалежність цих джерел неефективності є значною. Хоча інтерференція, затухання, перевантаження та динамічні умови каналу розглядаються окремо, вони не є ізольованими проблемами. Наприклад, висока щільність пристроїв у Wi-Fi середовищах природно призводить до перешкоди на спільних каналах та сусідньої інтерференції [3], що, в свою чергу, може викликати перевантаження мережі та втрату пакетів. Рух користувачів призводить до частих хендоверів[25, 32], які можуть спричинити тимчасову втрату з'єднання та пакети не по порядку. Це підкреслює, що проблеми ефективності бездротових каналів є багатофакторними та взаємопов'язаними.

Проблема "пакетів не по порядку" часто недооцінюється, але її вплив є критичним для додатків реального часу, таких як VoIP, відеоконференції та онлайн-ігри. Хоча дані зрештою можуть бути доставлені, необхідність перевпорядкування пакетів на приймальній стороні призводить до збільшення затримки, що безпосередньо погіршує якість користувацького досвіду, навіть якщо "швидкість" мережі здається високою. Це свідчить про те, що проста метрика "швидкості" не є достатньою для оцінки ефективності каналу.

Рисунок 1.6 – Вприв перевпорядкування пакетів

Крім того, незважаючи на те, що 5G позиціонується як технологія з наднизькою затримкою (URLLC), джерела прямо вказують, що 5G має обмеження у задоволенні жорстких вимог до затримки та надійності для промислової автоматизації в реальному часі, таких як керування рухом[19]. Це парадоксально, враховуючи заявлені можливості 5G. Цей аспект підкреслює розрив між теоретичними можливостями та практичними обмеженнями. Це створює чітку потребу в інтелектуальних системах, які можуть не лише відслідковувати, але й активно оптимізувати параметри каналу в реальному часі, щоб наблизити продуктивність до ідеальних вимог, особливо для критично важливих застосувань[27,28].

1.3 Обмеження інструментів моніторингу мережі

Інструменти моніторингу, такі як SNMP та NetFlow, є основою для управління мережами, але вони мають певні обмеження, особливо в динамічних та складних бездротових середовищах 5G/Wi-Fi.

SNMP (Simple Network Management Protocol) є стандартизованим протоколом, що забезпечує сумісність між різними пристроями та виробниками. Він є масштабованим, дозволяючи моніторинг тисяч пристроїв з однієї центральної системи управління мережею (NMS). SNMP також

дозволяє моніторинг у реальному часі та оповіщення про стан пристроїв, використання смуги пропускання та шаблони трафіку.

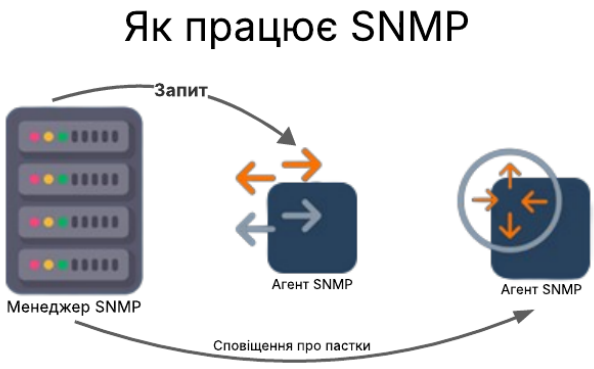

Рисунок 1.7 – Моніторинг мережі за допомогою SNMP

Ранні версії SNMP (v1 та v2c) мають слабкі функції безпеки, що робить їх вразливими до несанкціонованого доступу. Налаштування SNMP може бути складним, особливо у великих мережах, вимагаючи ретельного планування. Крім того, SNMP може не надавати достатньо детальної інформації про конкретні параметри пристроїв, що обмежує його діагностичні можливості.

NetFlow (та інші типи Flow даних) фокусується на аналізі мережевого трафіку, надаючи детальну інформацію про потік TCP/IP, включаючи IP-адреси, порти, протокол, DSCP, VLAN ID та навіть MAC-адреси. Це дозволяє проактивне управління, виявлення аномалій та краще розуміння використання мережевих ресурсів.

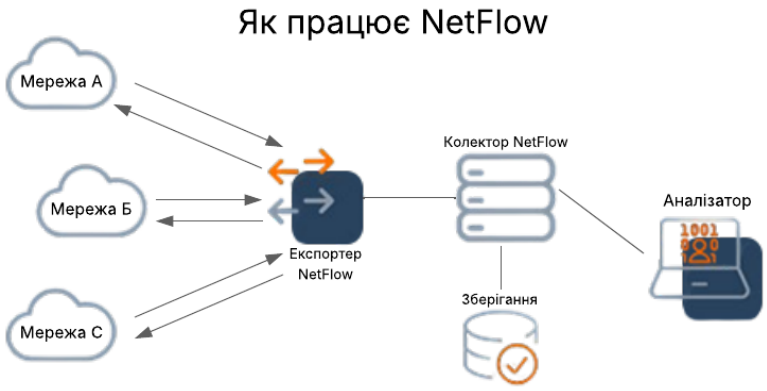

Рисунок 1.8 – Моніторинг мережі за допомогою NetFlow

NetFlow надає детальний огляд трафіку, але не надає загальної інформації про стан пристроїв (наприклад, тип пристрою, операційна система, використання пам'яті/ЦП), на відміну від SNMP. Крім того, використання вибіркових даних NetFlow/Flow може перешкоджати розслідуванню деяких проблем безпеки та продуктивності, що вимагає збору несемпльованих даних для повної спостережуваності мережі.

Таблиця 1.3 – Порівняння протоколів моніторингу мережі

Характеристика	SNMP	NetFlow
Основний фокус	Моніторинг пристроїв та їх стану	Аналіз мережевого трафіку та потоків даних
Тип даних	Статус пристрою, використання ЦП/пам'яті, інтерфейсу, uptime, помилки	Деталі потоку TCP/IP (IP, порти, протокол, обсяг, DSCP, VLAN ID, MAC-адреса)
Переваги	Стандартизація, масштабованість, моніторинг у реальному часі, оповіщення	Детальний огляд трафіку, управління, виявлення аномалій
Недоліки	Вразливості безпеки (старі версії), складність конфігурації, обмежена деталізація даних	Немає загальної інформації про стан пристроїв, можлива вибірка даних (що обмежує деталізацію)

Загалом, хоча ці протоколи є корисними, вони часто не можуть забезпечити необхідну швидкість та контекст для ефективного управління динамічними змінами в бездротових каналах 5G/Wi-Fi[27]. Вони надають дані, але не завжди можуть інтерпретувати складні взаємозв'язки або передбачати майбутні проблеми. Існуючі методи оптимізації бездротових мереж

поділяються на теоретичні (модельні) та керовані даними (на основі глибокого навчання). Кожен з них має значні обмеження в контексті складних та динамічних мереж 5G/Wi-Fi.

Теоретичні (модельні) методи повністю покладаються на перевірені теоретичні моделі, такі як теорія зв'язку, обробка сигналів та теорія оптимізації. Вони використовують пояснювальні логічні правила та математичні формули для оптимізації мережі, дозволяючи дослідникам розуміти її поведінку.

Проблема таких моделей в тому, що для розв'язання складних проблем часто робляться спрощені припущення, наприклад, про гауссівський шум або лінійні системи. Це призводить до неточних системних моделей та оптимальних рішень. У великомасштабній оптимізації мереж ці методи страждають від надмірної обчислювальної складності, що призводить до тривалого часу висновку, який є непридатним для послуг з жорсткими вимогами до низької затримки[28]. Крім того, вони часто покладаються на статичні правила, які не можуть впоратися з високою розмірністю та непередбачуваністю динамічних мереж.

Ранні методи глибокого навчання використовують нейронні мережі для безпосереднього вивчення політик оптимізації мережі з даних. Вони можуть відображати широкий спектр взаємозв'язків і обробляти складні проблеми, де аналітичні моделі можуть бути недоступними. Їхня перевага полягає у швидкому висновку в режимі онлайн, що сприяє швидкій реакції в динамічних мережах, незважаючи на необхідність навчання в режимі офлайн[4].

Недоліками такого навчання нейронних мереж є те, що велика кількість параметрів вимагає значного обсягу якісних навчальних даних, які часто є дефіцитними в бездротових мережах, а їх збір може бути трудомістким або навіть неможливим. Процес навчання вимагає значних обчислювальних ресурсів, що є проблемою для пристроїв з обмеженим обладнанням. Нейронні мережі часто розглядаються як "чорні скриньки", оскільки їхні внутрішні

механізми важко зрозуміти, що перешкоджає наданню гарантій продуктивності в оптимізації мережі[4]. Вони також можуть стикатися з проблемами точності та затримками, особливо в реальному часі. Простіші моделі RL можуть бути недостатньо складними для вирішення складних проблем спільної оптимізації в динамічних середовищах.

Механізми QoS (Quality of Service) Традиційні підходи до QoS, такі як параметризовані системи (наприклад, IntServ) та пріоритетні системи (наприклад, DiffServ), намагаються забезпечити гарантований рівень обслуговування в IP-мережах.

IntServ виявився немасштабованим для широкосмугових мереж, оскільки базові маршрутизатори мали б керувати тисячами резервувань. Сильні криптографічні протоколи (SSL, VPN) приховують дані, унеможливлюючи глибоку перевірку пакетів для цілей QoS, що створює неприйнятний ризик для клієнтів. Існує також потенціал того, що провайдери можуть навмисно погіршувати якість "best-effort" трафіку, щоб спонукати клієнтів до дорожчих послуг QoS. Надмірне забезпечення мережі, хоча і є альтернативою, обмежене "жадібними" протоколами, такими як TCP, які споживають всю доступну смугу пропускання, та проблемами масштабованості/вартості, що робить його не завжди можливим або економічно доцільним.

Зростаючий розрив між складністю мережі та можливостями традиційних інструментів є очевидним. Сучасні мережі 5G/Wi-Fi стають надзвичайно складними, з динамічними умовами каналу, величезною кількістю підключених пристроїв та різноманітними вимогами до QoS[27]. Традиційні інструменти моніторингу, такі як SNMP та NetFlow, були розроблені для менш динамічних і складних мереж. Їхні обмеження в деталізації, безпеці та здатності до проактивного аналізу створюють критичний розрив, який перешкоджає ефективному управлінню та оптимізації. Цей розрив є не просто незручністю, а фундаментальною

перешкодою для реалізації повного потенціалу 5G/Wi-Fi. Це обґрунтовує необхідність переходу від реактивного моніторингу до адаптивного управління, що може бути досягнуто лише за допомогою інтелектуальних систем.

Аналіз показує, що як модельні, так і чисто керовані даними методи глибокого навчання мають значні обмеження. Модельні методи страждають від спрощених припущень та обчислювальної складності, тоді як чисто DL-методи потребують величезних обсягів даних та страждають від проблеми "чорної скриньки"[4]. Це вказує на те, що оптимальним шляхом є гібридний підхід, який інтегрує інтерпретовані знання предметної області (теорія зв'язку) у нейронні мережі. Це дозволяє зменшити потребу в даних, покращити інтерпретованість та підвищити точність. Це є прямим обґрунтуванням для використання регресійних моделей (лінійної, поліноміальної, випадкового лісу) у пропонованій системі, оскільки вони пропонують баланс між передбачувальною здатністю та інтерпретованістю, що є важливим для інженерного застосування.

1.4 Висновки до розділу

Сучасні бездротові мережі 5G та Wi-Fi (зокрема Wi-Fi 6/6E/7) демонструють значний прогрес у швидкості, ємності та зниженні затримки, пропонуючи безпрецедентні можливості для різноманітних застосувань, від мобільної широкосмугової передачі до промислового інтернету речей. Однак, незважаючи на ці досягнення, вони стикаються з низкою фундаментальних викликів, що призводять до проблем з продуктивності. До таких викликів належать різноманітні форми інтерференції (перешкоди на спільних каналах, сусідня, електромагнітна, фізична, екологічна), затухання сигналу, перевантаження мережі, а також динамічні умови каналу, що проявляються у вигляді частих хендоверів та надходження пакетів не по порядку. Ці фактори

є взаємопов'язаними та створюють складне, непередбачуване середовище, де прості метрики швидкості не відображають реальну якість обслуговування.

Аналіз показав, що традиційні підходи до моніторингу та оптимізації мереж, такі як SNMP та NetFlow, мають суттєві обмеження. Вони не здатні надавати достатньо гранульованих даних у реальному часі, страждають від проблем безпеки та складності конфігурації, а також не можуть ефективно інтерпретувати складні взаємозв'язки в динамічних бездротових середовищах. Подібним чином, теоретичні методи оптимізації, що базуються на спрощених моделях, виявляються обчислювально складними та неадаптивними до швидких змін, тоді як ранні методи глибокого навчання, керовані виключно даними, потребують величезних обсягів навчальних даних та страждають від проблеми "чорної скриньки", що обмежує їхню інтерпретованість та надійність. Механізми QoS також стикаються з проблемами масштабованості та ефективності в умовах сучасних криптографічних протоколів та "жадібних" протоколів передачі даних.

Таким чином, існує критичний розрив між зростаючою складністю бездротових мереж та можливостями існуючих інструментів для їх ефективного управління та оптимізації. Цей розрив вимагає фундаментальної зміни парадигми від реактивного моніторингу до проактивного, предиктивного та адаптивного управління.

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) є ключовим рішенням для подолання цих викликів. ШІ/МН надає можливості для автономного аналізу та прогнозування тенденцій, виявлення аномалій, адаптивного управління ресурсами, самооптимізації та самовідновлення мережі. Застосування регресійних моделей (лінійної, поліноміальної, випадкового лісу) дозволить прогнозувати продуктивність мережі та виявляти приховані закономірності, а використання трансформерів для чат-ботів забезпечить інтерактивну та зрозумілу взаємодію з користувачем.

Отже, розробка інтелектуальної системи аналізу, що поєднує базові тестування, глибокий регресійний аналіз та ШІ-чатування, є не просто бажаною, а критично необхідною. Така система дозволить користувачам не лише моніторити поточний стан мережі, але й розуміти першопричини проблем, прогнозувати майбутню поведінку та отримувати дієві рекомендації для оптимізації. Це забезпечить значне підвищення ефективності бездротових каналів 5G/Wi-Fi, роблячи складний аналіз мережі доступним та дієвим для широкого кола користувачів, що є ключовим для реалізації повного потенціалу сучасних бездротових технологій.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Аналіз існуючих підходів до оптимізації бездротових мереж

Сучасні бездротові мережі 5G та Wi-Fi, стикаються з низкою фундаментальних викликів, що вимагають постійної оптимізації для забезпечення високої продуктивності[1]. Ці виклики охоплюють зростаючі вимоги до пропускної здатності, мінімізації затримок, підтримки масового підключення пристроїв, підвищення енергоефективності, а також ефективного управління інтерференцією та усунення спотворень каналу[6].

Традиційні підходи до оптимізації бездротових мереж, хоча й були ефективними в минулому, виявляються недостатніми для вирішення цих складних та динамічних викликів. Наприклад, схеми модуляції та кодування, які історично були вирішальними для збільшення швидкості та пропускної здатності, були розроблені для точкового зв'язку без урахування складних сценаріїв інтерференції. Вони мають заздалегідь визначені символи сузір'я, нечутливі до інтерференції, що призводить до помилок декодування, коли символи зміщуються з їхньої області декодування. Більшість схем модуляції та кодування наближаються до своїх меж ефективності.

Управління ресурсами покладається на інформацію про стан каналу, що тягне за собою значні накладні витрати та стає неефективним зі зростанням складності та навантаження трафіку в мережах 5G[27]. Ці підходи страждають від системних накладних витрат (до 25% від загальної ємності) і не здатні ефективно масштабуватися зі зростанням кількості користувачів.

Формування променя у міліметровому діапазоні, як це запропоновано стандартом IEEE 802.11ad, базується на вичерпному пошуку найкращих передавальних та приймальних променів. Це вимагає дуже високого часу налаштування (наприклад, 1,8 мс для однієї точки доступу, понад 18 мс для 10

точок доступу з багатьма секторами), що робить координацію декількох точок доступу в умовах мобільних каналів нереалістичною вимогою для 5G[16].

Стандартні рішення для управління інтерференцією часто включають просту фільтрацію або використання багатоантенних можливостей для фокусування на конкретних просторових напрямках. Однак вони розробляються вручну для конкретних типів інтерференції та мають труднощі з інтерференцією від інших систем зв'язку[20]. Гетерогенний характер 5G робить традиційний ортогональний розподіл спектра неефективним.

Управління мобільністю та передача обслуговування передбачали ручне налаштування параметрів інженерами на основі досвіду. Однак вибухове зростання кількості стільників та складна взаємозалежність параметрів у щільних розгортаннях B5G/6G роблять ручне налаштування трудомістким та непрактичним[25]. Успадковані механізми управління мобільністю часто є неефективними, несумісними або непридатними в сценаріях через архітектурний характер та різноманітні вимоги до послуг[32].

Управління потужністю також має свої обмеження. Хоча було запропоновано різні моделі для зменшення енергоспоживання базових станцій, страндартні методи не завжди повністю враховують складність.

Ці обмеження вказують на те, що проблема оптимізації бездротових мереж вийшла за межі можливостей людини або простих алгоритмів. Зростаюча складність, динамізм, масове підключення та жорсткі вимоги до якості обслуговування у мережах 5G/Wi-Fi створюють так звану "стіну складності". Ця ситуація вимагає фундаментального переходу від детермінованої, модельно-орієнтованої оптимізації до адаптивної, керованої даними та часто евристичної оптимізації. Це свідчить про те, що поточний простір проблем вимагає нової парадигми.

Більше того, еволюція мережевих технологій та потреби в оптимізації перебувають у тісному взаємозв'язку. Технології 5G/Wi-Fi, такі як mmWave, Massive MIMO та щільні гетерогенні мережі, впроваджуються для

задоволення зростаючих потреб у швидкості передачі даних, зменшенні затримки та масовому підключенні[12]. Однак ці ж технології створюють нові, більш складні виклики, включаючи посилену інтерференцію, складніші канальні спотворення та більш заплутане управління мобільністю. Наприклад, міліметрова хвиля пропонує широку смугу пропускання, але страждає від значних втрат на трасі та блокування[10], тоді як щільні мережі покращують ємність, але ускладнюють управління інтерференцією та розподіл ресурсів. Цей причинно-наслідковий зв'язок підкреслює, що інтелектуальні системи є не просто бажаним доповненням, а необхідністю для повної реалізації потенціалу основних інновацій[4]. Вони є ключовими для управління внутрішніми компромісами (наприклад, між спектральною ефективністю та енергоефективністю) та виникаючими складностями[20].

Крім того, масштаби та динаміка 5G/Wi-Fi, з їх щільними розгортаннями та величезною кількістю пристроїв, роблять централізоване прийняття рішень схильним до високих накладних витрат та затримок. Це призводить до необхідності переходу від централізованого до розподіленого інтелекту в мережі[5]. Потреба в "самоорганізації" та "децентралізованих" рішеннях стає повторюваною темою і вбачає майбутнє, де інтелект буде розподілений між вузлами мережі (наприклад, базовими станціями, користувацьким обладнанням, периферійними пристроями). Наслідками такого вибору є проблемою для конфіденційності (наприклад, федеративне навчання), масштабованості та чутливості в реальному часі[14]. Що також свідчить про відхід від жорсткого, ієрархічного контролю до більш автономних, спільних мережевих елементів.

2.2 Використання інтелектуальних методів у бездротових мережах

На тлі зростаючої складності та різноманітності вимог до послуг у майбутніх бездротових системах, використання алгоритмів штучного

інтелекту для проектування та оптимізації мереж на різних рівнях стає необхідністю[4]. Традиційні підходи, що часто базуються на теорії оптимізації, обмежені наявністю відповідних математичних моделей, які стає все складніше формулювати для складних бездротових мереж. Це підкреслює, що інтелектуальні системи є не просто бажаним доповненням, а необхідністю для повної реалізації потенціалу основних інновацій[17].

Методи, керовані інтелектуальним аналізом, зокрема машинне навчання та глибоке навчання з підкріпленням, пропонують адаптивні, керовані даними рішення, які можуть постійно навчатися на основі мережевих умов для оптимізації продуктивності[29]. Вони усувають недоліки звичайних моделей, таких як розподіл на основі інформації про стан каналу, пропонуючи менші витрати та кращу адаптивність.

Роль цих систем виходить за межі оптимізації параметрів фізичного рівня, він є ключовим для архітектурних змін вищого рівня. Такі, як віртуалізація мережевих функцій та сегментація мережі, вважаються ключовими архітектурними елементами. Підтримка динамічного та масштабованого управління мережею, яке спрощує гнучкий розподіл ресурсів. Сегментація мережі, що дозволяє динамічно створювати віртуальні мережі поверх єдиної фізичної інфраструктури. Така система виступає, як незамінний інструмент для управління віртуалізованими та сегментованими мережами, забезпечуючи адаптивність у реальному часі та оптимізацію ресурсів. Цей процес перетворює статичне обладнання на гнучкі, інтелектуальні ресурси, що означає системну інтеграцію, а не лише ізольовані застосування. Розглянемо детальніше різні інтелектуальні методи та їх застосовність у бездротових мережах.

Навчання з підкріпленням (RL) та глибоке навчання з підкріпленням (DRL). RL дозволяє системі (агенту) вивчати оптимальну поведінку шляхом проб і помилок, взаємодіючи зі своїм середовищем та отримуючи винагороди або штрафи. Це робить його дуже придатним для динамічних та складних

бездротових середовищ, де традиційні підходи, засновані на правилах, є недостатніми[24, 29].

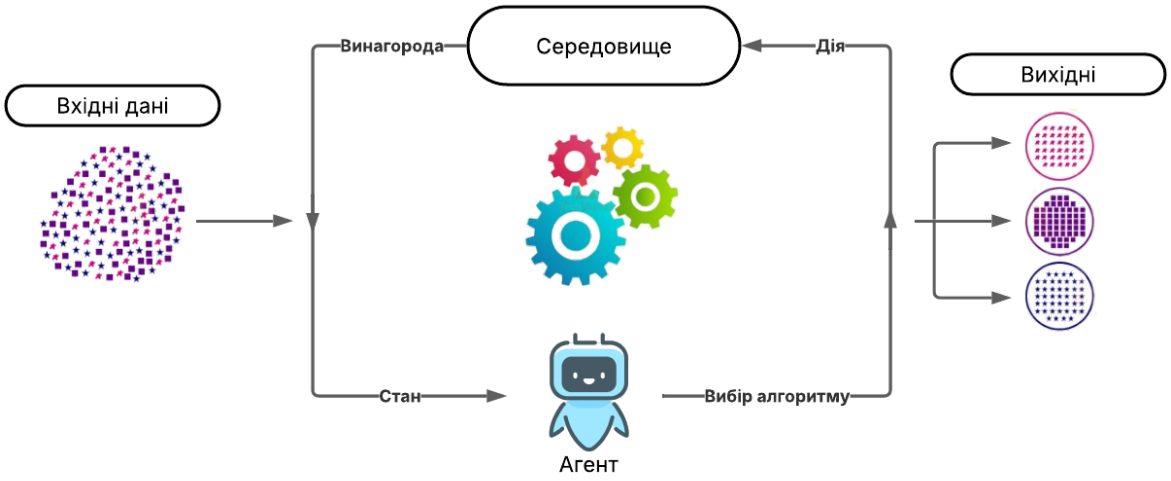

Рисунок 2.1 – Навчання з підкріпленням

DRL поєднує здатність глибокого навчання обробляти великі, багатовимірні дані (наприклад, необроблені сенсорні дані або стани мережі) зі здатністю RL приймати рішення. Може застосовуватись для динамічного налаштування параметрів MAC-рівня, таких як вікна конкуренції в Wi-Fi, спільної оптимізації формування променя, управління потужністю та координації інтерференції в 5G , а також доступу до каналу з урахуванням пріоритету трафіку в співіснуванні 5G NR-U/Wi-Fi[6].

Федеративне навчання (FL) – це розподілений метод машинного навчання, де окремі мережеві пристрої (наприклад, користувацьке обладнання, станції) локально навчають моделі, використовуючи свої децентралізовані набори даних, а потім завантажують лише параметри моделі (не необроблені дані) на центральний сервер для агрегації[14, 15].

Переваги включають більш точне та надійне навчання моделі в динамічних бездротових середовищах, зменшення накладних витрат на зв'язок, підвищення надійності та точності моделі, а також вирішення проблем конфіденційності шляхом локалізації даних. Застосовується для оптимізації

комунікаційних мереж, інтелектуального доступу до каналу в щільних розгортаннях Wi-Fi та розподілу ресурсів у тестових стендах 5G з периферійними пристроями[22].

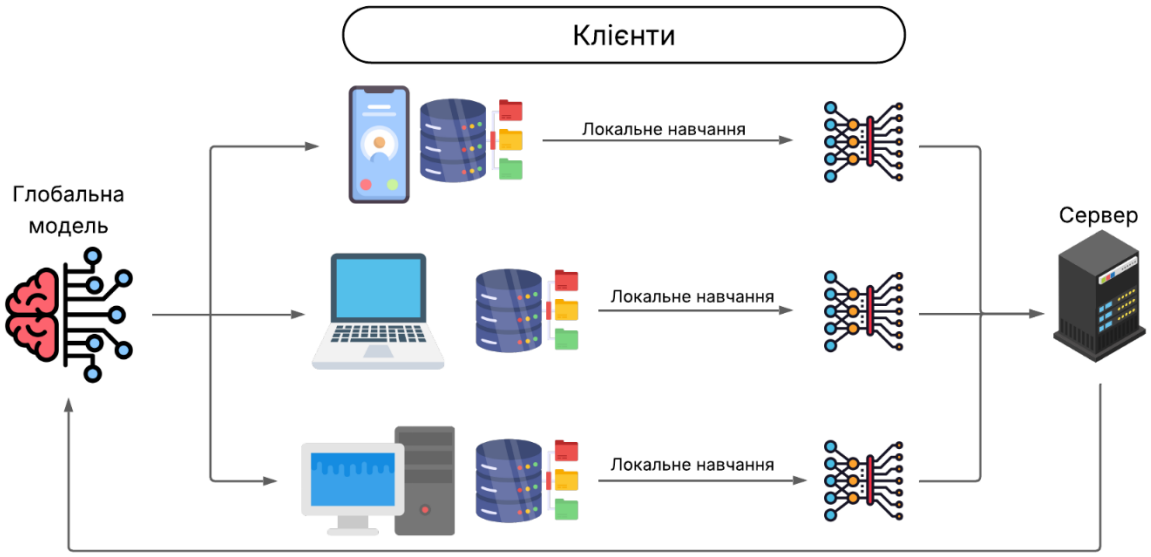

Рисунок 2.2 – Діаграма протоколу федеративного навчання зі пристроями, що навчають глобальну модель штучного інтелекту

Навчання без вчителя (Unsupervised Learning) – категорія алгоритмів машиного навчання яке вивчає закономірності з немаркованих даних[2]. Наприклад, навчання без вчителя може використовуватися для мережевого нарізання в мережах Wi-Fi для досягнення диференціації послуг та гарантій QoS.

Алгоритм з доповненням стану навчає нейронну мережеву політику в автономному режимі для оптимізації функції Лагранжа, при цьому динаміка подвійних змінних оновлюється в режимі онлайн. Це дозволяє динамічно адаптувати рішення щодо нарізання та перемикання політик для підтримки обмежень QoS.

Навчання з учителем (наприклад, CNN, LSTM): Згорткові нейронні мережі (CNN) можуть використовуватися для виявлення та класифікації кростехнологічної інтерференції за допомогою миттєвих знімків інформації

про стан каналу (CSI)[3]. Мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) ефективні для захоплення довгострокових залежностей у послідовних даних, що підходить для прогнозування мережевого трафіку [26].

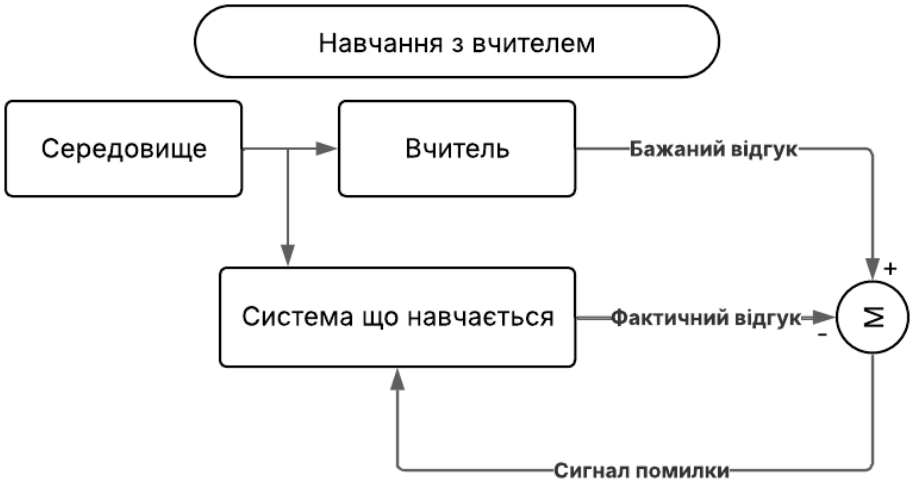

Рисунок 2.3 – Навчання з учителем

Застосування інтелектуальних систем у бездротових мережах охоплює широкий спектр функцій, що значно підвищують їх ефективність. Динамічний розподіл ресурсів є одним з ключових напрямків, де методи, керовані інтелектуальні системи, забезпечують оптимізацію спектра, обчислювальної потужності та енергетичних ресурсів у реальному часі, навчаючись на основі мережевих умов та прогнозуючи трафік[29]. Це включає динамічний розподіл віртуальних мережевих функцій у 5G[27]. Наприклад, алгоритми машинного навчання можуть прогнозувати пікові години трафіку для конкретних послуг, щоб заздалегідь виділяти ресурси.

Прогнозування трафіку за допомогою інтелектуальних систем покращує обчислювальну ефективність у реальному часі та забезпечує надійність мережі шляхом прогнозування обсягів трафіку, виявлення загроз безпеки та оптимізації інженерії трафіку[9].

Таблиця 2.1 – Застосування інтелектуальних методів для оптимізації

Метод	Застосування	Переваги
Навчання з підкріпленням	Динамічне налаштування параметрів MAC, спільна оптимізація формування променя, управління потужністю та інтерференцією	Адаптивність у реальному часі, підвищення пропускної здатності та зниження BLER.
Федеративне навчання	Оптимізація доступу до каналу Wi-Fi, розподіл ресурсів на периферії мережі	Зниження накладних витрат на зв'язок, підвищення конфіденційності даних.
Навчання без вчителя	Мережеве нарізання для диференціації послуг та гарантій QoS	Динамічна адаптація рішень щодо, гарантії QoS.
Навчання з учителем	Прогнозування трафіку, виявлення кростехнологічної інтерференції (CTI)	Точне прогнозування, класифікація проблем.

Моделі глибокого навчання можуть захоплювати довгострокові залежності для прогнозування мережевого трафіку, що дозволяє вживати заходів для зменшення перевантаження.

Інтелектуальне зменшення інтерференції досягається завдяки моделям, які можуть ідентифікувати та класифікувати різні типи інтерференції (наприклад, CTI, перехідну EMI) та розробляти адаптивні стратегії для її відхилення[3].

Адаптивна модуляція та кодування (AMC) за допомогою RL-фреймворків дозволяє базовим станціям динамічно вибирати відповідні схеми модуляції та кодування (MCS) на основі індикаторів якості каналу (CQI) для максимізації спектральної ефективності при збереженні низького рівня помилок блоку (BLER). Це забезпечує більшу гнучкість та адаптивність порівняно з фіксованими таблицями пошуку[25].

Самоорганізуючі мережі є центральним елементом концепції, що забезпечує автономне балансування навантаження, мінімізацію інтерференції, розподіл спектра та адаптацію потужності[5]. Це зменшує потребу в ручному налаштуванні та оптимізації в дедалі складніших та щільніших мережах. Мережеве нарізання автоматизується, що дозволяє приймати рішення в реальному часі, використовувати прогнозну аналітику та адаптивне управління для задоволення різноманітних вимог QoS для різних віртуальних мереж.

Ефективність інтелектуальних систем безпосередньо залежить від якості та доступності мережевих даних. Це створює новий набір викликів, пов'язаних зі збором, обробкою, зберіганням та безпекою даних. Зростання федеративного навчання вказує на перехід до розподіленого інтелекту даних, але також підкреслює потребу в надійних механізмах агрегації моделей та забезпечення справедливості між різними джерелами даних[14].

Кінцева мета інтелектуальних систем в бездротових мережах — не просто "оптимізувати", а досягти "самооптимізації" та "автономії". Це означає, що системи можуть безперервно моніторити, навчатися, адаптуватися та приймати рішення без втручання людини[27]. Це представляє довгострокову перспективу справді інтелектуальних мереж, які можуть керувати власною складністю. Це має наслідки для надійності мережі, експлуатаційних витрат та здатності масштабуватися до безпрецедентних рівнів. Однак це також викликає питання щодо довіри та потенційних непередбачених наслідків у повністю автономних системах.

2.3 Вибір підходу для розробки інтелектуальної системи

Розробка складної інтелектуальної системи потребує надійного та функціонально насиченого середовища розробки. У цьому проєкті було обрано інтегроване середовище PyCharm, створене компанією JetBrains, яке

зарекомендувало себе як один із найпотужніших інструментів для програмування мовою Python. Його переваги полягають у глибокій інтеграції, що дозволяє ефективно реалізовувати проєкти, орієнтовані на машинне навчання, обробку даних та штучний інтелект.

Таблиця 2.2 – Порівняння середовищ розробки

Середовище	Ключові переваги	Ключові недоліки
PyCharm	Глибока інтеграція з Python, потужний відладчик, інструменти рефакторингу, управління віртуальними середовищами, нативна підтримка ML/DL бібліотек, інтеграція Jupyter (професійна версія)	Може бути ресурсомістким, крутіша крива навчання
VS Code	Легкий, високо налаштовуваний, багатомовний, інтеграція Git, підтримка Jupyter через розширення	Менш глибока інтеграція з Python "з коробки", вимагає значної конфігурації через розширення
Jupyter Notebook	Інтуїтивний для дослідження даних, вбудована візуалізація, швидкі експерименти з кодом	Не ідеальний для великих проєктів, складних файлових структур, проблем з контролем версій

PyCharm забезпечує зручну роботу з ключовими бібліотеками, необхідними для реалізації цілей системи, зокрема NumPy, Pandas, Scikit-learn, PyTorch та Hugging Face. Це дозволяє уникнути постійного перемикання між різними інструментами і зосередитися на розв'язанні прикладних завдань. Істотною перевагою є наявність інтелектуального автодоповнення, перевірки помилок у реальному часі, а також потужного відлагоджувача, що відіграє ключову роль при створенні складних моделей і модулів, зокрема при роботі з архітектурами трансформерів. Ці функції підвищують ефективність розробки та дозволяють зменшити кількість помилок на ранніх етапах.

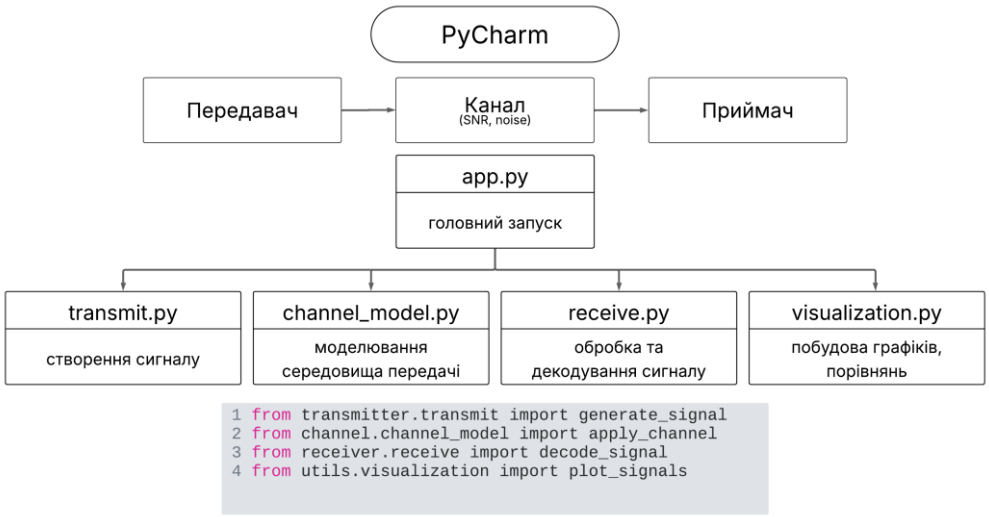

Рисунок 2.4 – Структура розробки PyCharm

Особливо важливим фактором для цього проєкту є підтримка багатомодульної структури. Система включає низку взаємопов'язаних компонентів — від моніторингу мережі до інтелектуального чат-бота — і потребує середовища, здатного забезпечити керованість, масштабованість і підтримку складної логіки. У цьому контексті PyCharm перевершує Jupyter Notebook, який хоча й зручний для швидкого прототипування, але суттєво поступається у підтримці великих проєктів, зокрема через обмеження у роботі з файловими структурами та контролем версій.

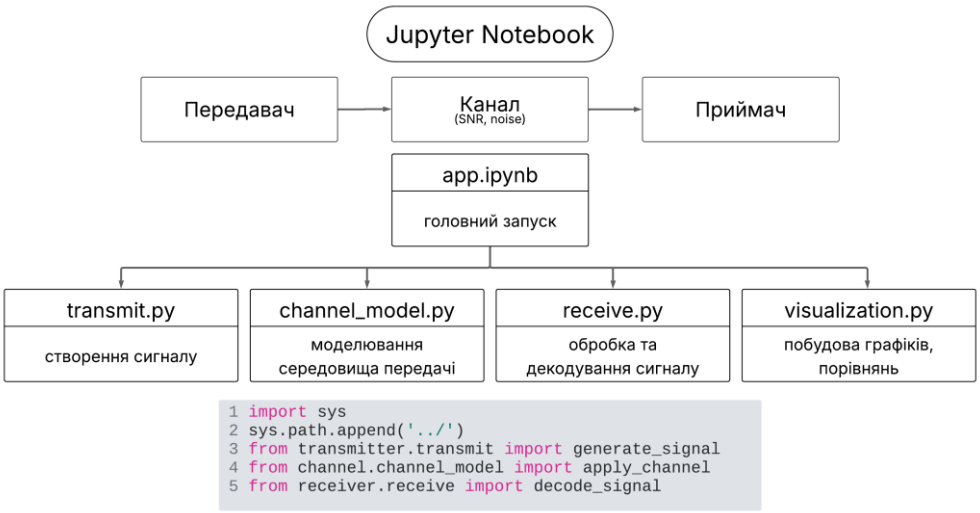

Рисунок 2.5 – Структура розробки Jupyter Notebook

Іншою популярною альтернативою є Visual Studio Code, який приваблює своєю гнучкістю та підтримкою великої кількості мов програмування. Проте для повноцінної роботи з Python він часто вимагає додаткового налаштування та встановлення численних розширень. Це збільшує складність конфігурації та створює потенційні точки відмови. Натомість PyCharm із «коробки» надає усі необхідні інструменти, що мінімізує часові витрати на підготовку робочого середовища.

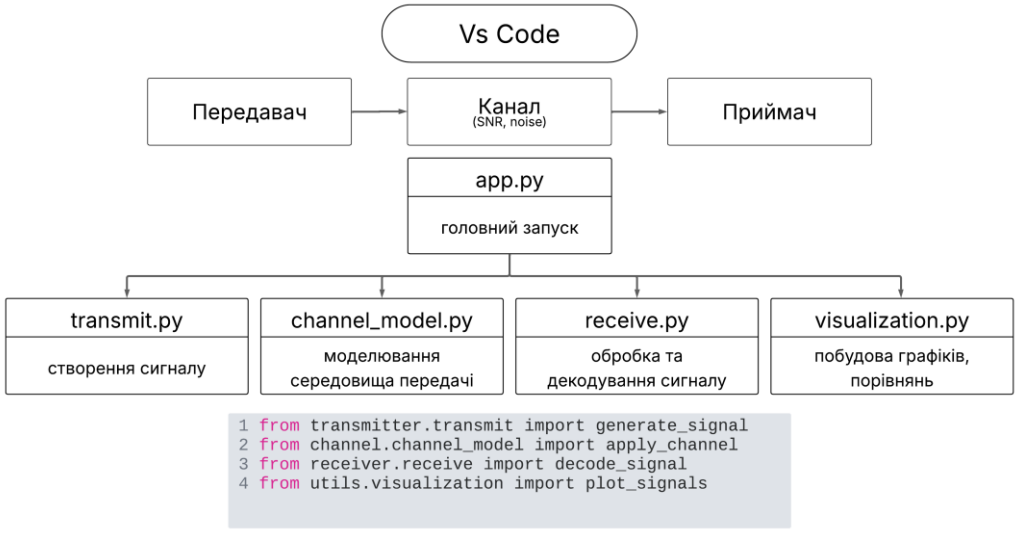

Рисунок 2.6 – Структура розробки Visual Studio Code

Ще одним аргументом на користь PyCharm є його вбудоване управління віртуальними середовищами, що значно спрощує роботу з численними залежностями, властивими сучасним проєктам зі сфери машинного навчання. Це сприяє створенню відтворюваного середовища та усуває проблеми, пов’язані з несумісністю бібліотек, що особливо актуально при розгортанні системи на різних платформах.

Python сьогодні є фактичним стандартом у сфері штучного інтелекту, машинного навчання та науки про дані, що зумовлено поєднанням технічних і концептуальних переваг, які цілком відповідають вимогам до створення інтелектуальної системи аналізу безпровідних каналів зв’язку. Його

популярність пояснюється не лише простотою у використанні, а й здатністю вирішувати широкий спектр завдань — від попередньої обробки даних до складного глибинного навчання.

Однією з головних причин такої популярності є широка екосистема спеціалізованих бібліотек, які охоплюють майже всі напрями інтелектуальних систем та обробки даних. Він забезпечує інтеграцію з усіма сучасними потужними інструментами, що дозволяє ефективно працювати з даними, реалізовувати алгоритми навчання, моделювати складні процеси та створювати повноцінні інтелектуальні модулі. Наявність готових, добре протестованих рішень значно скорочує час розробки і дозволяє зосередитись на дослідницьких аспектах, замість розробки низькорівневого функціоналу.

Гнучкість Python дозволяє поєднувати різні парадигми програмування від об’єктно-орієнтованої до функціональної, що є актуальним при розробці модульних інтелектуальних систем. Його сумісність із мовами нижчого рівня, такими як C чи C++, відкриває можливості для побудови високопродуктивних рішень, в яких критичні частини виконуються на низькорівневому рівні, тоді як загальна логіка і оркестрація залишаються у Python. Така архітектура особливо ефективна для завдань, пов’язаних із чисельним моделюванням, обробкою великих обсягів мережевих даних або реалізацією складних нейронних мереж.

У контексті порівняння з іншими мовами програмування Python демонструє ряд переваг. Наприклад, мова Java, вирізняється стабільністю, але потребує більшої кількості зусиль для досягнення тієї ж функціональності, яку Python надає, зокрема через складніший синтаксис та меншу кількість нативних бібліотек для машинного навчання. Що ж до C++, то ця мова є надзвичайно потужною, однак складною у використанні, особливо для швидкого прототипування та досліджень, де Python виявляється значно ефективнішим інструментом.

Таблиця 2.3 – Порівняння мов програмування

Мова	Переваги	Недоліки
Python	Велика екосистема бібліотек (Scikit-learn, TensorFlow, PyTorch, Pandas, NumPy), простота та читабельність, гнучкість, швидке прототипування, кросплатформність, активна спільнота	Дещо повільніший для обчислювально інтенсивних завдань (хоча компенсується оптимізованими бібліотеками), динамічна типізація може вимагати більше тестування.
Java	Продуктивність, масштабованість, надійна структура для великих корпоративних застосунків, статична типізація (менше помилок під час виконання)	Крутіша крива навчання, повільніша розробка, менш обширна та зручна для початківців екосистема бібліотек ШІ порівняно з Python.
C++	Чудова продуктивність, низькорівневий доступ до апаратного забезпечення, ефективне управління пам'яттю, підтримка паралелізму та багатопоточності	Значно крутіша крива навчання, повільніша розробка, відсутність високоякісних бібліотек машиного навчання.

Практичне застосування Python у системі аналізу безпровідних каналів проявляється в його здатності працювати з великими обсягами даних, які генеруються під час вимірювання параметрів мереж (таких як затримка, пропускна здатність, втрата пакетів тощо). Бібліотеки Pandas і NumPy дозволяють ефективно обробляти ці дані, здійснювати попередній аналіз, фільтрацію, нормалізацію та агрегацію. Моделі машинного навчання, реалізовані у Scikit-learn та PyTorch, використовуються для побудови прогнозних моделей, класифікації станів мережі та виявлення аномалій. Крім

того, фреймворки трансформерів (наприклад, Hugging Face Transformers) дозволяють інтегрувати модулі обробки природної мови — зокрема, для створення інтерактивного інтерфейсу або чат-бота, здатного допомагати в інтерпретації результатів.

Окремо слід відзначити роль як середовища інтеграції, здатного поєднати численні ШІ-компоненти в єдину систему. Це особливо актуально для інтелектуальних рішень, які використовують комбінацію методів: глибокого навчання, навчання з підкріпленням, методів оптимізації та статистичного аналізу. У цьому сенсі Python виступає як платформа, яка забезпечує не лише реалізацію окремих моделей, а й їхню взаємодію, обмін даними та узгоджену роботу в межах цілісного програмного комплексу.

2.4 Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено всебічний аналіз методів та технологій підвищення ефективності бездротових каналів зв'язку, зокрема в контексті сучасних мереж 5G та Wi-Fi. Виявлено, що традиційні підходи до оптимізації виявилися недостатніми для вирішення цих складних та динамічних проблем, що призвело до так званої "стіни складності" та необхідності фундаментального переходу до нової парадигми управління мережею.

Застосування інтелектуальних методів, зокрема машинного навчання (ML) та глибокого навчання з підкріпленням (DRL), визнано критично важливим для подолання цих викликів. Ці методи пропонують адаптивні, керовані даними рішення, здатні постійно навчатися на основі мережевих умов для оптимізації продуктивності.

Розглянуто різні інтелектуальні підходи, включаючи навчання з підкріпленням, федеративне навчання, навчання без вчителя та навчання з учителем, а також їхні конкретні застосування для динамічного розподілу ресурсів, прогнозування трафіку, зменшення інтерференції, адаптивної

модуляції та кодування, а також для самоорганізуючих мереж. Підкреслено, що інтеграція штучного інтелекту є ключовою для архітектурних змін вищого рівня, таких як віртуалізація мережевих функцій та мережеве нарізання, що дозволяє досягти самооптимізації та автономії мережі.

Обґрунтовано вибір підходу для розробки інтелектуальної системи. PyCharm був обраний як основне інтегроване середовище розробки завдяки його глибокій інтеграції з Python, потужним інструментам налагодження та рефакторингу, а також нативній підтримці бібліотек машинного та глибокого навчання. Python визнано оптимальною мовою програмування завдяки його багатій екосистемі бібліотек для інтелектуальноо аналізу, простоті та читабельності, гнучкості та активній спільноті.

Для реалізації функціоналу системи було обрано ключові бібліотеки: speedtest для збору мережевих даних, pandas та numpy для ефективної обробки та аналізу даних, scikit-learn для регресійного аналізу та прогнозування, transformers та torch для реалізації інтелектуального чат-асистента та потенційних майбутніх застосувань трансформерних моделей у бездротових комунікаціях, а також altair для інтерактивної візуалізації даних. Цей гібридний підхід до систем інтелектуального аналізу забезпечує баланс між інтерпретованістю та розширеними можливостями, що є критично важливим для інженерних застосувань.

3. РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛІВ

3.1 Загальна архітектура та структурні компоненти системи

Розроблена система є модульною веб-програмою, створеною за допомогою мови програмування Python та фреймворку Streamlit. Вибір цих інструментів обґрунтований потребою у швидкій розробці інтерактивного веб-інтерфейсу та демонстрації функціонального прототипу. Streamlit дозволяє ефективно реалізувати основні інтелектуальні функції, мінімізуючи витрати на розробку інтерфейсу користувача.

Архітектура системи логічно сегментована на чотири основні функціональні блоки, кожен з яких відповідає за окремий аспект аналізу мережі та взаємодії з користувачем. Зв'язок між модулями та збереження даних протягом одного сеансу користувача реалізується через внутрішні функції та змінні Streamlit session_state, що забезпечує цілісність даних та безперервність потоку інформації під час взаємодії користувача з системою.

Таблиця 3.1 – Ключові компоненти системи та їх технологічна реалізація

Компонент системи	Основне призначення	Бібліотеки
Модуль моніторингу та тестування	Збір даних про якість мережі	speedtest
Модуль обробки та візуалізації даних	Аналіз, агрегація та графічне представлення результатів	pandas, numpy, altair, json, datetime
Модуль інтелектуального аналізу та прогнозування	Регресійний аналіз та прогнозування якості мережі	sklearn
Модуль інтерактивного асистента	Взаємодія з користувачем у форматі Q&A	transformers, torch

Модуль моніторингу та тестування мережевих параметрів є базовим рівнем системи, відповідальним за автоматизоване збирання критично важливих показників продуктивності мережі. Він використовує бібліотеку speedtest-cli, яка є інтерфейсом командного рядка для проведення комплексних тестів швидкості мережі. Зібрані дані охоплюють основні параметри, необхідні для діагностичної оцінки якості безпровідного каналу. Блок-схема алгоритму роботи модуля наведена на рисунку (3.1).

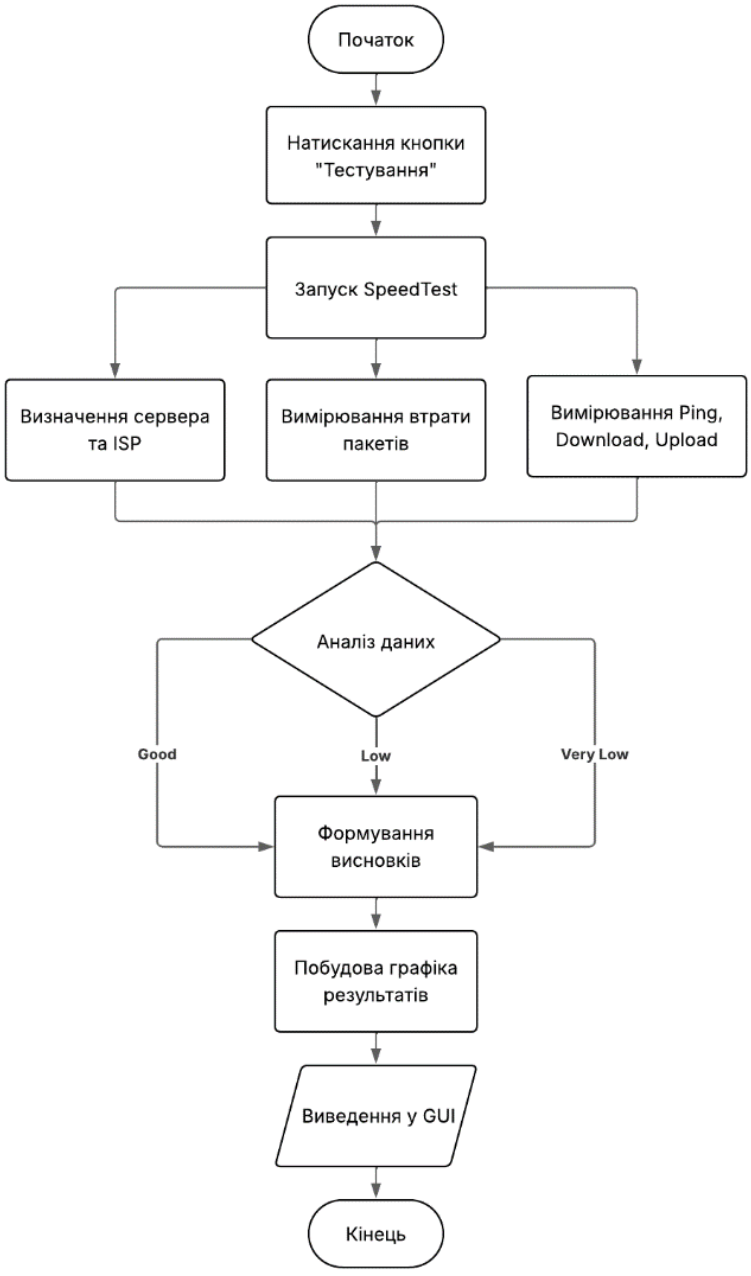

Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму роботи модуля моніторингу

Модуль зчитує наступні мережеві параметри: ім'я провайдера та сервер для тестування, швидкість завантаження (Download) та вивантаження (Upload), показник пінгу (див. рис. 3.2). Крім того, втрачені пакети визначаються за допомогою додаткового тесту ping, що виконується через командну оболонку операційної системи. Це дозволяє оцінити надійність з'єднання, виявляючи відсоток втрачених даних під час передачі.

```python
def test_speed():  2 usages
    """
    Виконує повний тест швидкості, пінгу, втрат пакетів, і зберігає результат.
    """
    st = speedtest.Speedtest()
    st.get_best_server()
    isp = st.config['client']['isp']
    server = st.results.server['name']
    download_bps = st.download()
    upload_bps = st.upload()
    ping_ms = st.results.ping

    download_mbps = round(download_bps / 1e6, 2)
    upload_mbps = round(upload_bps / 1e6, 2)
    ping_ms = round(ping_ms, 1)
    ping_google = test_ping()
    packet_loss = test_packet_loss()
```

Рисунок 3.2 – Функція для модуля тестування мережевих параметрів

Обробка та візуалізація даних: після отримання даних цей відповідний модуль обробляє результати мережевого тестування, перетворюючи їх на структурований аналітичний формат (див. рис. 3.3). Він підтримує історію тестів, специфічну для сесії, що дозволяє проводити негайний статистичний аналіз та виявляти тенденції.

```python
def analyze_results(download, upload, ping, packet_loss):  2 usages
    """
    Аналізує результати тесту та повертає словник з оцінками кожного параметра.
    Наприклад, визначає, чи є проблеми зі швидкістю, затримкою або втратами.
    """
    analysis = {
        "download_status": "good",
        "upload_status": "good",
        "ping_status": "good",
        "packet_loss_status": "good"
    }

    # Аналіз швидкості завантаження
    if download < 5:
        analysis["download_status"] = "very low"
    elif download < 20:
        analysis["download_status"] = "low"
```

Рисунок 3.3 – Функція для обробки та аналізу результатів

Для генерації інтерактивних та інформативних графічних представлень використовується бібліотека altair, яка дозволяє користувачам візуально інтерпретувати продуктивність мережі з часом та виявляти аномалії. На основі зібраних результатів формується аналітична таблиця, яка дозволяє зберігати історію тестів в рамках сесії(див. рис. 3.4).

Модуль підтримує фільтрацію даних за такими параметрами, як дата, тип підключення та сервер. Графіки реалізовані для відображення зміни швидкості з часом, порівняння пінгу та швидкості, а також для виявлення аномалій, таких як різкі стрибки затримки.

```
def plot_speeds(download, upload):  2 usages
    """
    Створює стовпчикову діаграму для порівняння швидкостей download/upload.
    Повертає Altair Chart.
    """
    df = pd.DataFrame({
        'Type': ['Download', 'Upload'],
        'Speed (Mbps)': [download, upload]
    })
    chart = alt.Chart(df).mark_bar().encode(
        x='Type:N',
        y='Speed (Mbps):Q',
        color='Type:N'
    ).properties(title='Швидкість інтернету (Мбіт/с)')
    return chart
```

Рисунок 3.4 – Функція для візуалізації графіку першого модуля

Модуль інтелектуального аналізу та прогнозування є основним інтелектуальним компонентом системи, що застосовує алгоритми машинного навчання для виявлення закономірностей та прогнозування якості мережі. Він використовує моделі регресії для аналізу 10 останніх вимірювань мережі, що сприяє оцінці ефективності каналу майже в реальному часі.

Блок-схема алгоритму роботи модуля наведена на рисунку (3.5). Бібліотека sklearn надає надійну основу для реалізації та оцінки цих прогностичних моделей.

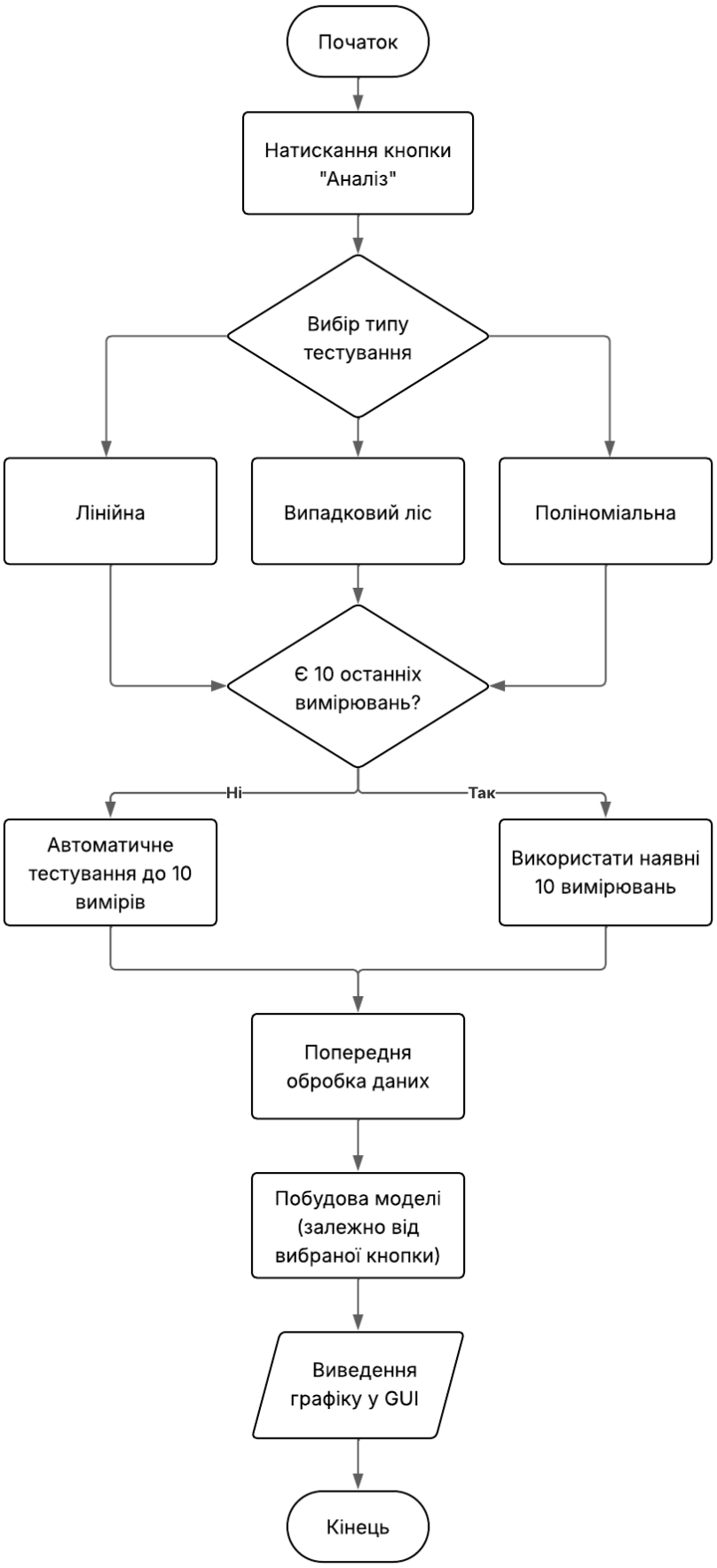

Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму роботи модуля аналізу та прогнозування

У модулі реалізовано три моделі регресії:

а) лінійна регресія (див. рис. 3.6) – ця модель використовується для встановлення лінійної залежності між вхідними мережевими параметрами та якістю з'єднання.

```
def perform_linear_regression():  2 usages
    filtered = ensure_minimum_data()
    x = np.array([entry.get("ping_google_ms") or entry.get("ping_speedtest_ms") for entry in filtered]).reshape(-1, 1)
    y = np.array([entry.get("download_mbps") for entry in filtered])

    model = LinearRegression()
    model.fit(x, y)
    y_pred = model.predict(x)

    df = pd.DataFrame({
        'ping': x.flatten(),
        'download_speed': y,
        'y_pred': y_pred
    })

    chart = alt.Chart(df).mark_line().encode(
        x='ping',
        y='y_pred',
        color=alt.value('blue'),
        tooltip=['ping', 'download_speed', 'y_pred']
    ).properties(title='Лінійна регресія: Швидкість завантаження vs Пінг')

    points = alt.Chart(df).mark_circle(size=100).encode(
        x='ping',
        y='download_speed',
        color=alt.value('red'),
        tooltip=['ping', 'download_speed']
    )

    formula = f"Лінійна регресія: y = {model.intercept_:.2f} + {model.coef_[0]:.2f}x"
```

Рисунок 3.6 – Функція для роботи лінійної регресії

б) Поліноміальна регресія (див. рис. 3.7) – ця модель дозволяє виявляти нелінійні залежності, перетворюючи вхідні ознаки в поліноміальні, а потім застосовуючи лінійну регресію до цих перетворених ознак.

```
def perform_polynomial_regression():  2 usages
    filtered = ensure_minimum_data()
    x = np.array([entry.get("ping_google_ms") or entry.get("ping_speedtest_ms") for entry in filtered]).reshape(-1, 1)
    y = np.array([entry.get("download_mbps") for entry in filtered])

    poly = PolynomialFeatures(degree=2)
    x_poly = poly.fit_transform(x)
    model = LinearRegression()
    model.fit(x_poly, y)
    y_pred = model.predict(x_poly)

    df = pd.DataFrame({
        'ping': x.flatten(),
        'download_speed': y,
        'y_pred': y_pred
    })

    chart = alt.Chart(df).mark_line().encode(
        x='ping',
        y='y_pred',
        color=alt.value('blue'),
        tooltip=['ping', 'download_speed', 'y_pred']
    ).properties(title='Поліноміальна регресія: Швидкість завантаження vs Пінг')

    points = alt.Chart(df).mark_circle(size=100).encode(
        x='ping',
        y='download_speed',
        color=alt.value('red'),
        tooltip=['ping', 'download_speed']
    )
    formula = f"Поліноміальна регресія: y = {model.intercept_:.2f} + {model.coef_[1]:.2f}x + {model.coef_[2]:.2f}x^2"
```

Рисунок 3.7 – Функція для роботи поліноміальної регресії

в) випадковий ліс (див. рис. 3.8) – цей алгоритм є ансамблевим методом, який будує множину дерев рішень та усереднює їхні прогнози для підвищення точності та стабільності.

```
def perform_random_forest():  2 usages
    filtered = ensure_minimum_data()
    x = np.array([entry.get("ping_google_ms") or entry.get("ping_speedtest_ms") for entry in filtered]).reshape(-1, 1)
    y = np.array([entry.get("download_mbps") for entry in filtered])

    model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
    model.fit(x, y)
    y_pred = model.predict(x)

    df = pd.DataFrame({
        'ping': x.flatten(),
        'download_speed': y,
        'y_pred': y_pred
    })

    chart = alt.Chart(df).mark_line().encode(
        x='ping',
        y='y_pred',
        color=alt.value('blue'),
        tooltip=['ping', 'download_speed', 'y_pred']
    ).properties(title='Рандомний ліс: Швидкість завантаження vs Пінг')

    points = alt.Chart(df).mark_circle(size=100).encode(
        x='ping',
        y='download_speed',
        color=alt.value('red'),
        tooltip=['ping', 'download_speed']
    )

    formula = "Рандомний ліс: Прогнозування швидкості завантаження"
```

Рисунок 3.8 – Функція для роботи випадкового лісу

Для аналізу машинного навчання використовується 10 останніх вимірювань(див. рис. 3.9). Цей підхід забезпечує фокус на короткостроковому прогнозуванні та виявленні аномалій, надаючи актуальні відомості про поточний стан мережі. Хоча це є обчислювально ефективним, даний підхід обмежує здатність моделі виявляти довгострокові закономірності. Для розширення прогностичних можливостей у майбутньому може бути розглянута інтеграція більшого набору даних.

```
def ensure_minimum_data():  3 usages
    """
    Завантажує історію, якщо даних менше за MIN_MEASUREMENTS — добирає нові виміри.
    Повертає оновлений список даних.
    """
    try:
        data = load_saved_data()
    except FileNotFoundError:
        data = []

    # Фільтруємо валідні записи
    valid_entries = [entry for entry in data if
                     (entry.get("ping_google_ms") is not None or entry.get("ping_speedtest_ms") is not None)
                     and entry.get("download_mbps") is not None]

    while len(valid_entries) < MIN_MEASUREMENTS:
        new_entry = get_network_data()
        valid_entries.append(new_entry)
        data.append(new_entry)
        save_data(data)

    return valid_entries
```

Рисунок 3.9 – Функція завантаження останніх 10 вимірювань

Модуль інтелектуального чат-асистента покращує взаємодію з користувачем, надаючи інтерфейс природної мови для запитів, пов'язаних з продуктивністю мережі та функціональністю системи.

Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритму роботи інтелектуального чат-асистента

Побудований на основі трансформерної моделі з бібліотеки transformers, він забезпечує діалог у форматі питання-відповідь, отримуючи відповіді з попередньо визначеного контексту поширених запитів користувачів та даних, згенерованих системою. Блок-схема алгоритму роботи модуля наведена на рисунку (3.10).

Функціональність модуля включає введення запитань користувачем (наприклад, "Як змінити пароль мережі?" або "Що таке лінійна регресія?"). Система шукає відповіді у внутрішньому текстовому контексті або шляхом обробки результатів, отриманих від інших модулів(див. рис. 3.11-3.12).

```python
# Генерація відповіді на основі запитання
def generate_qa_response(question):  2 usages
    context_list = load_contexts()

    # Отримуємо вектор запитання
    question_embedding = get_embeddings([question])[0].numpy()

    # Підготовка векторів збережених питань
    stored_questions = [context["question"] for context in context_list]
    stored_embeddings = get_embeddings(stored_questions).numpy()

    # Обчислення схожості між запитанням і збереженими питаннями
    similarities = cosine_similarity( X: [question_embedding], stored_embeddings)
    most_similar_idx = np.argmax(similarities)

    # Якщо схожість достатньо висока, повертаємо відповідь
    if similarities[0][most_similar_idx] > 0.5:  # Ви можете налаштувати поріг
        return context_list[most_similar_idx]["answer"]
    else:
        # Якщо схожість низька, використовуємо модель для генерації відповіді
        context = "Переформулюй своє запитання"
        result = qa_pipeline(question=question, context=context)
        return result["answer"]
```

Рисунок 3.11 – Функція генерації відповіді на основі запитання

wireless_networks_faq.json

```
[
  {
    "question": "Як підключити пристрій до Wi-Fi мережі?",
    "answer": "Для підключення до Wi-Fi відкрийте налаштування безпровідних мереж на пристрої, виберіть свою мережу, введіть пароль і нат
  },
  {
    "question": "Як налаштувати бездротовий інтернет на пристрої?",
    "answer": "Увійдіть у меню Wi-Fi на пристрої, знайдіть потрібну мережу, введіть пароль і підтвердіть підключення."
  },
  {
    "question": "Чому мій пристрій не підключається до Wi-Fi?",
    "answer": "Переконайтеся, що пароль введено правильно, мережа активна, а маршрутизатор працює. Спробуйте перезавантажити пристрій або
  },
  {
    "question": "Як відновити пароль Wi-Fi, якщо його забув?",
    "answer": "Перевірте наклейку на роутері або увійдіть у налаштування маршрутизатора через веб-інтерфейс і подивіться пароль у розділі
  },
  {
    "question": "Як змінити ім'я Wi-Fi мережі (SSID)?",
    "answer": "Зайдіть у налаштування роутера через IP-адресу, знайдіть параметри SSID у розділі бездротових налаштувань та введіть нове
  },
```

Рисунок 3.12 – Вигляд контекстів та відповідей для роботи модуля

Принцип роботи полягає у формуванні контексту з найчастіших запитань користувача, після чого модель Q&A трансформера знаходить найбільш релевантну відповідь в межах цього контексту. Для роботи з

попередньо натренованими NLP-моделями трансформерів використовуються бібліотеки transformers та torch.

3.2 Функціональне тестування системи

Основною метою тестування була перевірка працездатності функціональних модулів системи, відповідності програмної реалізації вимогам технічного завдання, а також адекватності результатів, що генеруються машинним аналізом. Особлива увага приділялася зручності взаємодії користувача з інтерфейсом, точності моделей машинного навчання та стабільності роботи вебдодатку. Блок-схема інтерфейсу на рисунку нижче.

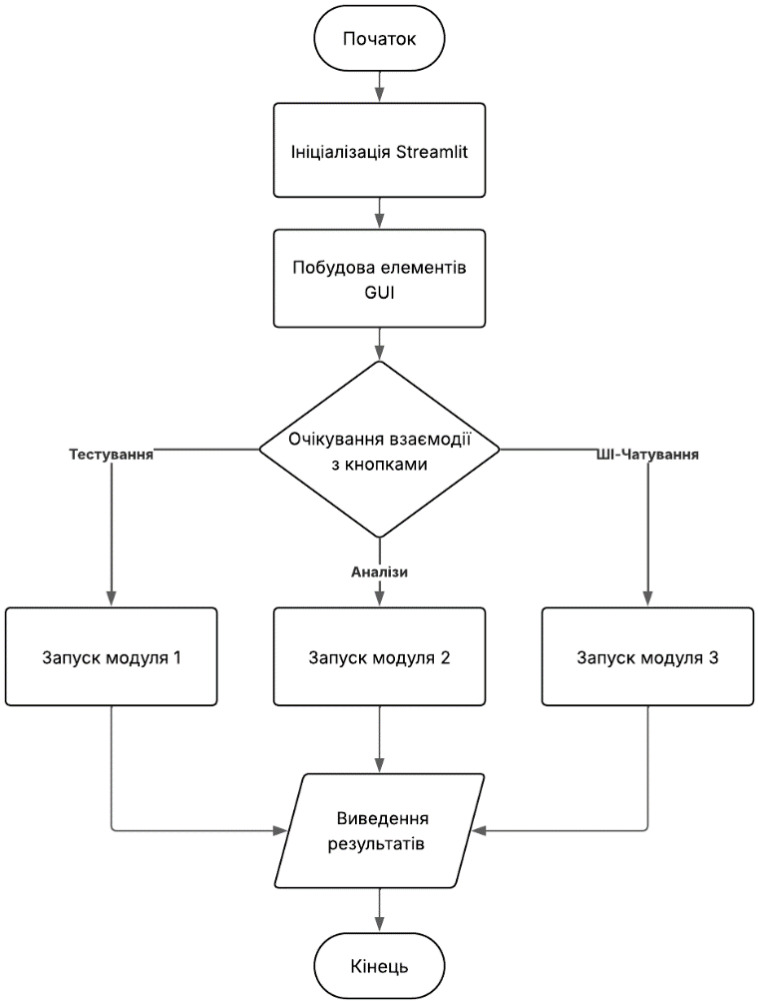

Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритму роботи графічного інтерфейсу

Тестування проводилося вручну через графічний веб-інтерфейс, розроблений за допомогою бібліотеки Streamlit. Ключові критерії перевірки включали: правильність збору та відображення даних про мережу (швидкість, пінг, втрати пакетів); коректну роботу кнопок керування; запуск та завершення тестів; виведення результатів аналізу; порівняння моделей машинного навчання; та роботу модуля чат-асистента з NLP-моделлю.

Тестування модуля первинного тестування мережі було зосереджено на перевірці точного та стабільного збору мережевих параметрів. Це включало виконання різних тестів для підтвердження того, що інтеграція speedtest-cli коректно збирає та відображає інформацію про провайдера, деталі сервера, швидкість завантаження/вивантаження, пінг та втрату пакетів без помилок чи невідповідностей. Спостережуваний результат підтвердив коректну роботу модуля(див. рис. 3.14).

Рисунок 3.14 – Результат тестування першого модулю

Валідація модуля машинного навчання передбачала оцінку продуктивності та точності реалізованих регресійних моделей. Для

проведення аналізу в реальному часі використовувався набір даних з 10 вимірювань мережі, з акцентом на оцінку ефективності кожної моделі.


```
[
  {
    "download_mbps": 90.47,
    "upload_mbps": 85.78,
    "ping_speedtest_ms": 24.1,
    "ping_google_ms": 37.0,
    "packet_loss_percent": 0.0,
    "isp": "VinAsterisk",
    "server": "Chernivtsi"
  },
```


Рисунок 3.15 – Загальний вигляд одного набору даних

Представлені нижче графіки ілюструють застосування трьох різних моделей регресії для аналізу взаємозв'язку між швидкістю завантаження та показником пінгу в безпровідних мережах. На всіх трьох графіках горизонтальна вісь (X) відображає значення пінгу в мілісекундах (мс), а вертикальна вісь (Y) – швидкість завантаження в мегабітах за секунду (Мбіт/с). Червоні точки на кожному графіку позначають окремі вимірювання швидкості завантаження та відповідні їм значення пінгу, зібрані під час тестування мережі.

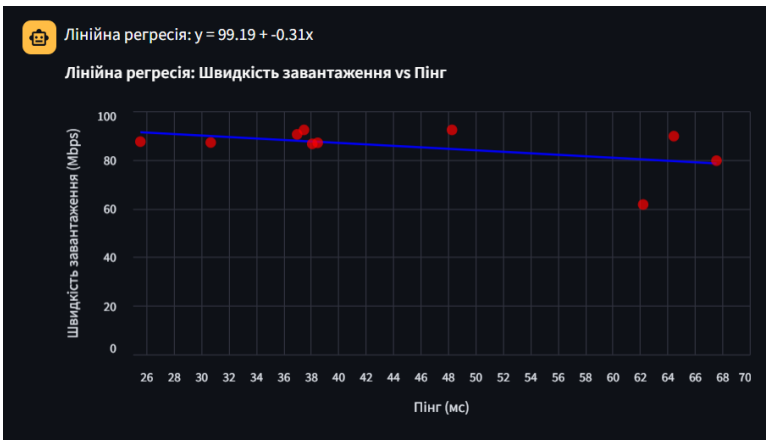

Рисунок 3.16 – Результат оцінювання лінійної регресії

Графік на рисунку 3.16 демонструє спробу апроксимації даних за допомогою прямої лінії. Синя лінія регресії відображає загальну лінійну тенденцію, а її рівняння (y=99.19−0.31x) вказує на обернено пропорційну залежність: зі збільшенням пінгу швидкість завантаження має тенденцію до лінійного зниження. Це базовий підхід, що надає просте уявлення про кореляцію між параметрами.

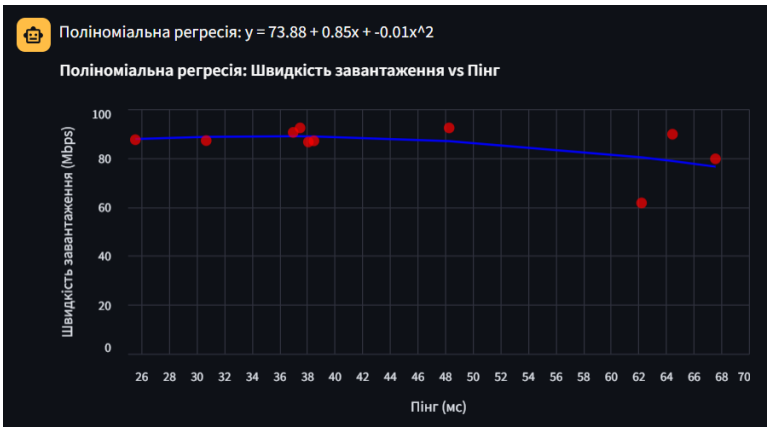

Рисунок 3.17 – Результат оцінювання поліноміальної регресії

На відміну від лінійної, ця поліноміальна модель(див. рис. 3,16 - 3.17) використовує поліноміальну функцію (синя крива) для апроксимації даних, що дозволяє враховувати нелінійні взаємозв'язки. Це забезпечує більш гнучке та потенційно точніше відображення складної поведінки мережевих параметрів, де проста лінійна залежність може бути недостатньою.

Рисунок 3.18 – Результат оцінювання випадкового лісу

Графік на рисунку 3.18 ілюструє застосування ансамблевого методу випадкового лісу. Синя лінія (або нерівномірна крива) є усередненим прогнозом від множини дерев рішень. Цей метод є потужним алгоритмом для виявлення складних, нелінійних залежностей та менш схильний до перенавчання, забезпечуючи високу точність та стабільність прогнозування.

Порівняння цих трьох графіків дозволяє візуально оцінити, як різні моделі машинного навчання інтерпретують взаємозв'язки між мережевими параметрами. Лінійна регресія надає базовий опис, поліноміальна — дозволяє врахувати нелінійність, а метод випадкового лісу — пропонує більш точний прогноз за рахунок ансамблевого підходу. Можливість порівняння цих моделей в реальному часі є ключовою функціональністю системи для вибору оптимального підходу до аналізу якості безпровідних каналів.

Оцінка модуля чат-асистента була зосереджена на його здатності розуміти та відповідати на запити користувачів за допомогою моделі трансформера NLP. Тестування підтвердило його базову здатність розпізнавати технічні питання (наприклад: "Чому мій пристрій не підключається до Wi-Fi?"(див. рис. 3.21)) та надавати пояснення мережевих метрик. Спостережуваний результат свідчить, що асистент надає відповідні відповіді щодо налаштувань та функціональних питань.

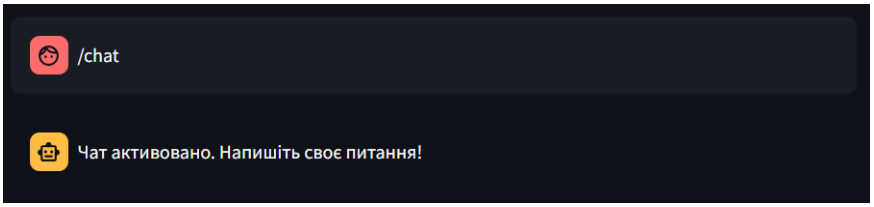

Рисунок 3.19 – Вхід до режиму чатування

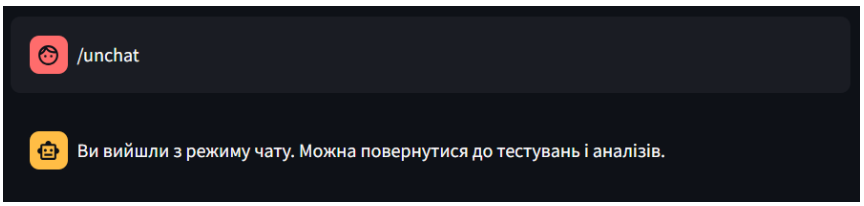

Рисунок 3.20 – Вихід з режиму чатування

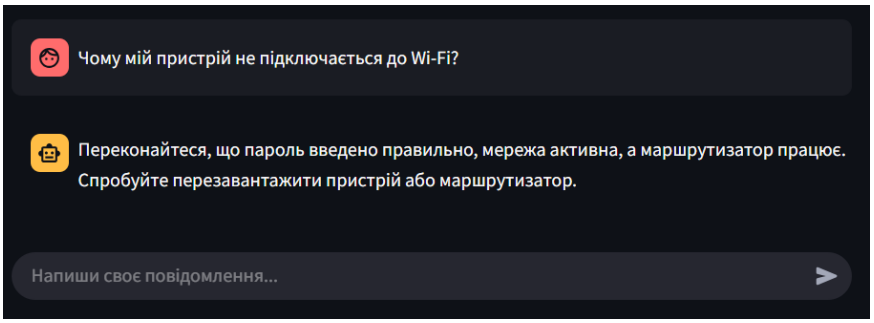

Рисунок 3.21 – Результат тестування модуля чат-асистента

Оцінка користувацького інтерфейсу, розробленого за допомогою Streamlit, була першочерговою через його роль як основної точки взаємодії. Оцінка була зосереджена на його інтуїтивності, структурній організації, швидкодії та загальному досвіді користувача. UX-тестування підтвердило стабільність елементів керування та безперебійне оновлення компонентів без перезавантаження сторінки.

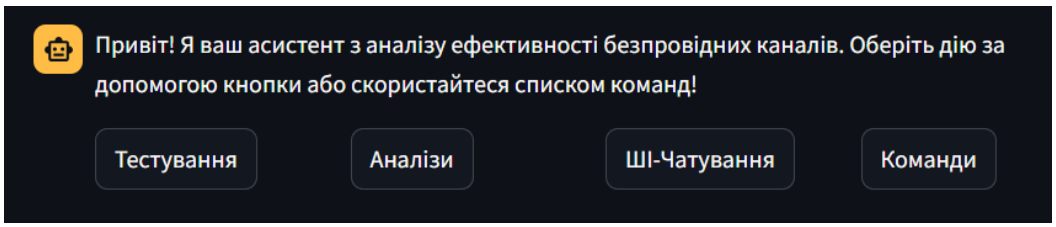

Рисунок 3.22 – Вигляд стартового навігаційного повідомлення

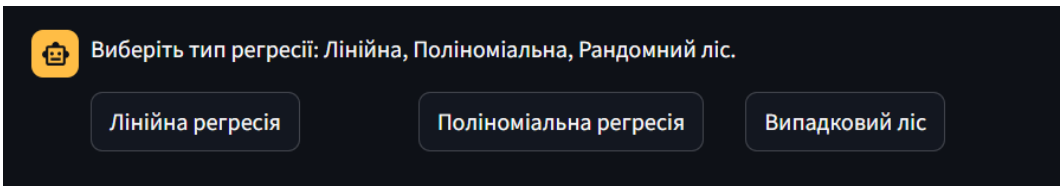

Рисунок 3.23 – Додаткове повідомлення для аналізів

Інтерфейс характеризується інтуїтивністю, оскільки всі елементи (кнопки, вікна, діаграми) мають зрозумілі підписи, що дозволяє користувачу без технічної підготовки запускати тест та отримувати результат. Він також є структурованим, з логічним групуванням компонентів: спочатку вибір/запуск

тесту, потім аналітика, далі чат-асистент. Швидкодія системи забезпечується швидким оновленням результатів та побудовою графіків без затримок. Результати UX-тестування показали, що кнопки "Тестування", "Аналізи", "ШІ-Чатування" працюють стабільно, компоненти оновлюються без перезавантаження сторінки, і помилок при запуску не виявлено.

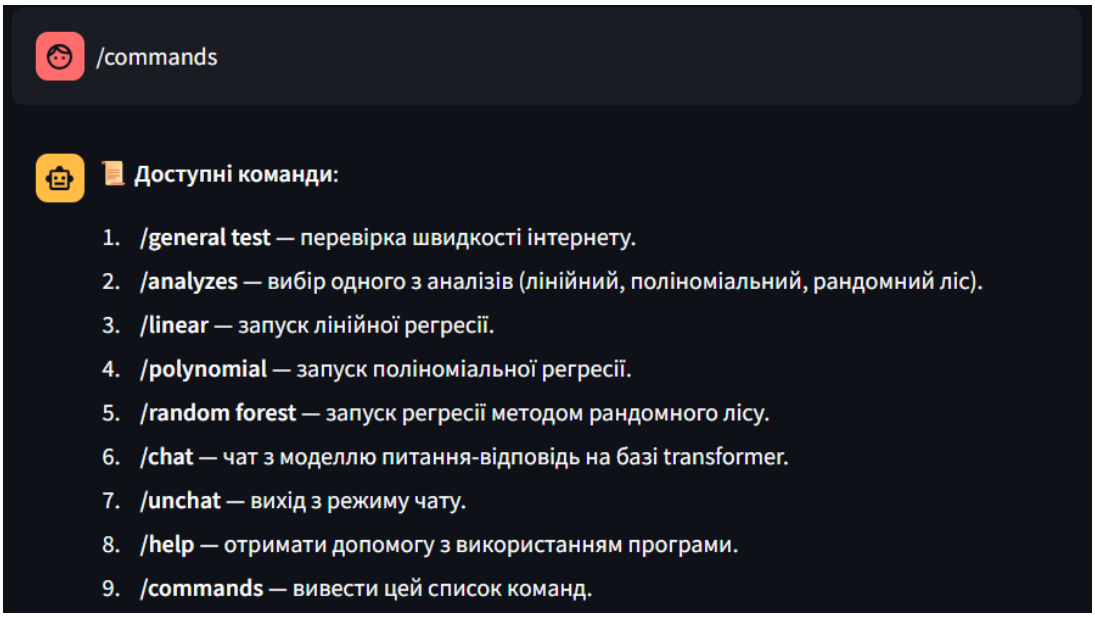

Рисунок 3.24 – Команди для ручного тестування

3.3 Оцінка ефективності та перспективи системи

На основі функціонального тестування розробленої інтелектуальної системи для аналізу безпровідних мереж 5G/Wi-Fi можна зробити висновок, що всі основні компоненти працюють відповідно до поставлених вимог.

Стабільність роботи: Програма не виходила з ладу при повторних запусках тестів. Кожне нове вимірювання правильно ініціалізувалося без потреби оновлення сторінки. Всі модулі адекватно взаємодіють між собою, забезпечуючи цілісний досвід користувача.

Масштабованість: Хоча наразі система працює з невеликим набором даних (10 замірів в одній сесії), її архітектура дозволяє в майбутньому додати збереження історії результатів та аналітику довготривалих змін швидкості.

Гнучкість аналітики: Інтеграція одразу трьох моделей регресії дозволяє порівняти якість прогнозу на ходу. Візуалізація результатів (Altair-графіки) допомагає наочно оцінити відхилення та тренди. Модуль працює незалежно від типу мережі – підходить як для Wi-Fi, так і для мобільного 5G.

Дружність до користувача: Інтерфейс мінімалістичний, інтуїтивно зрозумілий, не перевантажений технічними деталями. Усі дії виконуються через кнопки з підписами, немає потреби вводити команди вручну. Наявність чат-асистента додає сучасний елемент інтерактивності.

Під час тестування виявлені недоліки системи:

а) результати не зберігаються після перезавантаження сторінки – відсут нє довготривале накопичення даних.

б) чат-бот відповідає на питання у межах обмеженого контексту без повноцінної бази знань.

Виявлені обмеження, такі як відсутність постійного зберігання даних та обмежений контекст чат-бота, вказують на відмінність між поточним прототипом та повноцінною системою. Нездатність зберігати історичні дані обмежує можливості довгострокового аналізу тенденцій та розширеного прогностичного моделювання. Обмежена база знань чат-бота також знижує його корисність як комплексного діагностичного інструменту. Ці аспекти визначають напрямки для подальшого розвитку системи.

Таблиця 3.2 – Оцінка результатів функціонального тестування системи

Критерій	Оцінка	Коментар
Коректність роботи тестів	Відмінно	Без помилок, стабільне виконання
Точність моделей машинного навчання	Добре	Random Forest дав найкращий результат
Інтерфейс користувача	Відмінно	Простий, зручний, швидкий
Взаємодія з чат-ботом	Добре	Працює, потребує розширення логіки
Стабільність роботи системи	Відмінно	Програма не виходила з ладу при повторних запусках тестів; модулі адекватно взаємодіють

Продовження таблиці 3.2

Масштабованість	Добре	Архітектура дозволяє майбутнє розширення для збереження історії та довготривалої аналітики
Гнучкість аналітики	Відмінно	Інтеграція трьох моделей регресії, візуалізація, незалежність від типу мережі

Розроблена інтелектуальна система демонструє низку суттєвих переваг порівняно з більшістю стандартних інструментів для тестування мережевих каналів. На відміну від більшості існуючих Speedtest-сервісів або вбудованих діагностичних утиліт, які надають лише базові метрики (швидкість, пінг), наша система інтегрує повноцінні модулі машинного навчання. Це дозволяє не просто виміряти параметри, а й провести глибокий регресійний аналіз для виявлення прихованих закономірностей та прогнозування якості зв'язку. Така аналітика є значно ціннішою для виявлення першопричин проблем та оптимізації каналів.

Можливість одночасного використання та порівняння трьох різних моделей регресії (лінійної, поліноміальної та випадкового лісу) є унікальною перевагою. Користувач може візуально оцінити, яка модель найкраще описує поведінку мережі в поточних умовах, що дає значно більше інформації для прийняття рішень, ніж статичний прогноз або відсутність прогнозу взагалі. Стандартні рішення зазвичай не пропонують жодних прогнозних можливостей.

Інтеграція чат-асистента на базі трансформерної моделі значно підвищує зручність використання системи. Замість пошуку відповідей у довідниках або інтернеті, користувач може задати питання безпосередньо в інтерфейсі програми, що робить систему більш доступною та інтуїтивною, особливо для нетехнічних користувачів. Більшість конкуруючих рішень не мають такого функціоналу.

Система акцентує увагу на аналізі 10 останніх вимірювань, що забезпечує швидкість обробки та актуальність отриманих результатів. Це

дозволяє оперативно реагувати на поточні зміни в мережі без необхідності зберігання та обробки великих обсягів історичних даних, що є характерною особливістю багатьох комерційних рішень, які можуть бути перевантажені функціоналом.

Використання бібліотеки Altair дозволяє створювати інтерактивні та інформативні графіки, що забезпечують глибоке розуміння стану мережі (зміна швидкості з часом, порівняння пінгу та швидкості, виявлення аномалій). Багато стандартних інструментів пропонують лише базові лінійні графіки або просту табличну форму представлення даних.

3.4 Висновки до розділу

У даному розділі було детально розглянуто архітектуру та етапи реалізації інтелектуальної системи підвищення ефективності безпровідних каналів 5G/Wi-Fi на базі інтелектуального аналізу. Проведена систематизація інформації щодо її компонентного складу, функціоналу окремих модулів, а також методів та результатів тестування.

Розроблена система демонструє високий ступінь модульності, що забезпечується поділом на чотири основні функціональні блоки: модуль мережевого тестування, модуль обробки та візуалізації даних, модуль машинного навчання та інтелектуальний чат-асистент. Така архітектура, реалізована на мові Python із використанням фреймворку Streamlit, забезпечує гнучкість, масштабованість та легкість подальшого розвитку та модифікації.

Інтеграція бібліотеки speedtest-cli дозволила реалізувати точний та автоматизований збір ключових параметрів якості мережі, включаючи швидкість завантаження/вивантаження, пінг, втрати пакетів.

Модуль машинного навчання успішно реалізує три різні моделі регресії – лінійну, поліноміальну та випадковий ліс. Це дозволяє здійснювати всебічний аналіз взаємозв'язків між мережевими параметрами та прогнозувати

якість з'єднання. Візуалізація результатів за допомогою бібліотеки altair значно покращує інтерпретацію отриманих даних, допомагаючи виявляти тренди та аномалії. Можливість порівняння різних регресійних моделей в реальному часі надає користувачу розширені інструменти для прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації мережі.

Впровадження інтелектуального чат-асистента на базі трансформерної моделі підвищує рівень інтерактивності та доступності системи. Асистент здатен надавати відповіді на типові питання, що стосуються функціонування мережі та інтерпретації результатів, роблячи систему більш зручною для широкого кола користувачів.

Функціональне тестування всіх модулів системи, включаючи мережеве тестування, машинне навчання, чат-асистента та інтерфейс користувача, підтвердило їхню коректну роботу та відповідність поставленим вимогам. Система продемонструвала стабільність у роботі, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та ефективність у наданні аналітичних висновків.

Розроблена система перевершує більшість існуючих стандартних рішень завдяки інтеграції комплексного інтелектуального аналізу, динамічного порівняння моделей прогнозування, наявності інтерактивного чат-асистента, а також фокусу на швидкості та актуальності аналізу даних.

Незважаючи на успішну реалізацію, було ідентифіковано потенційні напрямки для подальшого покращення, такі як додавання функціоналу довготривалого збереження даних та розширення контексту знань чат-бота, що дозволить ще більше підвищити цінність системи.

Загалом, результати, представлені в цьому розділі, підтверджують успішну реалізацію інтелектуальної системи аналізу безпровідних каналів, що відповідає сучасним вимогам до програмного забезпечення телекомунікаційних систем. Розроблений програмний продукт закладає міцний науково-практичний фундамент для подальших досліджень у сфері оптимізації безпровідних мереж.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Предметом проєктування у даній бакалаврській роботі є інтелектуальна система аналізу бездротових каналів 5G/Wi-Fi, реалізована як модульна веб-програма. Ця система призначена для моніторингу, аналізу та прогнозування якості мережевих параметрів, що передбачає тривалу взаємодію користувача (розробника, оператора) з комп'ютерною технікою. Умови виконання роботи є типовими для офісних приміщень або дослідницьких лабораторій, де основна діяльність пов'язана з програмним забезпеченням та обчислювальною технікою.

Для даної роботи ідентифіковано такі потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Фізичні фактори (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 та Гігієнічної класифікації праці, МОЗ №248):

- ✓ Підвищений рівень електромагнітного випромінювання (від дисплеїв, Wi-Fi роутерів, 5G-модемів тощо).
- ✓ Недостатнє або надмірне освітлення робочого місця (включаючи пряму і відбиту блискучість, пульсацію світлового потоку).
- ✓ Підвищений або знижений рівень температури, вологості та швидкості руху повітря.
- ✓ Підвищений рівень шуму (наприклад, вентиляційні системи, робочі прилади тощо).
- ✓ Підвищена запиленість та загазованість робочої зони.
- ✓ Підвищений рівень статичної електрики.

Психофізіологічні фактори (згідно з Наказом МОЗ №248):

- ✓ Напруженість трудового процесу, пов’язана з високою концентрацією уваги, розумовим перенапруженням.
- ✓ Перенапруження зорового аналізатора під час роботи за монітором.
- ✓ Монотонність праці (повторюваність одноманітних операцій).

- ✓ Емоційне напруження, викликане відповідальністю за результат або умовами виконання завдань.

4.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Організація робочого місця є ключовим аспектом запобігання фізичним та психофізіологічним перевантаженням, що можуть виникнути під час тривалої роботи за комп'ютером. Відповідно до ДСТУ 8604:2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги» та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями», пропонується:

Відповідність приміщення де виконується робота, повинно відповідати чинним вимогам безпеки та санітарно-гігієнічним нормам:

1) Робочі місця розміщені таким чином, щоб забезпечити достатні проходи між ними та обладнанням, а також оптимальну орієнтацію відносно світлових прорізів для мінімізації відблисків на екранах.
2) Використання ергономічних столів та стільців, що дозволяють регулювати висоту робочої поверхні та сидіння, кут нахилу спинки, забезпечуючи правильну поставу та підтримку хребта.
3) Монітор комп’ютера розташований на відстані 60–80 см від очей користувача, верхній край екрана – на рівні очей або трохи нижче. Клавіатура та миша знаходяться на зручній відстані, що дозволяє уникнути напруження в зап’ястях.
4) Використання моніторів з високою роздільною здатністю, частотою оновлення екрана не менше 75 Гц.
5) Для запобігання розумовому перенапруженню та перенапруженню зорових аналізаторів організовано регламентовані перерви протягом

робочого дня, наприклад, 5–10 хвилин щогодини. Під час перерв доцільно виконувати вправи для очей та легку розминку.

4.1.2 Електробезпека

Робота виконується в офісному приміщенні, де відсутні фактори підвищеної небезпеки (волога, агресивні середовища, струмопровідна підлога). Умови в досліджуваному приміщенні відносяться до категорії «без підвищеної небезпеки». Живлення в приміщенні здійснюється від чотири провідної трифазної мережі з глухо заземленою нейтраллю (система TN-C) напругою 380/220 В.

У такій системі обов’язково застосовується занулення, згідно з НПАОП 0.00-7.15-1. Це навмисне електричне з'єднання металевих неструмоведучих частин обладнання із заземленим нульовим проводом. У разі пробою ізоляції на корпус, це призводить до короткого замикання, що викликає спрацювання захисту (автоматичного вимикача або плавких запобіжників) та відключення пошкодженого споживача від мережі. Необхідно забезпечити цілісність нульового провідника та його достатню провідність, а також використовувати повторні заземлювачі нульового провідника.

Відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01, та ДСТУ EN 61140:2017, пропонуються наступні заходи:

1) Усе електрообладнання та кабелі мають справну ізоляцію, що відповідає вимогам нормативів (опір ізоляції нового устаткування не менше 1 кОм на 1 В напруги).
2) Струмоведучі елементи електроустаткування розміщені в недосяжних місцях, у закритих шафах або мати захисні кожухи.
3) Кабелі живлення комп'ютерів та іншого обладнання прокладені приховано (у кабель-каналах, стінах, підлозі) для уникнення їх пошкодження та випадкового контакту.

4) Використання засобів орієнтації (написи, таблички, попереджувальні знаки) для запобігання помилковим діям при обслуговуванні електроустаткування.

4.2 Технічні рішення з виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Параметри мікроклімату, що нормуються за ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», включають температуру (t, °С), відносну вологість повітря (W, %) та швидкість його переміщення (м/с). Для наших робіт, що належать до категорії I «легка» (розумова праця), допустимі параметри мікроклімату наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату виробничих приміщень

Період року	Допустимі		
	t,°C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0.1-0.2
Холодний	21-25	75	0.1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату виробничих приміщень, відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», передбачається:

1) Забезпечення рівномірного розподілу тепла в холодний період року для підтримки комфортної температури.
2) Припливно-витяжна вентиляція для забезпечення повітрообміну та підтримки оптимального складу повітря.
3) Використання кондиціонерів для підтримки оптимальної температури та вологості повітря в теплий період року.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Якість повітря в робочій зоні залежить від наявності, рівня небезпечності та кількості шкідливих речовин. Вміст шкідливих речовин у повітрі не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій. Для приміщення в якому виконується дослідження основними забруднювачами можуть бути вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил також потрапляє у приміщення ззовні через відкриті вікна та заноситься на одязі і взутті працівниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщені, наведені в таблиці 4.2:

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин

Назва речовини	ГДК, мг/м^3		Клас Максимально небезпечності
	Максимально небезпечності разова	Середньо добова	
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0.15	4
Озон	0,16	0,03	4

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам таблиця 4.3:

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі

Рівні	Кількість іонів в 1 см^3	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	5000	5000

Для забезпечення складу повітря робочої зони, в роботі передбачені такі рішення:

1) Ефективна система вентиляції: Забезпечення постійного припливу свіжого повітря та видалення забрудненого для підтримки чистоти повітряного середовища.
2) Регулярне вологе прибирання: Зменшення концентрації пилу в повітрі робочої зони.
3) Використання екологічно чистих матеріалів: При виборі меблів та оздоблювальних матеріалів для приміщення слід надавати перевагу тим, що мають низький рівень виділення шкідливих речовин.

4.2.3 Виробниче освітлення

Виробниче освітлення (штучне, природне, суміщене) має відповідати вимогам ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Для зорової роботи, пов'язаної з комп'ютерним проєктуванням та моделюванням (що відповідає II розряду зорової роботи), необхідно застосовувати систему комбінованого освітлення.

Таблиця 4.4 – Нормовані значення виробничого освітлення

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк				КПО, ен ,%	
						Штучне освітлення		Природнє освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення нормованого значення штучної та природної освітленості передбачено:

1) Використання енергоефективних світлодіодних джерел світла з колірною температурою від 2400К до 6800К. Інтенсивність ультрафіолетового опромінення (320-400 нм) не повинна перевищувати 0.03 Вт/м².
2) Забезпечення достатнього природного освітлення через віконні прорізи. Робочі місця слід орієнтувати таким чином, щоб уникнути прямого потрапляння сонячних променів на екран монітора та робочу поверхню.
3) У разі недостатнього природного освітлення, його доповнення штучним.
4) Для зон з різними умовами природного освітлення або режимами роботи передбачається окреме управління освітленням.

4.2.4 Виробничий шум

Нормування виробничого шуму здійснюється за ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Для робочих місць, де виконується творча діяльність, наукова діяльність, програмування, допустимий рівень звуку LA становить 50 дБА.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкосмугового шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньогеометричними частинами (Гц)									Допуст-мий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	100	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Джерелами шуму в умовах виконання даної роботи є комп'ютери, принтери, системи вентиляції та кондиціонування. Очікувані рівні шуму від сучасного офісного обладнання зазвичай знаходяться в допустимих межах. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні передбачено:

1) Використання малошумного обладнання: При виборі комп'ютерів, принтерів та іншої офісної техніки слід надавати перевагу моделям з низьким рівнем шуму.
2) Звукоізоляція: Застосування звукоізоляційних матеріалів для стін, стелі та підлоги, а також для вікон та дверей, якщо рівень зовнішнього шуму перевищує нормативи.
3) Організаційні заходи: Розміщення найбільш шумного обладнання (наприклад, серверів) у окремих приміщеннях або зонах.

4.2.5 Виробничі випромінювання

В умовах виконання даної роботи основними видами виробничих випромінювань є електромагнітні поля (ЕМП), що генеруються комп'ютерами, моніторами, Wi-Fi роутерами та, можливо, 5G модемами, якщо вони використовуються на робочому місці для тестування системи. Нормування ЕМП здійснюється відповідно до ДСНіП 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів»

Таблиця 4.6 – Гранично допустимі рівні електромагнітних полів

Види поля	Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 мм)	0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 мм)	0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 мм)	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 мм	10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм	35,0 — 70,0

Для попередження шкідливого впливу випромінювання на працюючих передбачено:

1) Застосування комп'ютерної техніки та бездротових пристроїв (Wi-Fi роутерів, 5G модемів), що відповідають чинним санітарним нормам та мають відповідні сертифікати безпеки щодо рівня ЕМП.
2) Розміщення користувача на безпечній відстані від джерел ЕМП, особливо від моніторів та Wi-Fi роутерів. Обмеження часу безперервної роботи за комп'ютером та регулярні перерви.

4.3 Технічні рішення з пожежної безпеки

Пожежна безпека – це комплекс заходів, спрямованих на запобігання виникнення пожеж та мінімізацію їх негативних наслідків для людей, майна та навколишнього середовища.

З урахуванням ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек» приміщення, де здійснюється розробка та експлуатація інтелектуальної системи аналізу бездротових каналів 5G/Wi-Fi, відноситься до категорії В (пожежонебезпечна) та пожежонебезпечної зони класу П-IIа. Це обумовлено наявністю твердих горючих та важкогорючих речовин і матеріалів (папір, пластикові корпуси обладнання, кабелі). Згідно категорії та класу, а також відповідно до вимог наказу МВС України щодо правил експлуатації вогнегасників, у такому приміщенні повинно бути встановлено два порошкових або вуглекислотних вогнегасники з масою заряду від 3 до 5 кг.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Усі заходи запобігання пожежі в приміщенні можна поділити на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні. Ці системи спрямовані на

запобігання виникненню пожежі з прийнятою ймовірністю, ґрунтуючись на принципі відсутності горючої речовини, окислювача або джерела запалювання.

Організаційні заходи пожежної безпеки передбачають:

1) Організацію пожежної охорони на об’єкті (призначення відповідальних осіб).
2) Проведення навчань з питань пожежної безпеки, включаючи інструктажі та пожежно-технічні мінімуми.
3) Застосування наочних засобів протипожежної пропаганди та агітації (плакати, знаки).
4) Проведення перевірок та оглядів стану пожежної безпеки приміщень.

До технічних заходів належать:

1) Суворе дотримання правил і норм, визначених чинними нормативними документами при експлуатації електромереж, опалення, вентиляції, освітлення тощо.
2) Використання справної електропроводки, що відповідає нормативним вимогам, з належним перерізом провідників та ізоляцією.
3) Забезпечення належного захисту електромереж від перевантажень та коротких замикань (автоматичні вимикачі, запобіжники).
4) Відповідність систем опалення, вентиляції та кондиціонування вимогам пожежної безпеки (ДБН В.2.5-67:2013).

Заходи режимного характеру передбачають:

1) Заборону куріння та застосування відкритого вогню в недозволених місцях.
2) Недопущення появи сторонніх осіб у приміщеннях без супроводу.
3) Регламентацію пожежної безпеки при проведенні будь-яких робіт, що можуть створити пожежну небезпеку.

Експлуатаційні заходи охоплюють:

1) Своєчасне проведення профілактичних оглядів, випробувань, ремонтів технологічного та допоміжного устаткування, а також інженерного господарства (електромереж, електроустановок, опалення, вентиляції).
2) Регулярне прибирання горючих відходів (папір, сміття) та підтримання чистоти на робочих місцях.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Системи протипожежного захисту – це комплекс технічних засобів та заходів, які призначені для виявлення, локалізації та ліквідації пожеж, а також для захисту людей, матеріальних цінностей та навколишнього середовища від негативного впливу пожежі.

Засоби пожежогасіння, що використовуються в приміщенні – це вогнегасники, розміщення яких в приміщеннях здійснюється з урахуванням розміщення потенційних джерел виникнення пожеж і позначається встановленим поруч вказівним знаком

Згідно категорії пожежовибухонебезпеки будівлі, класу приміщення і за вибухо- і пожежонебезпекою П-IIа та НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників в приміщенні має бути встановлено 2 порошкових або вуглекислотних вогнегасники із зарядом речовини 2 кг, крім того на поверхах має бути розташовано по одному вуглекислотному вогнегаснику масою речовини не менше 10 кг.

У разі появи ознак загоряння (диму, запаху, полум’я) кожен працівник зобов’язується негайно повідомити про це органи пожежної охорони (101), посадову особу підприємства, а також задіяти систему оповіщення.

Посадова особа підприємства до прибуття пожежно-рятувальної служби має видалити за межі небезпечної зони всіх працівників, що не беруть участь у ліквідації пожежі і задіяти всі наявні засоби та сили на ліквідацію загоряння.

ВИСНОВОК

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі було проведено комплексний аналіз та розробку інтелектуальної системи для підвищення ефективності бездротових каналів. Виявлено, що сучасні бездротові мережі, попри значний прогрес у швидкості та ємності, стикаються з низкою фундаментальних викликів, таких як інтерференція, затухання сигналу, перевантаження мережі та динамічні умови каналу. Ці фактори є взаємопов'язаними та створюють складне, непередбачуване середовище, де прості метрики швидкості не відображають реальну якість обслуговування.

Аналіз показав, що традиційні підходи до моніторингу та оптимізації мереж, такі як SNMP та NetFlow, мають суттєві обмеження, не надаючи достатньо гранульованих даних у реальному часі та не здатні ефективно інтерпретувати складні взаємозв'язки. Подібним чином, теоретичні методи оптимізації виявляються обчислювально складними та неадаптивними до швидких змін, тоді як ранні методи глибокого навчання потребують величезних обсягів навчальних даних. Таким чином, існує критичний розрив між зростаючою складністю бездротових мереж та можливостями існуючих інструментів для їх ефективного управління та оптимізації.

Для подолання цих викликів було запропоновано та реалізовано інтелектуальну систему аналізу, що поєднує можливості штучного інтелекту та машинного навчання з тестуванням мережевих параметрів. Система розроблена як модульна веб-програма на Python з використанням фреймворку Streamlit, що забезпечує гнучкість, масштабованість та легкість подальшого розвитку. Її архітектура включає чотири основні функціональні блоки: модуль моніторингу та тестування (збір даних про якість мережі за допомогою speedtest-cli), модуль обробки та візуалізації даних (аналіз, агрегація та графічне представлення результатів за допомогою pandas, numpy, altair), модуль інтелектуального аналізу та прогнозування (регресійний аналіз якості мережі за допомогою sklearn з використанням лінійної, поліноміальної

регресії та випадкового лісу), а також модуль інтерактивного асистента (взаємодія з користувачем у форматі питання-відповідь на базі трансформерної моделі з transformers та torch).

Функціональне тестування всіх модулів системи підтвердило їхню коректну роботу, відповідність поставленим вимогам, високу стабільність та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Система продемонструвала ефективність у наданні аналітичних висновків та перевершує більшість існуючих стандартних рішень завдяки інтеграції комплексного інтелектуального аналізу, динамічного порівняння моделей прогнозування, наявності інтерактивного чат-асистента, а також зосередження на швидкості та актуальності аналізу даних.

Незважаючи на успішну реалізацію, було ідентифіковано потенційні напрямки для подальшого покращення, такі як додавання функціоналу довготривалого збереження даних та розширення контексту знань чат-бота, що дозволить ще більше підвищити цінність системи. Загалом, розроблений програмний продукт закладає міцний науково-практичний фундамент для подальших досліджень у сфері оптимізації бездротових мереж, відповідаючи сучасним вимогам до програмного забезпечення телекомунікаційних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A Comprehensive Survey of Wireless Time-Sensitive Networking (TSN): Architecture, Technologies, Applications, and Open Issues. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2403.04500

2. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2017). Unsupervised Machine Learning for Wireless Networks: A Survey. *arXiv preprint arXiv:1709.06599*. URL: https://arxiv.org/abs/1709.06599

3. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2024). Cross-Technology Interference Detection and Mitigation in Wi-Fi 6/7 Using Channel State Information and OFDMA Scheduling. *arXiv preprint arXiv:2503.05429*. URL: https://arxiv.org/abs/2503.05429

4. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2024). Knowledge-Driven Deep Learning for Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *arXiv preprint arXiv:2402.01665*. URL: https://arxiv.org/pdf/2402.01665

5. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2024). Multi-Agent Reinforcement Learning for Load Balancing in 5G Networks: A Decentralized Handover Optimization Scheme. *arXiv preprint arXiv:2504.13424*. URL: https://arxiv.org/html/2504.13424v1

6. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2024). Traffic Priority-Aware 5G NR-U/Wi-Fi Coexistence with Deep Reinforcement Learning. *arXiv preprint arXiv:2503.00256*. URL: https://arxiv.org/abs/2503.00256

7. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2025). Deep Learning for Wireless Receivers: A Comprehensive Survey. *arXiv preprint arXiv:2501.17184*. URL: https://arxiv.org/pdf/2501.17184

8. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2025). Large Language Models for Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *arXiv preprint arXiv:2503.09956*. URL: https://arxiv.org/html/2503.09956v3

9. Al-Safi, M. G. S., & Mohammed, M. Q. (2025). Machine Learning for Future Wireless Communications: Channel Prediction Perspectives. *arXiv preprint arXiv:2502.18196*. URL: https://arxiv.org/html/2502.18196v1

10. CoBeam: Beamforming-based Spectrum Sharing With Zero Cross-Technology Signaling for 5G Wireless Networks. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2402.10266

11. Decentralized Handover Parameter Optimization with MARL for Load Balancing in 5G Networks. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2504.13424

12. Deep Learning for 5G Networks: Joint Beamforming, Power Control, and Interference Coordination. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/1907.00123

13. Dynamic Spectrum Access with Reinforcement Learning for Unlicensed Access in 5G and Beyond. *NIST*. URL: https://www.nist.gov/publications/dynamic-spectrum-access-reinforcement-learning-unlicensed-access-5g-and-beyond

14. Federated Deep Reinforcement Learning-Based Intelligent Channel Access in Dense Wi-Fi Deployments. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2402.17646

15. Federated Learning over 5G, WiFi, and Ethernet: Measurements and Evaluation. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2402.17646

16. Geranmayeh, P., & Grass, E. (2024). ML Based Beam Selection for Maximizing Wireless Network Capacity. *IEEE Access*, *12*, 45176-45189. URL: https://www.ihpmicroelectronics.com/php_scripts/publications/full_text_final_files/grass-geranmayeh-ieee_access_12-45176-2024-2024.pdf

17. How dynamic 5G services are possible with AI. *Google Cloud*. URL: https://cloud.google.com/blog/topics/telecommunications/how-dynamic-5g-services-are-possible-with-ai

18. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2403.04500

19. Improving 5G/B5G Network Performance with RFID- Enabled Resource Management Systems. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2402.09117

20. Interference Management in 5G and Beyond Networks. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2401.01608

21. Lacava, L., de Oliveira, L. B., & Polese, M. (2023). Intelligent Handover Management in ORAN Based Networks. URL: https://sol.sbc.org.br/index.php/wgrs/article/download/30090/29898/

22. Li, X., Zhang, Y., & Wang, Y. (2025). A resource allocation method of distributed wireless network based on mobile edge computing. *International Journal of Network Virtualisation and Soft Computing*, *1*(1), 1-15. URL: https://www.inderscienceonline.com/doi/10.1504/IJNVO.2025.145365

23. Malhotra, S., Yashu, F., Saqib, M., Mehta, D., & Jangid, J. (2025). Deep Reinforcement Learning for Dynamic Resource Allocation in Wireless Networks. *arXiv preprint arXiv:2502.01129*. URL: https://arxiv.org/abs/2502.01129

24. Mismar, F. B., Evans, B. L., & Alkhateeb, A. (2019). Deep Reinforcement Learning for 5G Networks: Joint Beamforming, Power Control, and Interference Coordination. *arXiv preprint arXiv:1904.02572*. URL: https://arxiv.org/abs/1904.02572

25. Mohammed, M. Q., Al-Safi, M. G. S., & Faris, A. M. (2024). A Comprehensive Survey on Machine Learning Methods for Handover Optimization in 5G Networks. *Electronics*, *13*(16), 3223. URL: https://www.mdpi.com/2079-9292/13/16/3223

26. Mohammed, M. Q., Al-Safi, M. G. S., & Faris, A. M. (2024). Federated Learning and LSTM for Dynamic Handover Optimization in 5G Networks. *Sensors*, *24*(20), 6685. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/20/6685

27. Mohammed, M. Q., Al-Safi, M. G. S., & Faris, A. M. (2025). AI-Driven Resource Management in 5G Networks: A Comprehensive Review. URL: https://www.preprints.org/manuscript/202410.2084/v1

28. Mohammed, M. Q., Al-Safi, M. G. S., & Faris, A. M. (2025). Deep Learning for Dynamic Resource Management in 5G Networks: A Review. URL: https://www.researchgate.net/publication/389286833_Deep_Learning_for_Dynamic_Resource_Management_in_5G_Networks_A_Review

29. Mohammed, M. Q., Al-Safi, M. G. S., & Faris, A. M. (2025). Reinforcement Learning-Driven Adaptive Resource Allocation for Wireless Environments. URL: https://www.researchgate.net/publication/390509965_Reinforcement_Learning-Driven_Adaptive_Resource_Allocation_for_Wireless_Environments

30. Ouaissa, M., Ouaissa, M., Lamaazi, H., Slimani, A., Khan, S., & Sundaravadivazhagan, R. (2025). *Machine Learning for Radio Resource Management and Optimization in 5G and Beyond*. Routledge. URL: https://www.routledge.com/Machine-Learning-for-Radio-Resource-Management-and-Optimization-in-5G-and-Beyond/Ouaissa-Ouaissa-Lamaazi-Slimani-Khan-Sundaravadivazhagan/p/book/9781032844732

31. Szott, S., Kosek-Szott, K., Gawłowicz, P., Torres Gómez, J., Bellalta, B., Zubow, A., & Dressler, F. (2021). Wi-Fi Meets ML: A Survey on Improving IEEE 802.11 Performance with Machine Learning. *arXiv preprint arXiv:2109.04786*. URL: https://arxiv.org/abs/2109.04786

32. The Challenges and Compatibility of Mobility Management Solutions for Future Networks. *MDPI*. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/4/1498

33. Transformer-based short-term traffic forecasting model considering traffic spatiotemporal correlation. *Frontiers*. URL: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcomp.2022.956697/full

34. WirelessGPT: Empowering Large Language Models Towards Wireless Intelligence. *arXiv*. URL: https://arxiv.org/abs/2402.06877

Додаток А
(Обов’язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛІВ 5G/WI-FI НА БАЗІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

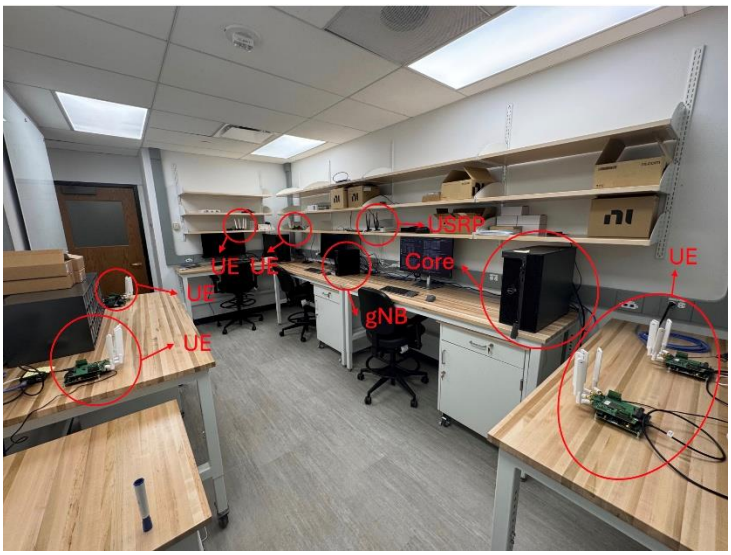

Рисунок 1.1 – Концептуальна архітектура мережі 5G

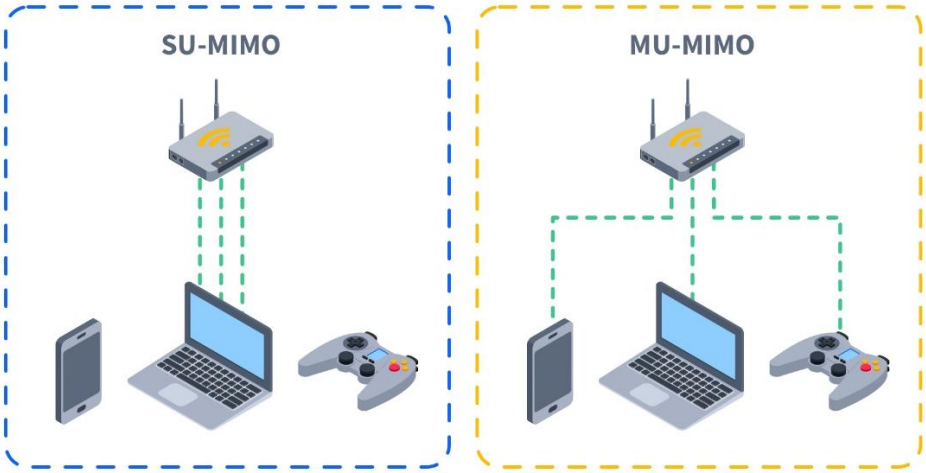

Рисунок 1.2 – Концепція SU-MIMO та MU-MIMO

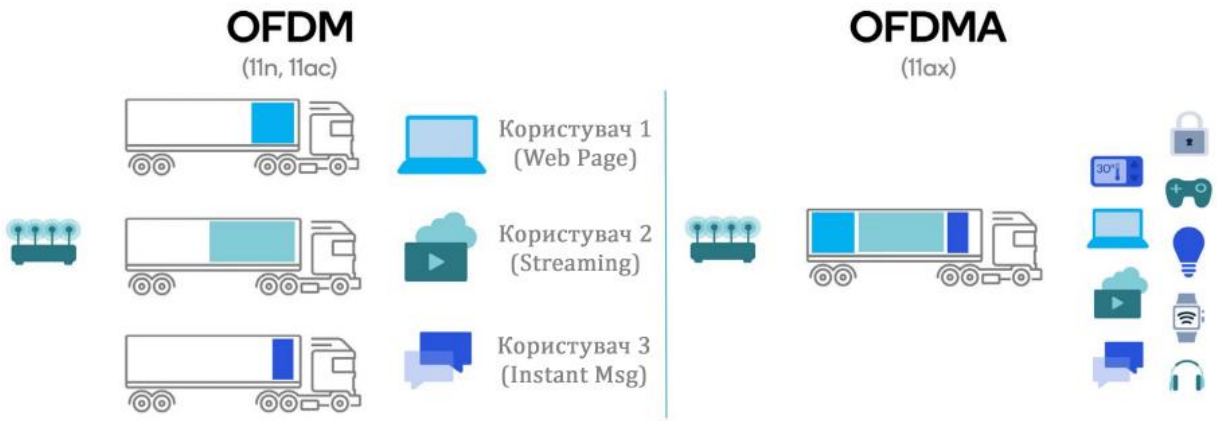

Рисунок 1.3 – Концепція OFDM та OFDMA

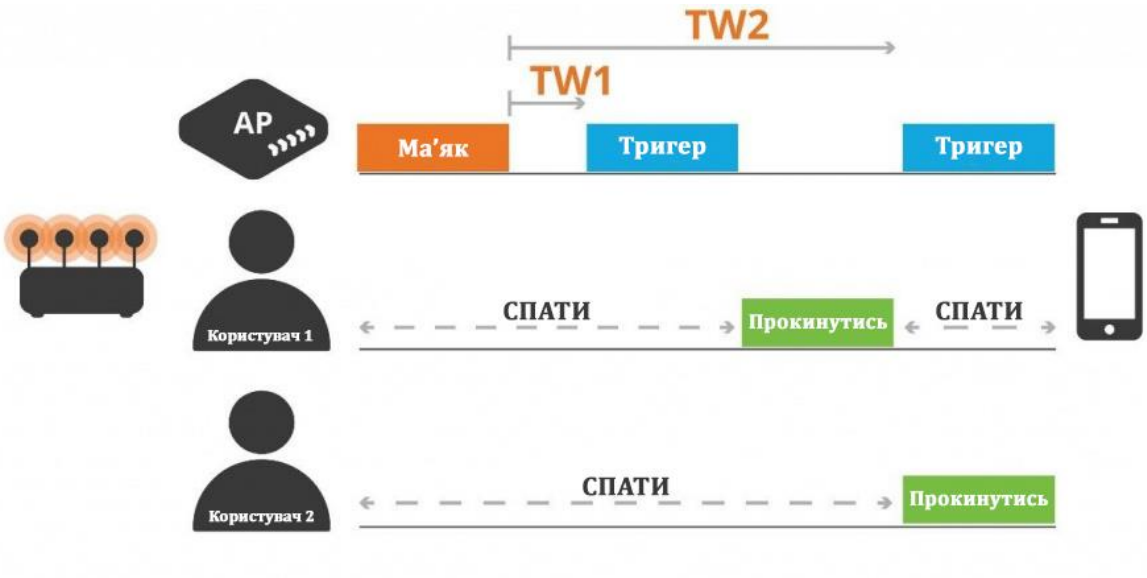

Рисунок 1.4 – Концепція TWT

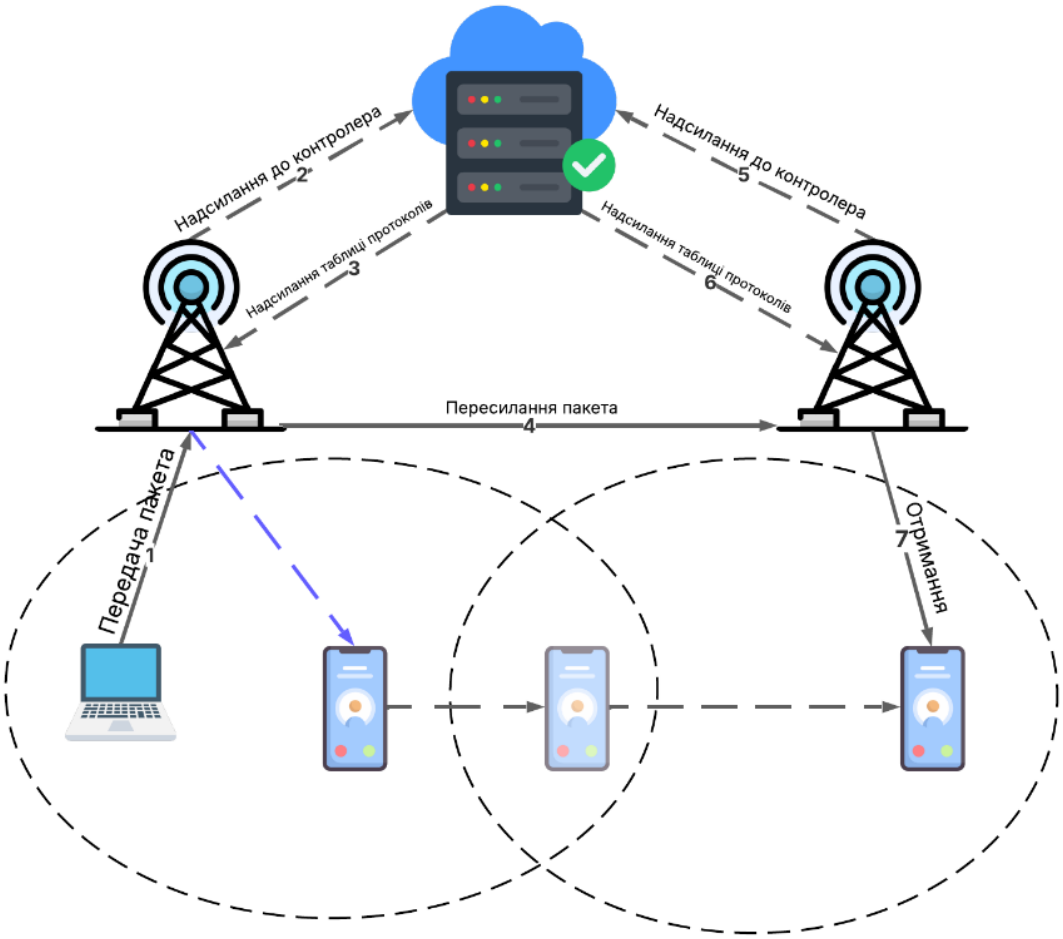

Рисунок 1.5 – Процес хендовера у бездротовій мережі

Рисунок 1.6 – Вприв перевпорядкування пакетів

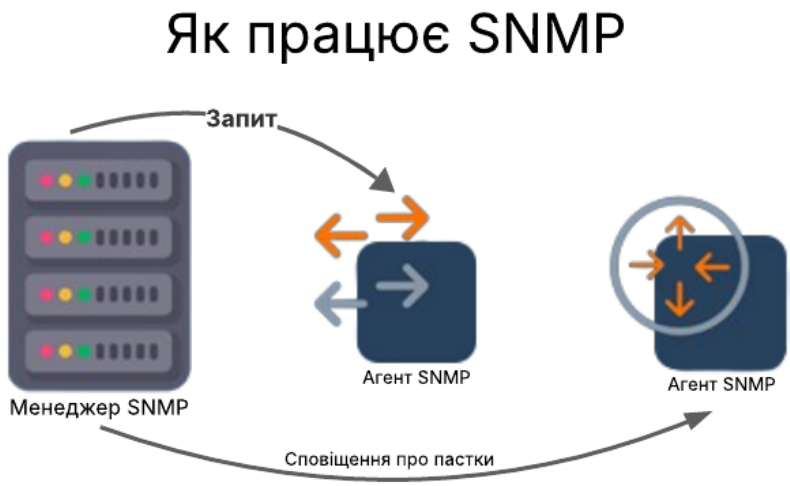

Рисунок 1.7 – Моніторинг мережі за допомогою SNMP

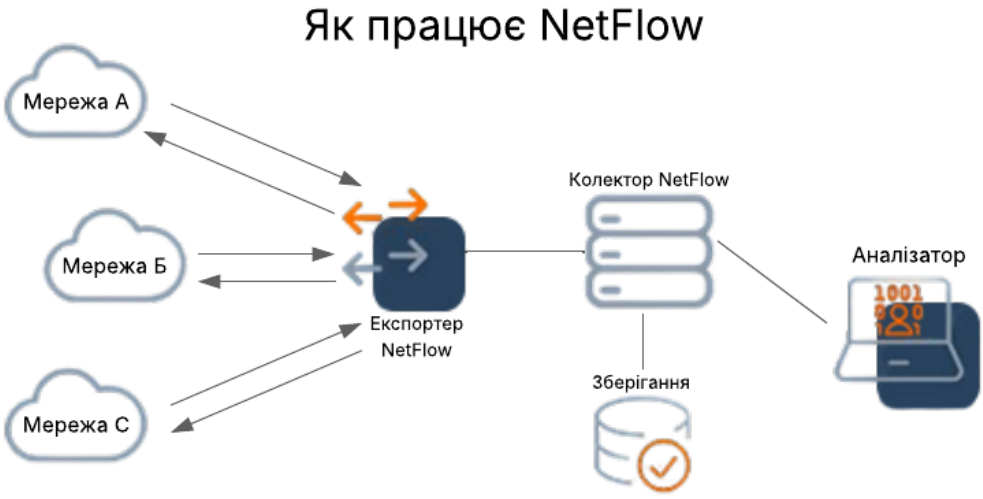

Рисунок 1.8 – Моніторинг мережі за допомогою NetFlow

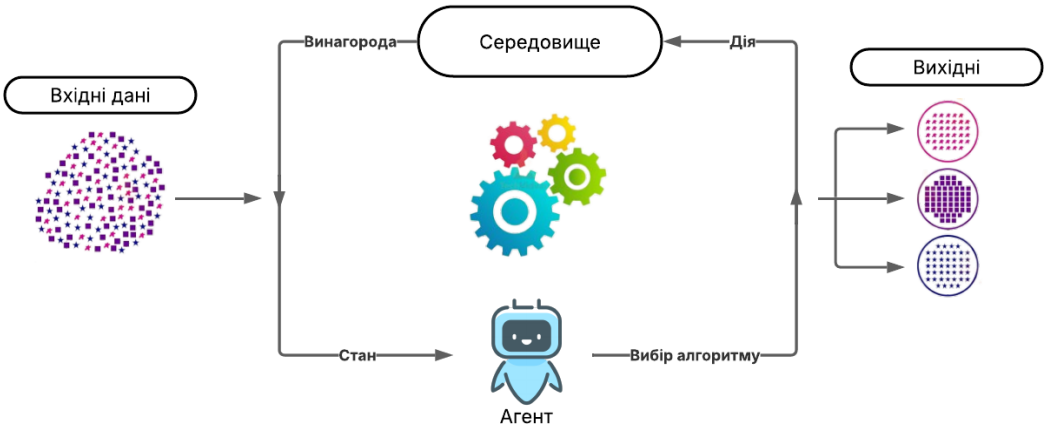

Рисунок 2.1 – Навчання з підкріпленням

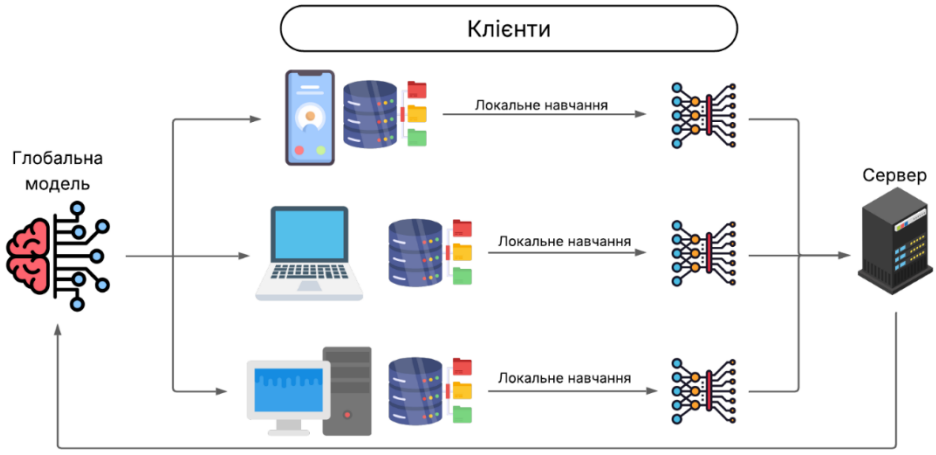

Рисунок 2.2 – Діаграма протоколу федеративного навчання зі пристроями, що навчають глобальну модель штучного інтелекту

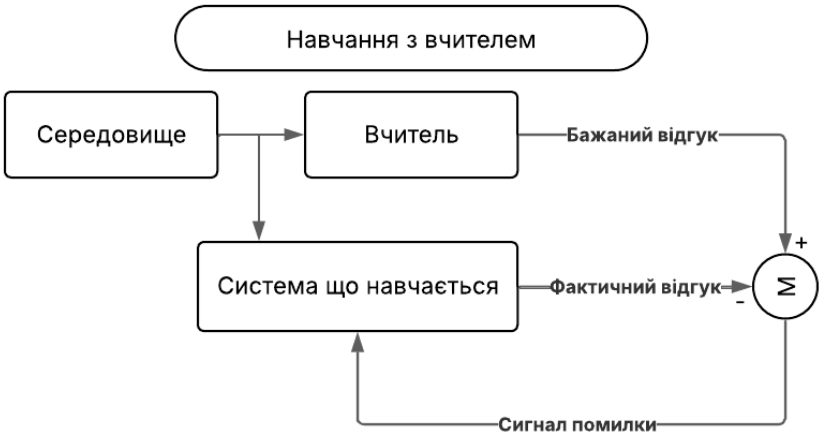

Рисунок 2.3 – Навчання з учителем

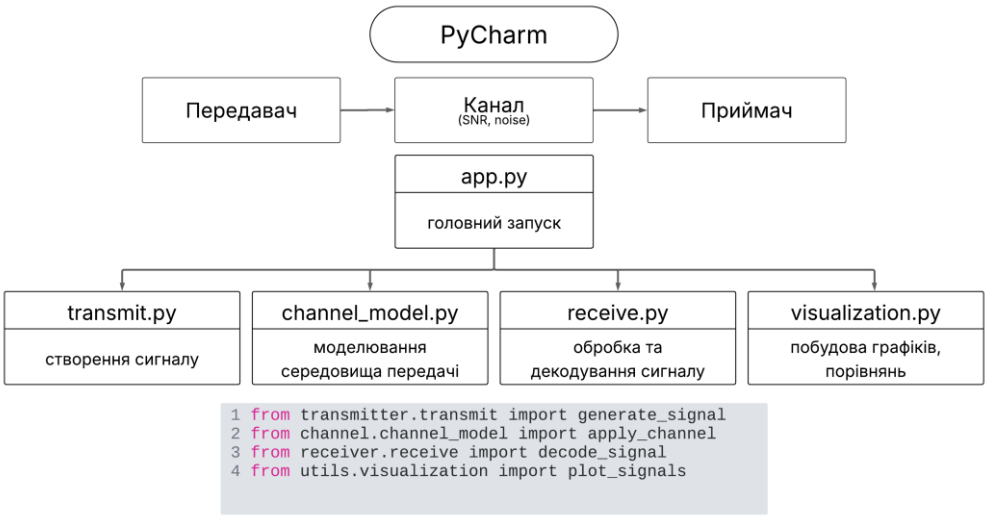

Рисунок 2.4 – Структура розробки PyCharm

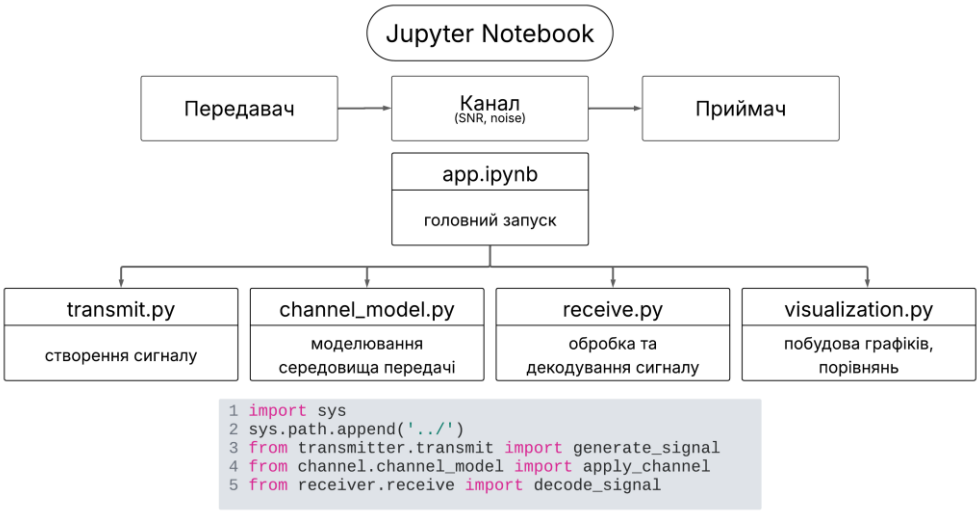

Рисунок 2.5 – Структура розробки Jupyter Notebook

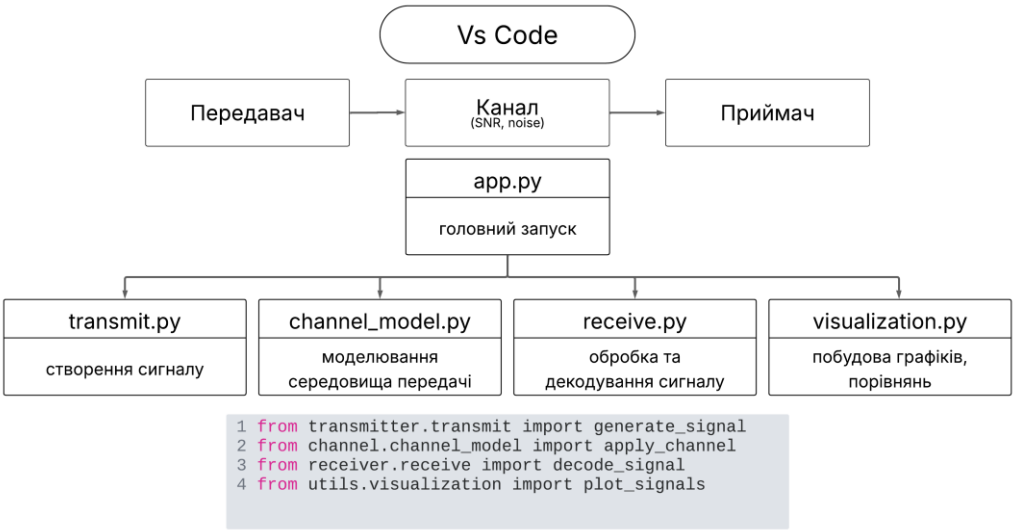

Рисунок 2.6 – Структура розробки Visual Studio Code

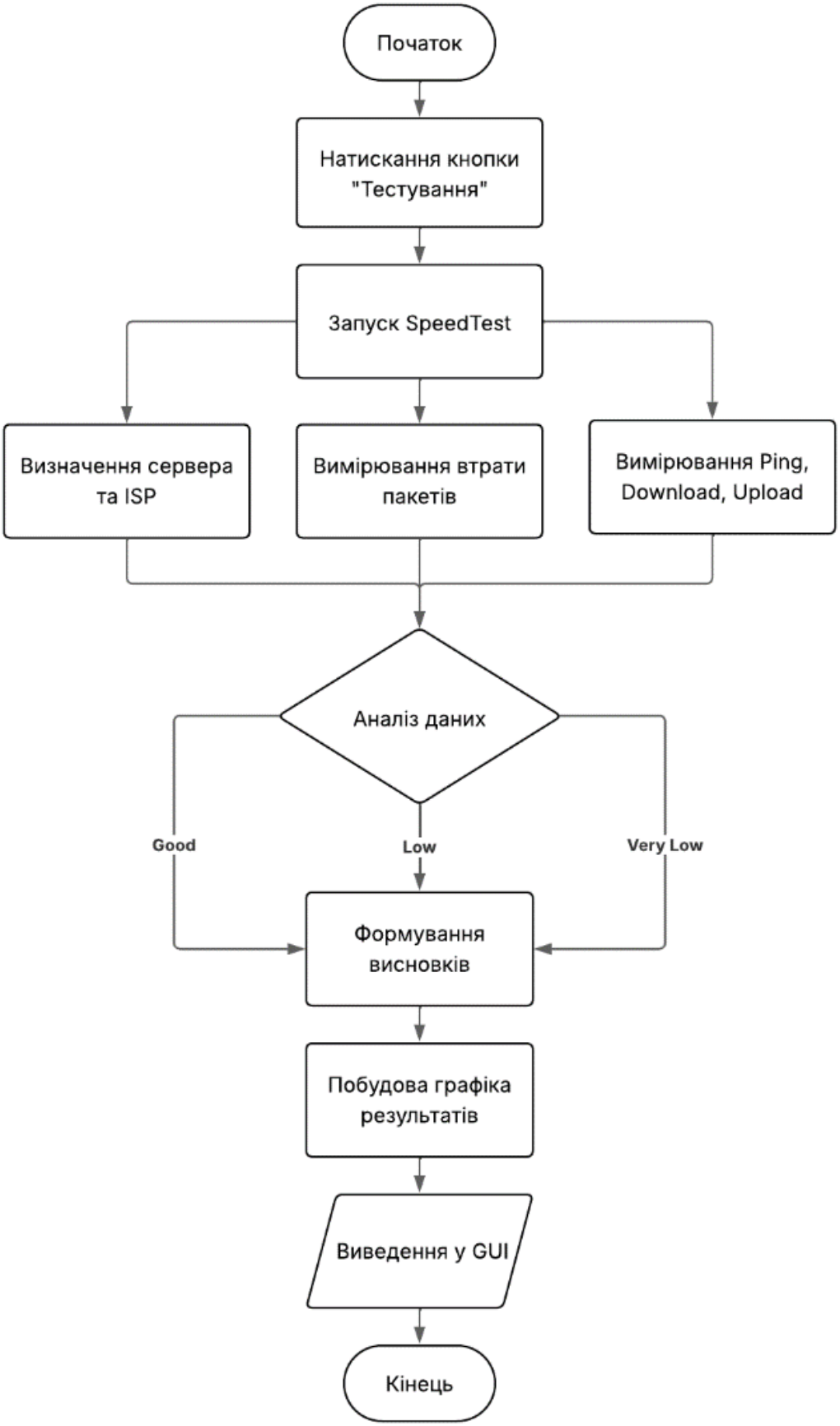

Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму роботи модуля моніторингу

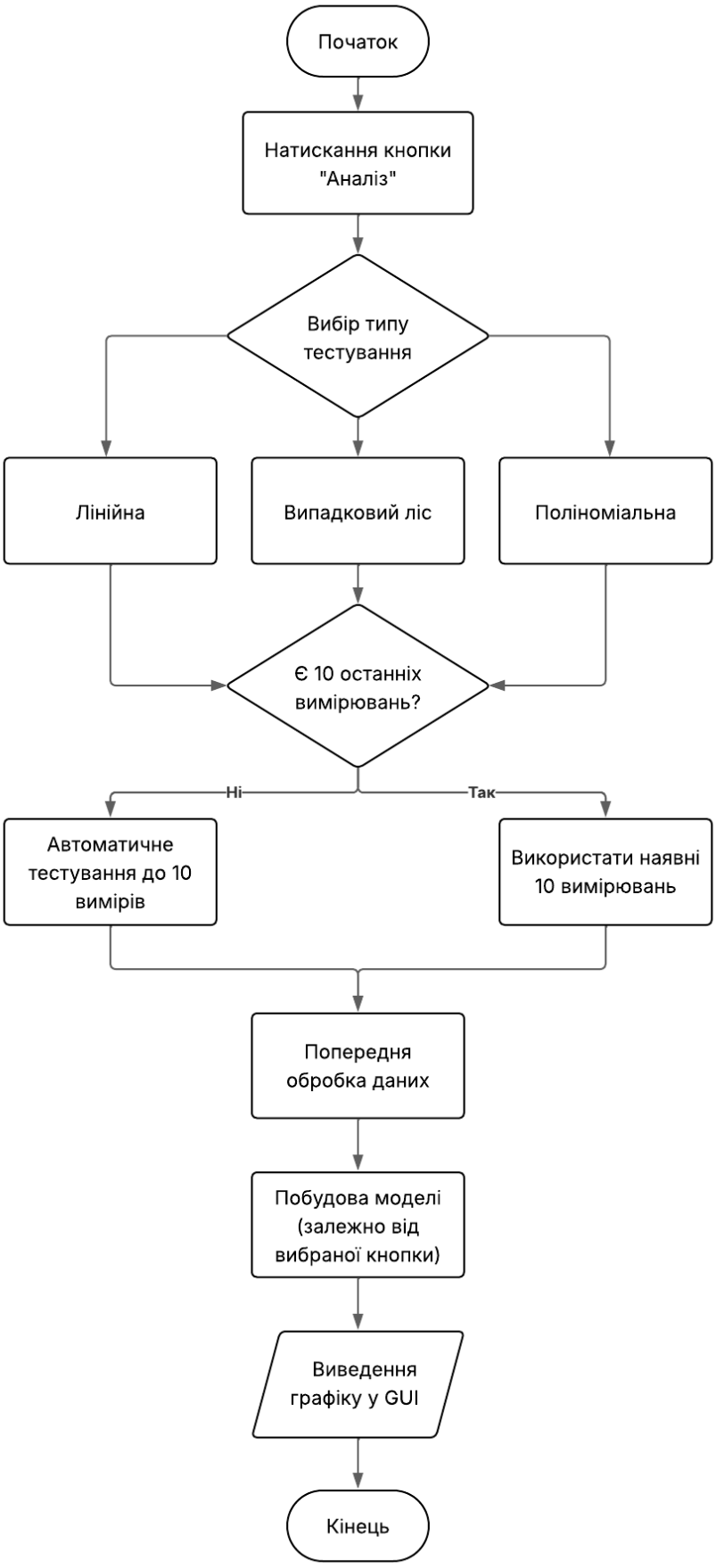

Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму роботи модуля аналізу та прогнозування

Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритму роботи інтелектуального чат-асистента

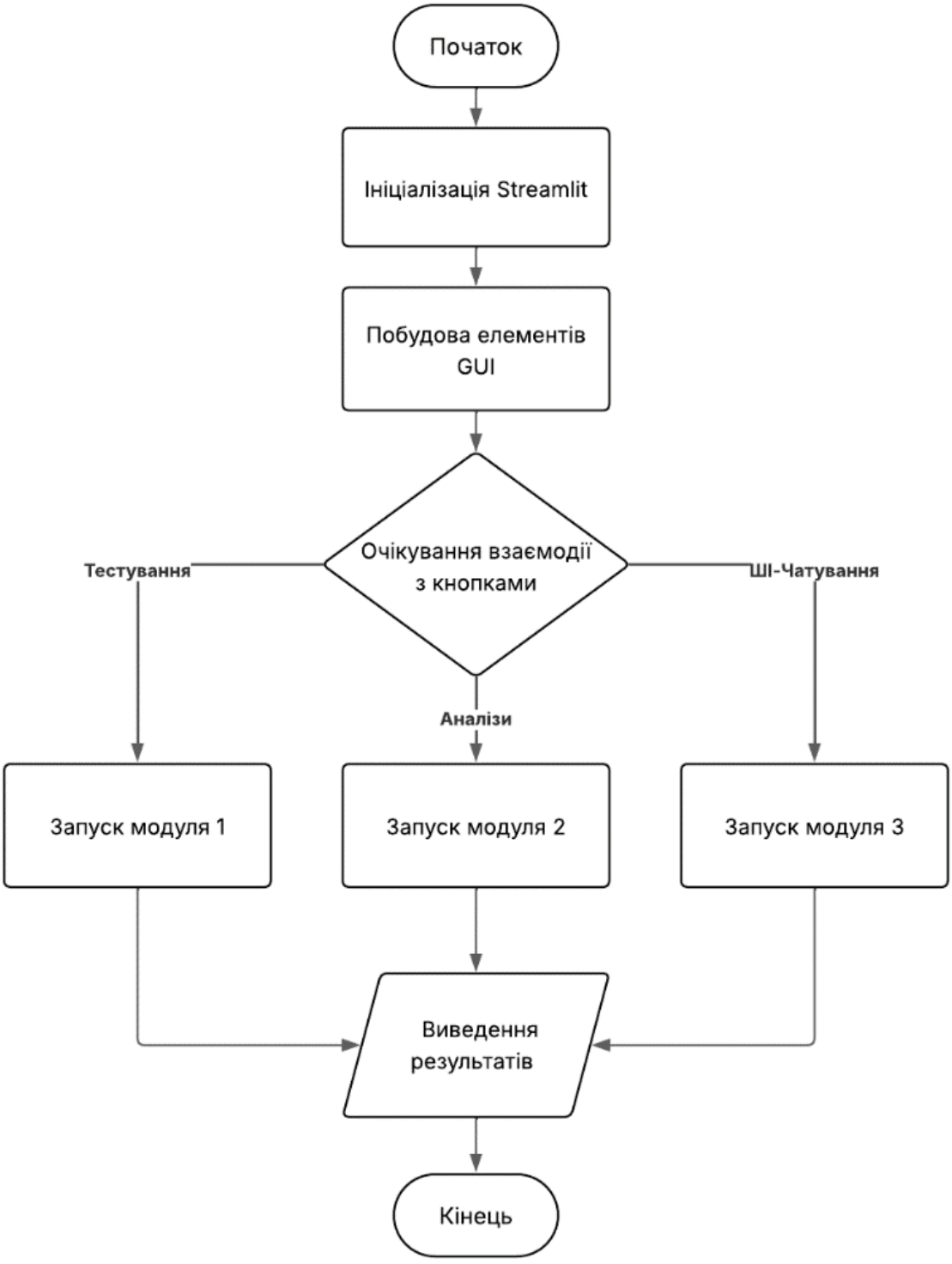

Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритму роботи графічного інтерфейсу

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Підвищення ефективності безпровідних каналів 5G/Wi-Fi на базі інтелектуальної системи аналізу

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-21б

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,55 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☑ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ _____ (підпис)
(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП _____ (підпис)
(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку _____ Васильківський М.В
(підпис) (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____ Михалевський Д. В. д.т.н професор ІКСТ
(підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач _____ Чумак М.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)