

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**

Інститут електроенергетики
(інститут)

Факультет інформаційних технологій
(факультет)

Кафедра інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

здобувача Фатєєва Діана Олегівна
(ПІБ)

академічної групи 123М-24-1
(шифр)

спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерна інженерія»
(офіційна назва)

на тему «Адаптивна модель управління ресурсами для взаємодії D2D в бездротових мережах»
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	доц. Каштан В.Ю.			
розділів:				
Рецензент				
Нормоконтролер	проф. Цвіркун Л.І.			

**Дніпро
2025**

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
інформаційних технологій
та комп'ютерної інженерії
(повна назва)

_____ Гнатушенко В.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

«_» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістр

здобувачу Фатєєва Д. О.
(прізвище та ініціали)

академічної групи 123М-24-1
(шифр)

спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерна інженерія»
(офіційна назва)

на тему «Адаптивна модель управління ресурсами для взаємодії D2D в бездротових мережах»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 13.10.2025 р.
№1165/с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Стан питання та постановка завдання	На основі матеріалів виробничих практик, інших науково-технічних джерел сформулювати наукове завдання, конкретизувати предмет та мету досліджень	20.09.2025
Теоретичний	Обґрунтувати теоретичну базу розв'язання наукового завдання, якому присвячено роботу	15.10.2025
Синтез комп'ютерної системи	Розробка комп'ютерної системи	14.11.2025
Розроблення програмного забезпечення	Розробка програмного забезпечення	28.11.2025
Експериментальний розділ	Проведення і обробка результатів експериментів	02.12.2025

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

доц. Каштан В.Ю.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі

Дата подання до екзаменаційної комісії

Прийнято до виконання

_____ (підпис студента)

Фатєєва Д.О.

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 74 с., 15 рис., 21 джерел, 1 додаток.

Об'єктом дослідження є процес управління радіоресурсами у стільникових мережах із підтримкою прямої взаємодії між пристроями (Device-to-Device, D2D), що функціонують у спільному спектрі з традиційними стільниковими користувачами.

Метою роботи є розробка та експериментальна оцінка адаптивної моделі управління ресурсами, здатної динамічно коригувати параметри D2D-взаємодії відповідно до змін радіоканалу та рівня інтерференції.

У першому розділі виконано огляд сучасних методів D2D-комунікацій, архітектур взаємодії та алгоритмів управління ресурсами, а також визначено недоліки статичних схем.

Другий розділ містить математичний опис системи, моделі радіоканалу, формулювання інтерференційних залежностей та постановку задачі оптимізації.

У третьому розділі наведено обґрунтування вибраних методів проєктування, синтез функціональної та принципової схеми адаптивної системи, а також розробку алгоритмів вибору каналу й контролю потужності.

Четвертий розділ присвячено програмній реалізації моделі у Python, опису функціональних модулів, симуляційних сценаріїв і методики експериментів.

У п'ятому розділі оцінено пропускну здатність D2D-з'єднань, рівень інтерференції стільникових користувачів, енергоефективність та переваги адаптивного управління порівняно зі статичними підходами.

Ключові слова: D2D-комунікації, адаптивне управління ресурсами, розподіл каналів, SINR, пропускну здатність.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	8
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ	10
1.1 Стан розвитку мобільних бездротових мереж	10
1.2 Можливості застосування D2D-комунікації	12
1.3 D2D-технологія	14
1.4 Технологія D2D як інструмент підвищення ефективності 5G-мереж....	17
1.5 Виклики мереж із підтримкою D2D-комунікації	18
1.6 Постановка задачі	20
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ	22
2.1 Технології радіоресурсного менеджменту у D2D-орієнтованих стільникових мережах	22
2.2 Вибір режиму зв'язку	24
2.3 Управління потужністю	26
2.4 Розподіл часових і частотних ресурсів	28
2.5 Об'єднане управління радіоресурсами	30
2.6 Висновки до розділу	31
3 СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ D2D	33
3.1 Обґрунтування прийнятих способів проектування та підходів до дослідження	33
3.2 Вибір та обґрунтування принципів побудови функціональної схеми ...	33
3.3 Проектування адаптивної системи управління ресурсами D2D за заданими показниками	37
3.4 Висновки по розділу	44

4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	46
4.1 Призначення та сфера застосування програмного забезпечення	46
4.2 Обґрунтування технічних характеристик програми	47
4.3 Робота з програмою	54
4.4 Висновки до розділу	55
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	57
5.1 Сутність експерименту, мета та умови проведення	57
5.2 Результати експерименту	58
5.3 Аналіз відповідності теоретичних і експериментальних результатів	64
5.4 Висновки по розділу	65
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	69
ДОДАТОК А. ТЕКСТ ПРОГРАМИ	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

D2D – Device-to-Device Communication (Пряма взаємодія між пристроями)

CU – Cellular User (Стільниковий користувач)

UE – User Equipment (Абонентський пристрій)

BS – Base Station (Базова станція)

gNB / eNB – Next/Enhanced Generation Node B (Базова станція 5G/4G)

RRM – Radio Resource Management (Управління радіоресурсами)

RB – Resource Block (Ресурсний блок)

SINR – Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (Співвідношення сигнал/завада+шум)

SNR – Signal-to-Noise Ratio (Співвідношення сигнал/шум)

PL – Path Loss (Втрати на шляху поширення)

CSI – Channel State Information (Інформація про стан каналу)

QoS – Quality of Service (Якість обслуговування)

QoE – Quality of Experience (Якість користувацького досвіду)

TPC – Transmit Power Control (Контроль потужності передавання)

TPC Loop – Замкнений контур регулювання потужності

IA – Interference Analysis (Аналіз інтерференції)

IC – Interference Coordination (Координація перешкод)

FDD/TDD – Frequency/Time Division Duplex (Частотний/часовий дуплекс)

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Ортогональний частотний поділ)

LTE – Long-Term Evolution (Стандарт мобільного зв'язку 4G)

5G NR – New Radio (Стандарт мобільного зв'язку 5G)

MCS – Modulation and Coding Scheme (Схема модуляції та кодування)

TTI – Transmission Time Interval (Інтервал передавання)

Throughput – Пропускна здатність

Outage – Стан втрати зв'язку або недосягнення заданого SINR

EE – Energy Efficiency (Енергоефективність)

SE – Spectral Efficiency (Спектральна ефективність)

UL/DL – Uplink/Downlink (Висхідна/низхідна лінія зв'язку)

FRA – Frequency Resource Allocation (Розподіл частотних ресурсів)

PC – Power Control (Контроль потужності)

MS – Mode Selection (Вибір режиму зв'язку)

MC – Multi-Cell (Багатостільникова система)

SL – System Load (Навантаження системи)

GT – Ground Truth (Еталонні дані, використовуються у валідації моделі)

ВСТУП

Стрімкий розвиток бездротових технологій та зростаючий попит на високошвидкісний доступ до даних зумовлюють необхідність більш ефективного використання радіочастотного ресурсу в стільникових мережах. Однією з перспективних технологій, здатних підвищити пропускну здатність та зменшити навантаження на інфраструктуру, є пряма взаємодія між пристроями (Device-to-Device, D2D). Її інтеграція у стільникові мережі дозволяє здійснювати передачу даних між абонентами без участі базової станції або з мінімальним її залученням, що забезпечує зменшення затримок, економію енергоспоживання та підвищення ефективності використання спектра.

Разом з тим спільне використання радіоресурсів D2D-парами та традиційними стільниковими користувачами створює низку проблем, серед яких ключовою є інтерференційна взаємодія. Високий рівень перешкод може призвести до деградації якості обслуговування, тому виникає потреба в розробці адаптивних методів управління ресурсами, здатних враховувати динаміку радіоканалу та стан навантаження мережі. Особливої актуальності набувають моделі, що можуть автоматично коригувати параметри D2D-зв'язку – зокрема потужність передавання, відстань взаємодії та параметри доступу до ресурсу – для забезпечення стабільної якості сервісу та мінімізації інтерференції.

Об'єктом дослідження є процес управління радіоресурсами у стільникових мережах із підтримкою D2D-взаємодії, що функціонує у спільному спектрі з традиційними користувачами.

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптивного управління параметрами D2D-комунікацій.

Метою роботи є розробка та експериментальна оцінка адаптивної моделі управління ресурсами, здатної динамічно коригувати параметри D2D-взаємодії відповідно до змін радіоканалу та рівня інтерференції.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі основні завдання:

- проаналізувати теоретичні основи D2D-комунікацій та моделі інтерференції у стільникових мережах;
- розглянути існуючі підходи до управління радіоресурсами та визначити їхні обмеження;
- розробити адаптивну модель управління D2D-взаємодією з урахуванням характеристик каналу та вимог до якості обслуговування;
- створити програмну реалізацію моделі та провести серію експериментів для оцінювання її ефективності;
- виконати порівняльний аналіз отриманих результатів та сформулювати рекомендації щодо застосування моделі в бездротових мережах.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Стан розвитку мобільних бездротових мереж

За останнє десятиліття сектор мобільного зв'язку зазнав стрімкого розвитку, що проявилось як у зростанні кількості користувачів, так і у різкому збільшенні обсягів переданого трафіку. Тривалий час основу навантаження мобільних мереж становив голосовий трафік. Однак поширення смартфонів та інтенсивне використання мобільних застосунків призвели до суттєвого перерозподілу характеру мережного навантаження: обсяг даних почав зростати експоненційно та на сьогодні перевищує голосовий трафік більш ніж у сімнадцять разів [1].

Основними факторами такого зростання є насичений вміст веб-ресурсів, мультимедійний обмін даними, потокова передача високоякісного аудіо та, насамперед, відео високої чіткості. За даними Cisco (Visual Networking Index), глобальний мобільний трафік даних у 2014–2019 рр. зріс майже у десять разів (рис.1.1), а середній щомісячний трафік, що генерується одним смартфоном, зріс у п'ятеро — з 819 МБ до майже 4 ГБ [2]. Додатковий внесок у збільшення загального навантаження формують й інші категорії пристроїв, зокрема обладнання машинного типу (Machine-Type Communication), що активно інтегрується в інфраструктуру мобільних мереж [3].

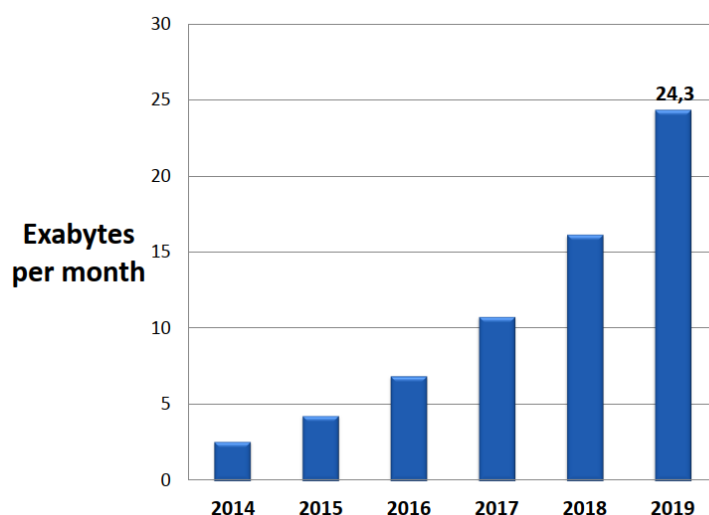


Рисунок 1.1 – Загальний обсяг мобільного трафіку даних, як очікується

Різке зростання кількості підключених пристроїв та потреб у передаванні великих обсягів даних є ключовим викликом для мереж п'ятого покоління (5G). Відповідно до цілей 5G, такі мережі мають забезпечувати до 1000-разове збільшення обсягу трафіку на одиницю площі, 10–100-разове підвищення користувацької швидкості доступу та можливість обслуговування у 10–100 разів більшої кількості підключених пристроїв порівняно з мережами попередніх поколінь [4–6]. Реалізація таких вимог у межах фізичних ресурсів радіоспектра, енергоспоживання та вартості інфраструктури потребує пошуку нових технологій та оптимізаційних рішень як на рівні операторів, так і на рівні кінцевих пристроїв.

У межах програми ЄС METIS, яка визначає ключові напрями розвитку мереж 5G, підкреслюється необхідність еволюційних і революційних рішень для задоволення зростаючих вимог [5]. До основних підходів, що вже використовуються операторами для збільшення пропускної здатності мереж, належать:

- розширення доступного радіочастотного спектра, зокрема шляхом переходу на міліметрові діапазони частот;
- підвищення ефективності радіоканалів через використання технологій MIMO та інших методів просторово-часової обробки сигналів.

Денсифікація мережі — збільшення щільності базових станцій та зменшення радіуса обслуговування (використання малих стільників) [4, 8, 9].

Особливої популярності набуває проектування гетерогенних мереж, у яких поєднуються макростільники та численні малі стільники, що забезпечують локальне покриття з високою якістю сигналу. Втім, надмірна денсифікація потребує складних механізмів керування інтерференцією та призводить до значних витрат на розгортання та обслуговування інфраструктури.

У цьому контексті одним із перспективних рішень є використання прямої взаємодії між користувацькими пристроями — Device-to-Device (D2D) communication, яка дозволяє частково або повністю обходити базову станцію,

формуючи локальні канали зв'язку між пристроями, що розташовані у безпосередній близькості.

1.2 Можливості застосування D2D-комунікації

Технологія прямої взаємодії між пристроями (Device-to-Device, D2D) відкриває широкі можливості для підвищення ефективності існуючих сервісів та формування нових моделей комунікації у сучасних бездротових мережах. Останні роки характеризуються зростанням популярності сервісів, що орієнтовані на взаємодію між користувачами, які перебувають у безпосередній близькості один до одного. У таких сценаріях традиційні підходи, що ґрунтуються на передачі даних через висхідний та низхідний канали стільникової мережі, виявляються малоефективними, особливо у місцях зі значною концентрацією користувачів. D2D-комунікація надає можливість забезпечити прямиий обмін даними між пристроями, уникаючи навантаження на базові станції та зменшуючи затримки [10].

Важливе місце серед застосунків D2D займають соціальні та комерційні сервіси. До них належить локальний обмін інформацією у скупченнях людей, наприклад на стадіонах, концертах, фестивалях або в місцях з інтенсивним рухом користувачів. Такі сервіси включають обмін мультимедійними файлами, спільне використання контенту, комунікацію між групами людей у торгових центрах чи університетських кампусах, а також мобільні мультиплеєрні ігри, для яких важливі низькі затримки та стабільний канал зв'язку. Крім того, D2D-взаємодія відкриває можливості для реалізації нових моделей комерційної взаємодії, таких як локальні рекламні повідомлення, промоакції для користувачів поблизу торгових точок, а також оперативна передача інформації про транспортні послуги — розклади громадського транспорту, оновлення щодо авіарейсів чи зміни в роботі інфраструктури. На відміну від Bluetooth чи інших короткодистанційних технологій, D2D-

комунікація, інтегрована у стільникову мережу, забезпечує значно більший радіус дії, вищий рівень безпеки та гарантовану якість обслуговування.

Значний потенціал D2D має у сфері громадської безпеки. У надзвичайних ситуаціях, таких як землетруси, урагани чи масштабні пожежі, стільникова інфраструктура може бути пошкоджена або перевантажена через інтенсивний обмін інформацією. Рятувальним службам необхідний стійкий і надійний зв'язок для координації дій, передавання оперативної інформації та забезпечення зв'язку між групами реагування. D2D-комунікація дозволяє створювати локальні мережі короткого радіусу дії, які можуть функціонувати навіть за відсутності доступу до центральної інфраструктури. Також вона надає можливість пересічним громадянам оперативно повідомити рятувальників та близьких про своє місцезнаходження або стан у разі небезпеки.

Ще одним важливим напрямом застосування D2D-технологій є безпека дорожнього руху. Пряма взаємодія між транспортними засобами (Vehicle-to-Vehicle, V2V) є ключовим елементом систем попередження аварій, управління дорожнім рухом і координації автономних транспортних засобів. Оскільки такі системи висувають підвищені вимоги до надійності та мінімальної затримки, D2D-комунікація є природною основою для їх реалізації. Вона дозволяє транспортним засобам обмінюватися інформацією про раптове гальмування, дорожні перешкоди або зміну транспортної ситуації в режимі реального часу (рис.1.2) [11].

Крім того, D2D відіграє важливу роль у розвитку систем Machine-to-Machine (M2M) комунікації, що передбачає підключення великої кількості низькопотужних пристроїв, датчиків і IoT-модулів для моніторингу довкілля, медичних систем, розумних міст і промислових застосувань. Оскільки такі пристрої часто обмежені за енергоспоживанням, використання D2D-зв'язку як релейної ланки до більш потужних пристроїв дозволяє розширити покриття, забезпечити доступ до стільникової мережі у складних умовах прийому та підвищити загальну ефективність M2M-середовища. Релейні механізми на

основі D2D дають можливість підтримувати комунікацію навіть у зонах зі слабким покриттям або у віддалених районах.

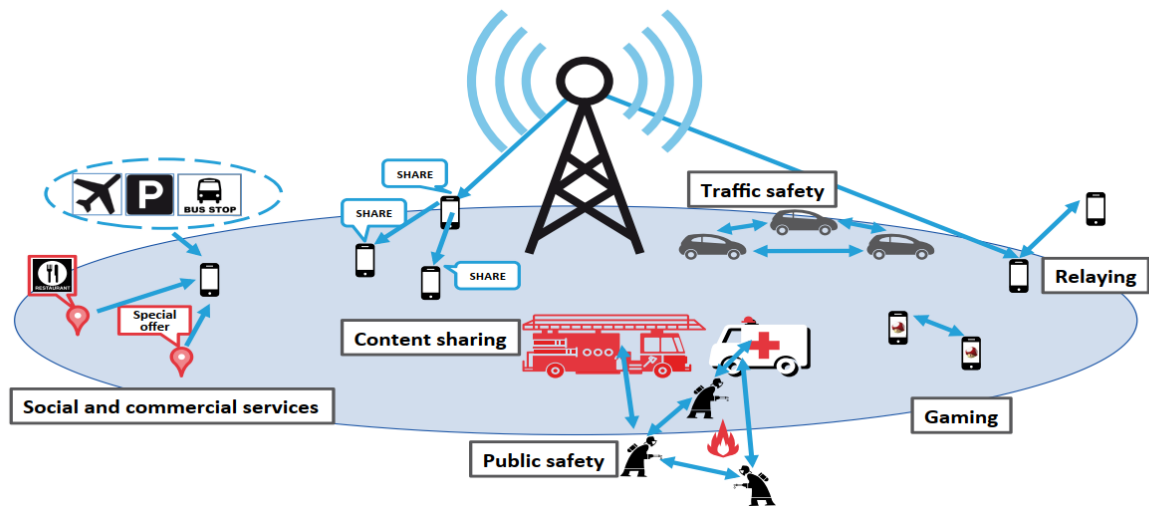


Рисунок 1.2 – Типові випадки використання D2D-комунікації в стільникових мережах

Таким чином, D2D-комунікація є ключовою складовою майбутніх бездротових мереж, оскільки вона не лише розвантажує стільникову інфраструктуру, а й створює передумови для розвитку широкого спектра нових сервісів — від побутових та соціальних до критично важливих систем громадської безпеки, транспорту та Інтернету речей.

1.3 D2D-технологія

Технологія device-to-device (D2D) передбачає встановлення прямого зв'язку між двома користувацькими пристроями без необхідності маршрутизації даних через базову станцію. Залежно від ступеня участі стільникової інфраструктури, D2D-зв'язок може функціонувати як самоорганізований або як мереже-орієнтований (network-assisted). Самоорганізований режим за своєю суттю нагадує традиційні ad-hoc мережі, оскільки використовує неліцензований спектр, забезпечує мінімальні накладні витрати та не потребує складних процедур координації. Такий підхід є

актуальним у ситуаціях, коли стільникова інфраструктура недоступна або виведена з ладу, зокрема під час надзвичайних ситуацій чи природних катастроф.

Мереже-орієнтований D2D-зв'язок, навпаки, передбачає активну участь базової станції, яка здійснює контроль сигналізації, координує ресурси та зменшує рівень взаємних завад між D2D-та стільниковими каналами. Такий режим забезпечує вищу передбачуваність та стабільність зв'язку, проте може вимагати значного службового навантаження і використання складних централізованих алгоритмів розподілу ресурсів. Для досягнення балансу між продуктивністю та складністю можуть застосовуватися різні рівні підтримки з боку мережі; наприклад, інфраструктура може забезпечувати лише етап виявлення (discovery), тоді як подальше управління радіоресурсами виконується самими D2D-пристроями.

Із погляду доступу до спектра D2D-зв'язок може реалізовуватися як у внутрішньосмуговому, так і в позасмуговому діапазонах (рис.1.3) [13].

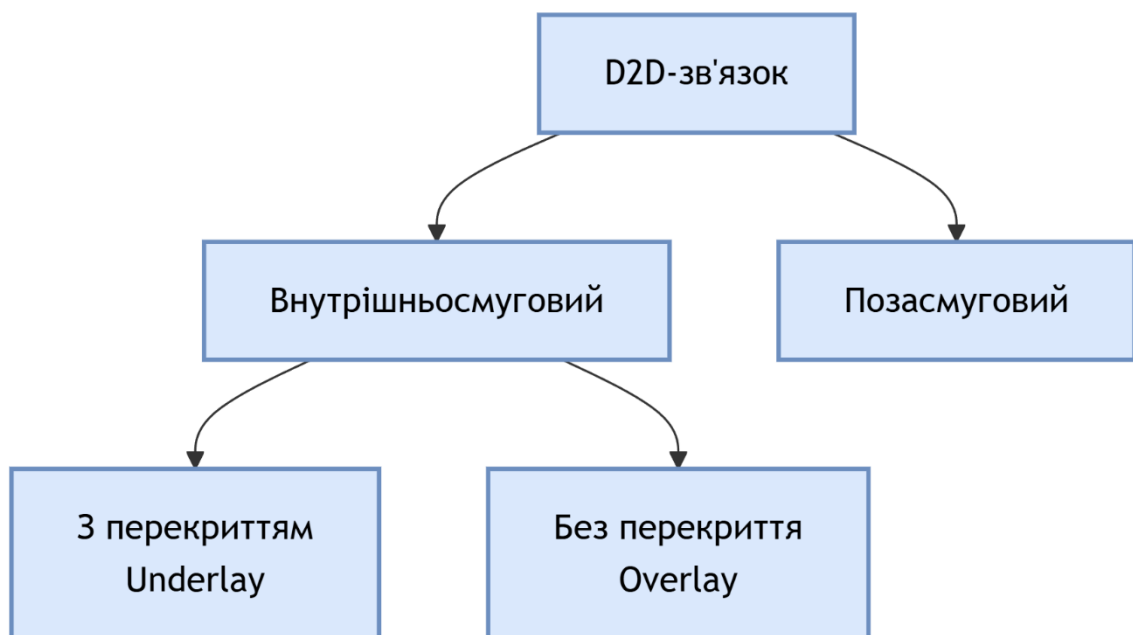


Рисунок 1.3 – Види доступу до спектра D2D-зв'язок

Робота в внутрішньосмуговому спектрі (in-band D2D) забезпечує високий рівень контролю з боку оператора та можливість гарантування параметрів якості обслуговування. У цьому випадку D2D-користувачі можуть або ділити спектр зі стільниковими абонентами, що підвищує спектральну ефективність, але потребує ретельного контролю інтерференції, або отримувати окремо виділені частоти, що усуває внутрішньосотні завади за рахунок розділення ресурсів між типовим стільниковим і D2D-трафіком. Робота в позасмуговому спектрі (out-band D2D) передбачає використання діапазонів без ліцензії, що дозволяє уникнути завад зі стільниковими каналами, але робить систему залежною від непередбачуваної активності інших користувачів спектра.

У даній роботі основну увагу зосереджено на in-band network-assisted D2D-зв'язку, оскільки саме він відкриває найбільш перспективні можливості для розвитку короткодістанційних бездротових систем. На відміну від Bluetooth та Wi-Fi Direct, які працюють у переповнених ISM-діапазонах і характеризуються нестабільністю рівня завад, in-band D2D використовує ліцензований спектр із гарантованими параметрами якості, що досягаються завдяки централізованому управлінню інтерференцією. Важливою перевагою є також синхронізація пристроїв із мережею, яка зменшує потребу у постійному скануванні середовища, скорочує енергоспоживання та подовжує час автономної роботи обладнання. Крім того, D2D-пристрої можуть працювати з вищою потужністю порівняно з Bluetooth, що збільшує зону виявлення та покриття. Однією з ключових переваг такого підходу є можливість прозорого для користувача розвантаження базової станції у зонах високої концентрації трафіку, коли мережа автоматично активує прямий канал між пристроями, якщо це технічно можливо та доцільно. Порівняльні характеристики Wi-Fi Direct, Bluetooth та in-band D2D узагальнено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика

Характеристика	Внутрішньосмуговий D2D (In-band)	Wi-Fi Direct	Bluetooth
Стандартизація	3GPP LTE	IEEE 802.11	Bluetooth SIG
Частотний діапазон	Ліцензований діапазон для LTE-A	Неліцензований ISM-діапазон	Неліцензований ISM-діапазон
Контроль перешкод	Так	Ні	Ні
Макс. відстань передачі	1000 м	200 м	10-100 м
Макс. швидкість даних	1 Гбіт/с	250 Мбіт/с	24 Мбіт/с

1.4 Технологія D2D як інструмент підвищення ефективності 5G-мереж

Інтеграція D2D-взаємодії у стільникові мережі здатна забезпечити низку переваг як для користувачів, так і для операторів [12]:

- підвищення швидкості передавання даних і зменшення затримок завдяки прямому короткодистанційному зв'язку;
- зменшення енергоспоживання користувацьких пристроїв за рахунок сприятливих умов поширення сигналу;
- розширення зони покриття та покращення обслуговування користувачів на межі стільників;
- підвищення спектральної ефективності шляхом повторного використання частот традиційного стільникового зв'язку для D2D-каналів [13–15];
- розвантаження базових станцій, оскільки частина трафіку може передаватися без участі інфраструктури, що зменшує навантаження на центральні мережеві елементи [16, 17].

Завдяки цим перевагам D2D-комунікація привертає особливу увагу у процесі стандартизації LTE/5G (3GPP), розглядаючись як один із ключових

механізмів підвищення пропускної здатності та ефективності майбутніх мобільних мереж.

Разом з тим, впровадження D2D-взаємодії супроводжується низкою складних технічних проблем, зокрема:

- необхідністю ефективного управління радіоресурсами;
- мінімізацією перешкод між D2D та стільниковими каналами;
- оптимізацією потужності передавання та режимів зв'язку;
- забезпеченням стабільності та якості обслуговування у динамічних радіоумовах.

Саме ці виклики зумовлюють актуальність розроблення адаптивних моделей управління ресурсами для D2D-комунікацій.

1.5 Виклики мереж із підтримкою D2D-комунікації

Інтеграція функціональності device-to-device у стільникові мережі висуває низку технічних викликів, які потребують переосмислення традиційних принципів побудови та керування ресурсами бездротових систем. Однією з ключових проблем є вибір режиму роботи, тобто визначення умов, за яких два користувачі повинні встановлювати прямий зв'язок, а не маршрутизувати дані через базову станцію. У випадку in-band D2D комунікації цей вибір додатково включає вирішення питання щодо доцільності використання спільного або виділеного спектра. Проектні аспекти, пов'язані з цією задачею, охоплюють визначення цільових показників ефективності, вибір алгоритмічних підходів, вимоги до доступних вимірювань та періодичність оновлення рішень. Максимізація ефективності D2D-зв'язку, особливо в умовах підрежимного (underlay) використання спектра, потребує комплексного ухвалення рішень з урахуванням взаємозв'язку між вибором режиму, керуванням потужністю та розподілом піднесучих.

Суттєвим викликом є також управління спектром і інтерференцією. Оскільки розширення ліцензованого спектра потребує великих фінансових і

організаційних витрат, ефективне використання наявних ресурсів стає критично важливим. У режимі піддіапазонного D2D зв'язку інтерференція ускладнюється як міжсотніми взаємодіями, характерними для традиційних стільникових мереж, так і внутрішньосотніми завадами, спричиненими появою додаткових D2D-передач. На відміну від класичних систем, де завадні передавачі зазвичай розташовані на відстані, близькій до радіуса стільника, у D2D сценаріях інтерференційні вузли можуть виникати на будь-якій відстані, що суттєво ускладнює забезпечення стабільності параметрів якості.

Не менш важливою є проблема балансування продуктивності, обчислювальної складності та сигналізаційних накладних витрат. Алгоритми оптимального розподілу радіоресурсів часто передбачають розв'язання складних неконвексних або комбінаторних оптимізаційних задач, що є не тільки ресурсоємним, але й погано масштабованим рішенням для реальних систем. Багато з таких методів покладаються на повну інформацію про стан каналів або на інтенсивний обмін інформацією між вузлами, що зумовлює значний рівень сигналізаційних витрат. Основне завдання полягає у пошуку компромісу між оптимальністю та практичною здійсненністю, зокрема у виборі між централізованими та децентралізованими підходами або між роздільною та спільною оптимізацією параметрів [16].

Окрему групу викликів утворюють питання виявлення сусідніх вузлів і забезпечення синхронізації. У самоорганізованих D2D-системах пошук потенційних вузлів здійснюється подібно до традиційних ad-hoc мереж: пристрої періодично передають сигнали, за якими інші користувачі можуть визначити їх наявність. Однак відсутність синхронізації зумовлює потребу в постійному моніторингу каналу, що значно збільшує енергоспоживання та знижує ефективність мобільних пристроїв. У мережево підтримуваних in-band D2D-системах синхронізація, що забезпечується інфраструктурою, спрощує процедуру виявлення, проте стандартизовані механізми обміну сигналами між користувачами наразі відсутні, що потребує розробки нових технічних рішень.

Вирішення перелічених проблем є предметом активних наукових досліджень. У цій дисертації основну увагу зосереджено на перших трьох напрямках, пов'язаних із вибором режиму роботи, керуванням спектром та інтерференцією, а також із пошуком ефективних підходів до розподілу радіоресурсів.

1.6 Постановка задачі

Метою роботи є розроблення та аналіз ефективності адаптивної моделі управління радіоресурсами, зокрема потужністю передавання та/або спектральним ресурсом, для забезпечення високопродуктивної взаємодії пристроїв у режимі Device-to-Device (D2D), водночас мінімізуючи ко-каналні завади, що виникають для абонентів стільникової мережі (Cellular Users, CU). Така постановка відповідає актуальним вимогам сучасних бездротових систем, де сумісне використання спектра різними типами трафіку потребує інтелектуальних і гнучких механізмів керування.

Для досягнення поставленої мети передусім необхідно сформулювати математичну модель бездротової мережі, що описує взаємодію D2D-пар та стільникових користувачів у спільному частотному діапазоні. Така модель має відображати особливості розподілу каналів, характеристики міжвузлових завад та обмеження, пов'язані з якістю обслуговування.

Подальшим етапом є розроблення адаптивного алгоритму, здатного динамічно коригувати параметри роботи D2D-зв'язку у відповідь на зміну радіоканалу, рівнів інтерференції та конфігурації мережі. На цьому етапі передбачається розгляд механізмів регулювання потужності передавання та/або вибору спектральних ресурсів, що забезпечували б збалансоване співіснування D2D та CU і зменшували негативний вплив D2D-трафіку на традиційних абонентів стільникової системи.

Важливою складовою дослідження є проведення симуляційного моделювання розробленої адаптивної моделі в середовищі Python. Це дасть

змогу оцінити поведінку системи в різних сценаріях завантаження, інтерференційного середовища та просторового розподілу користувачів, а також перевірити стійкість моделі до змінних умов.

Фінальним кроком є порівняльний аналіз отриманих результатів, зокрема таких метрик продуктивності, як пропускна здатність D2D-зв'язку, рівень завад для CU, а також енергоефективність пристроїв. Порівняння адаптивної моделі зі статичними підходами дозволить визначити приріст ефективності та обґрунтувати доцільність використання динамічного управління ресурсами в сучасних та перспективних бездротових мережах.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Технології радіоресурсного менеджменту у D2D-орієнтованих стільникових мережах

Інтеграція технології прямого зв'язку «пристрій-до-пристрою» (Device-to-Device, D2D) у традиційну архітектуру стільникових систем супроводжується необхідністю переосмислення наявних підходів до радіоресурсного менеджменту (Radio Resource Management, RRM). На відміну від класичної моделі взаємодії користувачів через базову станцію (BS), D2D-комунікація відкриває можливість прямої взаємодії між користувацьким обладнанням (UE), що створює інші вимоги до розподілу радіоресурсів, контролю потужності та координації частотно-часових ресурсів.

У системах з підтримкою D2D зв'язку RRM охоплює три ключові взаємопов'язані рішення:

- вибір режиму зв'язку (mode selection) — визначення, чи повинна пара користувачів взаємодіяти напряму або через базову станцію;
- контроль потужності (power control) — налаштування рівня передаваної потужності з метою забезпечення якості обслуговування (QoS) та мінімізації взаємних завад;
- розподіл часово-частотних ресурсів (resource allocation) — призначення фізичних ресурсних блоків (RBs) користувачам.

Ці три процеси не є незалежними. Наприклад, оптимальний вибір режиму значною мірою залежить від того, які ресурси можуть бути виділені для пари користувачів та яку передавальну потужність їм можна призначити. Якщо система прагне мінімізувати енергоспоживання або обмежити рівень завад, то рішення щодо режиму зв'язку, виділених RB та контролю потужності мають прийматися узгоджено. У загальному випадку визначення режиму для пари UE зводиться до вибору: чи повинна ця пара використовувати виділений ресурс, чи може вона ділити один і той самий ресурс із наявними

для дотримання заданого SINR), так і сучасні оптимізаційні та машинно-навчальні підходи. Розподіл ресурсів часто формулюється як задача оптимізації (іноді NP-складна) або як проблема призначення, що вирішується евристичними чи комбінованими методами.

2.2 Вибір режиму зв'язку

Вибір режиму зв'язку (mode selection) полягає у визначенні, чи повинна пара користувачів взаємодіяти через прямий D2D-канал — із виділеними або спільними ресурсами — чи через базову станцію. Оптимальність цього вибору залежить від критерію, що підлягає максимізації або мінімізації (наприклад, сумарна пропускна здатність, передавальна потужність, енергоспоживання або загальна ємність системи), а також від наявності інформації про стан каналів під час прийняття рішення. До важливих даних належать фізична відстань між вузлами, якість каналів, рівень завад та інші параметри радіосередовища.

Найпростіші, інтуїтивні підходи базуються на оцінці втрат на шляху, які безпосередньо залежать від відстані між користувачами. Так, у роботі [10] D2D-режим активується, якщо втрати на шляху для пари користувачів є меншими за заданий поріг. Інший метод, наведений у [15], враховує як відстань між D2D-користувачами (r_d), так і відстань між UE та базовою станцією (r_c). У цьому підході D2D-режим обирається, якщо виконується умова $T_d r_d^{-\alpha} \geq r_c^{-\alpha}$, де α — показник втрат на шляху, а T_d — коефіцієнт зміщення, за допомогою якого можна керувати ступенем розвантаження стільникової інфраструктури. Зі збільшенням T_d більша кількість користувацьких пар переходить до D2D-взаємодії.

Приклад алгоритму, що використовує залежні відстані критерії вибору режиму для більш складного середовища, подано в [13]. Автори розглядають систему з фіксованими ретрансляторами, які підтримують стільниковий зв'язок, а вибір режиму для D2D-пари здійснюється між підкладеним

(underlay) та накладеним (overlay) D2D-зв'язком. Різні схеми розподілу спектра та різні можливі вузли для прийому uplink-трафіку формують множину варіантів режимів, серед яких алгоритм обирає той, що забезпечує максимальну сумарну пропускну здатність.

Деякі сучасні підходи враховують не лише відстань, а й якість каналу. У роботі [16] запропоновано метод, який оцінює як параметри каналів передавання, так і рівні завад, що виникають під час спільного використання uplink- або downlink-ресурсів D2D-користувачами та стільниковими UE. Метою є максимізація сумарної швидкості при дотриманні обмежень на значення SINR для активних стільникових ліній зв'язку. Авторами також проаналізовано розширення алгоритму на багатосотовий сценарій, де на рішення впливає міжкоміркова інтерференція, хоча це значно збільшує обсяг сигналізаційних витрат.

У більшості досліджень вибір режиму аналізується в умовах одноантенних систем із пріоритетом для стільникових користувачів [12, 16]. На відміну від цього, у [16] розглянуто систему з багатомодовою базовою станцією та рівними пріоритетами для всіх користувачів. Автори досліджують два підходи: максимізацію швидкості при фіксованій потужності та мінімізацію потужності при забезпеченні заданої швидкості. Вони отримують аналітичні розв'язки в замкненій формі та демонструють, що попри тісний зв'язок між цими задачами, результати вибору режиму можуть суттєво відрізнятися.

Більшість робіт зосереджені на ізольованій стільниці, де міжкоміркові завади або ігноруються, або вважаються компенсованими іншими механізмами інтерференц-менеджменту. У багатосотових системах вибір режиму значно ускладнюється не лише додатковими завадами, а й тим, що рішення може включати асоціацію користувача з базовою станцією. У роботі [17] досліджено сумісну оптимізацію вибору режиму та асоціації UE з метою максимізації отриманого SINR при обмеженні на кількість користувачів у

кожній стільниці. Автори використовують підхід на основі теорії графів для оптимального розв'язання задачі цілочислового програмування.

Варто зазначити, що довкола задачі mode selection існує низка практичних питань, які впливають на ефективність алгоритмів. Серед них — частота оновлення режиму зв'язку, обсяг необхідної інформації про стан каналу та частота її передавання. З одного боку, масштаб оновлення не може бути надто грубим через швидкі зміни каналу, а з іншого — надмірний сигналізаційний трафік є небажаним. Тому в реальних системах важливо забезпечити баланс між точністю рішень і витратами на інформаційний обмін.

2.3 Управління потужністю

Механізми керування потужністю відіграють ключову роль у стільникових мережах, оскільки забезпечують призначення передавальних потужностей користувачам таким чином, щоб підтримувати задану швидкість передавання даних. У системах третього покоління (3G) керування потужністю було критично важливим, особливо в uplink-каналі, з метою вирішення проблеми «близько-далеко». Це пояснюється тим, що одночасні передачі до базової станції є неортогональними, а високі рівні потужності від користувачів, розташованих поблизу стільникової вежі, можуть пригнічувати слабкі сигнали з периферії стільника.

У мережах четвертого покоління (4G) внутрішньостільникові завади не становлять суттєвої проблеми, оскільки uplink-передавання використовує ортогональні ресурси. У таких системах механізм керування потужністю виконує переважно функцію повільної компенсації втрат на шляху та тінювих ефектів, тоді як швидкі процедури планування ресурсів перебирають на себе основну роль у збільшенні швидкості доступу користувачів [12, 16].

Разом з тим поява D2D-комунікацій у перспективних мережах п'ятого покоління (5G), які використовують повторне застосування стільникового

спектра, знову актуалізує необхідність удосконалених механізмів керування потужністю. Це зумовлено потребою ефективно опрацювати нові сценарії внутрішньостільникових завад, а також знижувати енергоспоживання короткодістанційних з'єднань D2D.

У мережах із підтримкою D2D традиційно вважається, що стільникові користувачі мають найвищий пріоритет, і їм має бути гарантовано певний рівень якості зв'язку. Інтуїтивним підходом до зменшення завад від D2D-передавання для стільникових ліній є обмеження передавальної потужності D2D-користувачів. У [18] аналізується задача для односотового сценарію, де потужність передавального вузла D2D обирається так, щоб зниження SINR стільникового користувача порівняно зі значенням SNR (тобто без завад) не перевищувало 3 дБ. У роботі [19] запропоновано схожий метод: зменшення потужності D2D за допомогою параметра відступу (back-off), що дозволяє зменшити завади в uplink-ресурсах стільника. Однак, оскільки менша потужність скорочує дальність D2D-зв'язку, у цьому підході додатково збільшується потужність стільникових користувачів, щоб компенсувати вплив завад.

У [20] проведено оцінювання різних схем керування потужністю LTE для гібридної системи «стільниковий зв'язок + D2D». Робота має переважно симуляційний характер, однак надає важливі висновки щодо впливу різних підходів. Наприклад, схема фіксованої передавальної потужності є простою, проте через значну варіативність значень SINR у D2D-каналах може забезпечувати надто високі показники для одних користувачів та недостатні — для інших. У випадку схеми з фіксацією цільового значення SNR вибір цього порогу суттєво впливає як на призначену потужність, так і на кінцевий рівень SINR для заводових передавань. Узгоджуючись із важливістю критерію вибору режиму зв'язку, автори доходять висновку, що замкнене LTE-керування потужністю з динамічним кроком налаштування є перспективним механізмом для D2D-користувачів.

Попри свою важливість, окремий механізм керування потужністю не може повністю усунути взаємні завади між різними типами зв'язку. Тому він потребує інтеграції з іншими компонентами RRM — вибором режиму, плануванням ресурсів та адаптацією параметрів каналу.

У роботі [14] пропонується алгоритм максимізації енергоефективності системи, визначеної як відношення сумарної пропускної здатності до сумарної передавальної потужності користувачів. Після оцінювання всіх можливих комбінацій режимів алгоритм обирає найкращу, однак його основним недоліком є необхідність повного перебирання всіх варіантів, що різко збільшує складність. У [15] розглядається інтегрований підхід, який включає контроль допуску, вибір режиму та керування потужністю з метою максимізації сумарної пропускної здатності та кількості користувачів, допущених до обслуговування. Задача формулюється як змішана цілочислова нелінійна оптимізація, складність якої експоненційно зростає з кількістю D2D-пар. Однак автори застосовують метод лінеаризації, що дозволяє отримати ϵ -оптимальні результати із гарантованими межами точності.

2.4 Розподіл часових і частотних ресурсів

Розподіл часових і частотних ресурсів між користувачами системи є ключовим компонентом радіоресурсного менеджменту, оскільки забезпечує не лише можливість використання частотного різноманіття каналів, але й підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності мережі шляхом інтелектуального повторного використання ресурсів.

Підходи до розподілу частотних ресурсів на основі відстаней між потенційно завадовими користувачами (стільниковими та D2D). Їхня основна ідея полягає в уникненні одночасного використання того самого ресурсу стільниковими та D2D-користувачами, якщо вони розташовані надто близько один до одного.

Розгляд задачі повторного використання спектра з позиції оптимізації зазвичай призводить до неконвексних та змішаних цілочислових формулювань, для яких отримання оптимального розв'язку є складним завданням навіть для мереж невеликого масштабу. Оптимальні результати можливі лише у спрощених сценаріях, як-от у [12], де розглядається модель із одним стільниковим користувачем та однією D2D-парою для спільної оптимізації потужності та розподілу ресурсів з метою максимізації пропускної здатності.

У низці робіт аналіз розподілу ресурсів обмежується одноосередковими моделями з різними критеріями оптимізації та системними обмеженнями. Запропоновано стратегію спільного використання ресурсів, за якої одна D2D-пара може повторно використовувати всі доступні стільникові ресурси без погіршення якості стільникових передач. Задача формулюється як проблема керування потужністю i , хоча є первинно неконвексною, автори демонструють, що її можна перетворити у конвексну та розв'язати оптимально. У [13] задача формулюється як змішана нелінійна цілочислова оптимізація. Через високу обчислювальну складність протягом коротких часових інтервалів планування (характерних для LTE) запропоновано також евристичний алгоритм, який обирає ресурси з найменшим крос-підсиленням між заводовими користувачами як придатні для повторного використання в uplink або downlink.

Сучасні дослідження, присвячені спільній оптимізації ресурсів i потужності для енергоефективних D2D-комунікацій, представлено у [18, 19]. У [21] метою є максимізація мінімальної зваженої енергоефективності D2D-лінків, де вагові коефіцієнти дозволяють керувати пріоритетами між ними. D2D-лінк може ділити ресурси з кількома стільниковими користувачами, але кожен стільниковий ресурс дозволено повторно використовувати не більш ніж одній D2D-парі, щоб обмежити рівень завод для стільникових передач. Задача розв'язується поетапно: спершу визначається оптимальний розподіл

потужності для стільникових лінків, після чого початкова задача трансформується у проблему спільної оптимізації ресурсів та потужності лише для D2D-з'єднань. Отримана задача є змішаною нелінійною цілочисловою оптимізацією, для якої застосовується метод гілок і меж. Автори також пропонують альтернативні рішення меншої складності з обмеженим обміном повідомленнями.

У [19] енергоефективний розподіл ресурсів формулюється як неконвексна комбінаторна задача з обмеженнями на повторне використання ресурсів, подібними до [18]. Використовуючи властивості дробового програмування, автори отримують розв'язок із застосуванням ітераційного методу. Крім того, запропоновано дворівневий ітераційний підхід, який у кожній ітерації розділяє початкову спільну задачу на дві окремі підзадачі оптимізації — для розподілу потужності та розподілу ресурсів.

Проблематика розподілу ресурсів у багатостільникових мережах вивчається значно менше. Більшість робіт роблять припущення про існування просунутого механізму міжстільникового придушення завад, який працює поверх алгоритмів розподілу ресурсів на рівні кожної окремої стільникової зони. Використано підхід часткового повторного використання частот (fractional frequency reuse), за якого стільникові та D2D-користувачі застосовують різні ресурси downlink залежно від свого розташування всередині стільника. Процедура, запропонована у [58], також ґрунтується на просторовому положенні користувачів, але потребує значного обсягу інформаційного обміну як між користувачами та базовими станціями, так і між самими базовими станціями.

2.5 Об'єднане управління радіоресурсами

На початку розділу було зазначено, що найвищу ефективність роботи системи забезпечує спільне розв'язання задач вибору режиму (mode selection),

контролю потужності (power control) та розподілу ресурсів у часі/частоті (time/frequency resource allocation). Огляд наукових джерел також підтверджує цей висновок.

Приклади таких комплексних постановок задач наведені в роботах [18-21] де здебільшого розробляються моделі змішаного цілочисельного програмування. У ряді досліджень такі задачі розв'язуються офлайн, із метою отримання еталонних результатів та оцінки потенційних переваг використання D2D-комунікацій.

Інші дослідники пропонують альтернативні підходи, серед яких:

- декомпозиція об'єднаної задачі на набір підзадач з подальшим їх поетапним розв'язанням [12];
- застосування практичних евристичних методів, що значно зменшують складність порівняно з оптимізаційними моделями [13];
- використання ігрових моделей для опису взаємодії між користувачами та визначення рівноважних стратегій [14].

Результати числового моделювання, отримані в [12], демонструють, що правильно спроектовані евристичні алгоритми можуть забезпечити продуктивність, близьку до оптимальної, але при цьому значно знижують обчислювальну складність та потребу в сигналізації.

2.6 Висновки до розділу

Застосування D2D-комунікацій у стільникових мережах стає можливим за умов використання інтелектуальних методів управління радіоресурсами, до яких належать вибір режиму взаємодії, контроль потужності та розподіл часових/частотних ресурсів. Найбільш інтуїтивним підходом до вибору режиму зв'язку та зменшення взаємних завад є врахування втрат на поширення сигналу, що відображають фізичну відстань між користувачами. Такий підхід забезпечує просту геометричну інтерпретацію, однак не враховує

реальної якості радіоканалів, на які суттєво впливають тіньові ефекти та миттєві завади.

Тому в сучасних RRM-стратегіях перевага надається використанню інформації про стан каналу (CSI) та значень SINR, які дозволяють ухвалювати більш обґрунтовані рішення. Оптимізаційні підходи забезпечують найвищі показники продуктивності системи, проте часто характеризуються високою обчислювальною складністю та значним сигналізаційним навантаженням, особливо у випадку спільного розв'язання трьох задач RRM.

З огляду на це, більшість наявних досліджень зосереджені або на індивідуальному розгляді задач вибору режиму, контролю потужності чи розподілу ресурсів, або на розробленні практичних евристичних алгоритмів, які забезпечують прийнятний компроміс між оптимальністю та реалізованістю. Такий підхід дозволяє адаптувати D2D-комунікації до вимог майбутніх мереж, забезпечуючи підвищення спектральної ефективності та зменшення енергоспоживання за збереження допустимого рівня завад для користувачів стільникової системи.

3 СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ D2D

3.1 Обґрунтування прийнятих способів проєктування та підходів до дослідження

У даній роботі для реалізації адаптивної моделі управління ресурсами в мережах із підтримкою Device-to-Device (D2D) обрано комбінований підхід, що поєднує аналітичне моделювання, методи оптимізації та імітаційне моделювання.

Аналітичний компонент ґрунтується на математичному описі стільникової мережі, характеристик каналу та взаємодії D2D-пари з користувачами стільникового зв'язку (CU). Методи оптимізації застосовуються для розв'язання задач управління потужністю та/або вибору каналу за критеріями мінімізації ко-канальних завад та максимізації пропускної здатності D2D-зв'язку.

Імітаційне моделювання в середовищі Python обґрунтовує вибір адаптивних стратегій управління, забезпечує оцінювання продуктивності за множиною метрик та дає змогу порівняти запропонований адаптивний підхід зі статичними схемами. Обрані способи моделювання забезпечують відтворюваність результатів і коректне відображення динамічної природи радіоканалів.

3.2 Вибір та обґрунтування принципів побудови функціональної схеми

Проєктування комп'ютерної системи моделювання адаптивного управління радіоресурсами для Device-to-Device (D2D) взаємодій потребує визначення ключових структурних елементів та принципів їх взаємодії. Оскільки система повинна відтворювати роботу стільникової мережі, що

підтримує спільне використання спектральних ресурсів стільниковими користувачами (Cellular Users, CU) та D2D-парами, функціональна схема базується на модульному підході, який забезпечує масштабованість, узгодженість моделей та можливість адаптивного вибору параметрів керування.

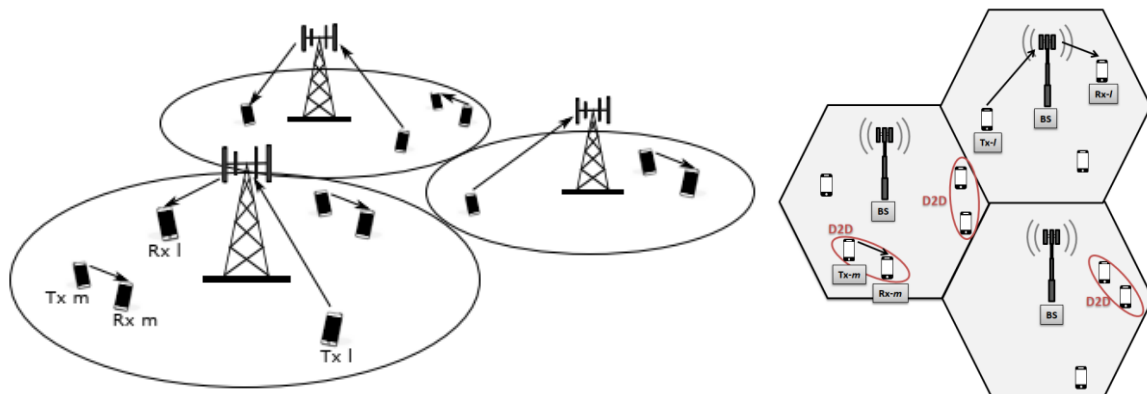


Рисунок 3.1 – Модель багатоелементної мережі з підтримкою D2D

У межах дослідження розглядається стільникова мережа, що складається з множини базових станцій B . Кожна базова станція (BS) розташована в центрі комірки та обслуговує користувачів, які перебувають у її радіусі дії. Набір логічних передавач-приймач пар позначається множиною L , де кожна пара формує логічне з'єднання між передавачем (Tx) та приймачем (Rx). Таке логічне з'єднання може представляти як класичну взаємодію CU через BS (uplink/downlink), так і безпосередній D2D-зв'язок. Ця структура становить основу функціональної схеми, оскільки визначає сутності, що беруть участь у моделюванні, та їхню взаємодію.

Для забезпечення коректного відтворення механізмів доступу до радіоресурсів у моделі використано принципи ортогонального частотного мультиплексування (OFDM), що відповідає архітектурі LTE. Системна смуга пропускання поділяється на множину ресурсних блоків F , кожен з яких характеризується фіксованою шириною у частоті W та тривалістю T . Ресурсний блок (RB) є найменшою одиницею радіоресурсу, яку може бути

призначено CU або запитано D2D-парами. У класичному LTE RB складається з 12 суміжних піднесучих по 15 кГц, що формують 180 кГц на часовий інтервал 0,5 мс. Це забезпечує реалістичність моделювання процесів розподілу ресурсів.

Побудована функціональна схема системи передбачає повний буферний трафік, тобто передавачі завжди мають дані для передачі. Передавальна потужність P_f^m визначається окремо для кожного логічного з'єднання та ресурсного блока, з урахуванням обмеження максимальної потужності P_{\max} для кожного передавача. Усі приймачі розглядають міжкористувацькі завади, що виникають у разі повторного використання RB, як додатковий шум. Це дозволяє формалізувати досяжну пропускну здатність з'єднання через класичну формулу Шеннона (3.1), де SINR моделюється з урахуванням завад від усіх інших активних передавачів.

Важливою складовою функціональної схеми є канална модель, що описує впливи ослаблення сигналу, тінювих ефектів та багатопроменевого поширення. У моделюванні застосовуються кілька типів каналів залежно від задачі: від простих моделей втрат на відстані (корисних для аналізу режиму взаємодії), до комплексних моделей ITU та моделей із Rayleigh або Rician швидким завмиранням, особливо актуальних для коротких D2D-лінків з наявністю лінії прямої видимості. Для сценаріїв з OFDM також враховано частотно-селективне завмирання.

При моделюванні сценаріїв доступу до спектру розглядаються два основні режими: overlay D2D та underlay D2D. Для класичних стільникових користувачів застосовується ортогональний доступ до RB. У режимі underlay D2D повторне використання ресурсів призводить до виникнення між- та внутрішньоклітинних завад. Це потребує моделювання взаємодії між D2D-передавачами, CU та BS. У дисертації прийнято припущення, що D2D-зв'язки використовують ресурси uplink, що узгоджується з реальною асиметрією

навантаження стільникових мереж та здатністю BS краще обробляти завади, ніж мобільні пристрої.

Функціональна схема також охоплює можливість моделювання full-duplex (FD) D2D-взаємодій (рис.3.2), що дозволяє оцінити вплив самозавад та потенційний приріст спектральної ефективності.

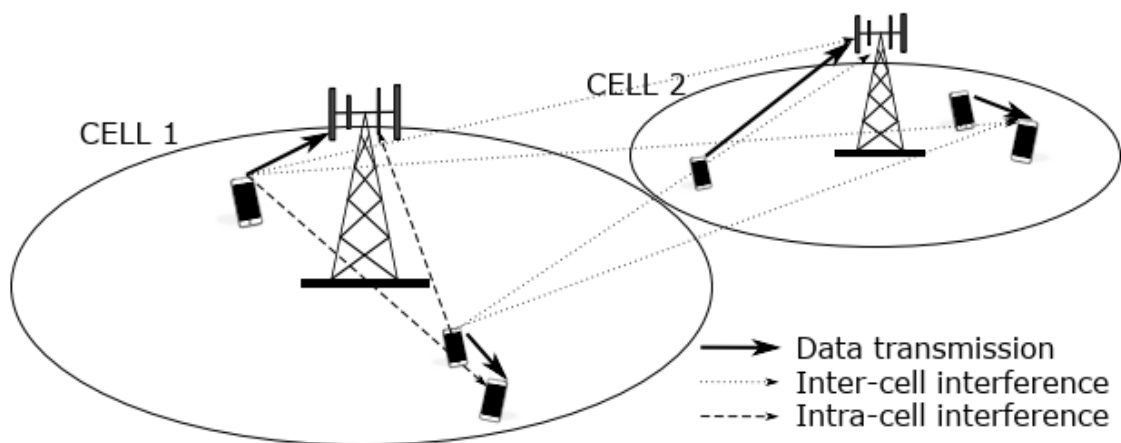


Рисунок 3.2 – Функціональна схема моделювання full-duplex D2D-взаємодій

Таким чином, запропонована структура комп'ютерної системи моделювання забезпечує узгоджене відтворення топології мережі, каналів, механізмів розподілу ресурсів та впливу завад. Вона створює основу для реалізації адаптивних алгоритмів управління потужністю, вибору режиму та розподілу ресурсів, що будуть розглянуті в подальших підрозділах даного розділу.

Складність управління перешкодами ще більше зростає в мультिकанальному сценарії, де існують не тільки внутрішньоканальні перешкоди, спричинені наявністю D2D-з'єднань, але й міжканальні перешкоди, спричинені повторним використанням частот між каналами. Внутрішньоканальні та міжканальні перешкоди в підкладковій D2D-

комунікації з використанням ресурсів UL проілюстровано на рис. 3.3 для простої двоканальної мережі.

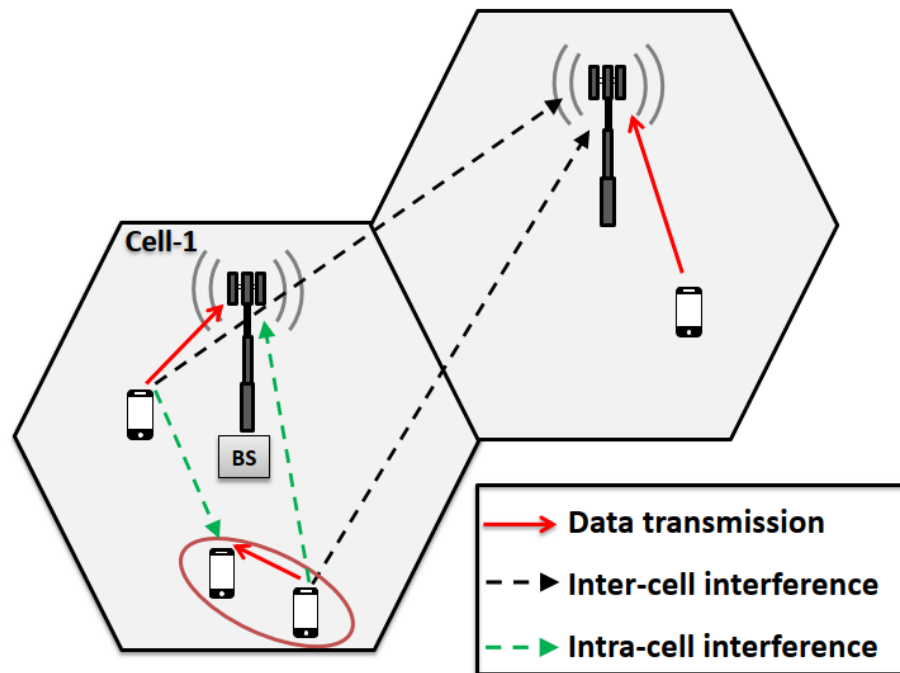


Рисунок 3.3 – Приклад міжклітинних та внутрішньоклітинних перешкод у передачах UL

3.3 Проєктування адаптивної системи управління ресурсами D2D за заданими показниками

Проєктування адаптивної системи управління ресурсами для взаємодії D2D має на меті створення програмної моделі, здатної імітувати складні динамічні умови бездротового середовища та демонструвати ефективність запропонованого алгоритму. Це передбачає деталізацію функціональних блоків, їх взаємозв'язків, а також обґрунтування програмної та апаратної бази, необхідної для проведення дослідження.

Для забезпечення коректної роботи та аналітичної значущості адаптивної моделі, систему розділено на чотири основні функціональні блоки з чітко визначеними цільовими показниками. Блок моделювання радіоканалу має забезпечувати точність відтворення втрат поширення та підтримувати

моделі затухання, тіньового та швидкого федингу. Блок інтерференційного аналізу повинен коректно визначати потужність корисного та завадового сигналу, необхідного для точного розрахунку SINR для D2D та CU. Блок адаптивного управління є ядром системи, його цільовими показниками є забезпечення мінімізації завад стільникового користувача (CU), максимізація пропускної здатності D2D та забезпечення високої енергоефективності. Нарешті, блок симуляційного аналізу орієнтований на гнучку параметризацію сценаріїв та підтримку статистичної оцінки результатів, що є важливим для верифікації моделі.

Структурно система складається з п'яти взаємопов'язаних елементів, які забезпечують виконання адаптивного циклу управління (рис.3.4). Це генератор параметрів каналу, що формує динамічні умови поширення сигналу, модуль взаємодії D2D-пари та CU, який визначає інтерференційні зв'язки між усіма учасниками, та адаптивний модуль управління. Останній на основі поточного SINR приймає рішення щодо корекції потужності або вибору каналу, виконуючи оптимізаційну мету. Оцінка ефективності здійснюється модулем оцінки продуктивності, який розраховує throughput, SINR та енергоспоживання, а комунікаційний інтерфейс моделі забезпечує зовнішню взаємодію: параметризацію та виведення даних. Функціональна схема відображає ітеративний характер взаємодії цих модулів [16].

Оскільки система реалізується як програмна симуляційна модель, її апаратна база визначається вимогами до обчислювальної потужності. Для ефективної роботи необхідний багатоядерний процесор з підтримкою SIMD-операцій для прискорення математичних розрахунків та оперативна пам'ять обсягом від 8–16 GB для зберігання масивів даних. Програмна елементна база включає середовище Python, а також критично важливі бібліотеки, такі як NumPy для ефективної роботи з векторами та матрицями, Matplotlib для візуалізації результатів, та, опційно, PyTorch/TensorFlow для реалізації більш складних адаптивних моделей на основі машинного навчання.

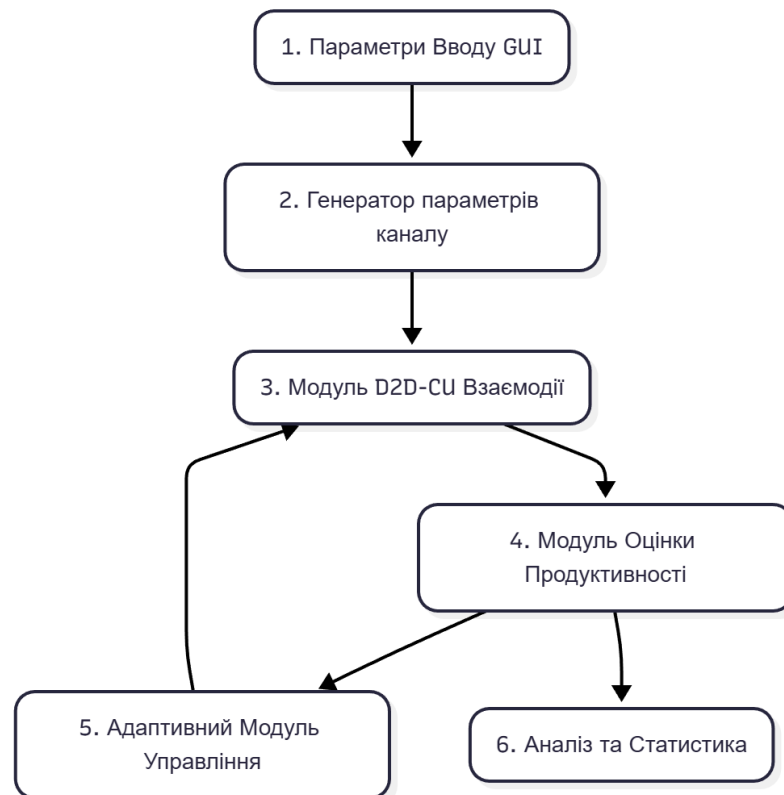


Рисунок 3.4 – Структурна схема

Принципові схеми відображають внутрішню алгоритмічну логіку ключових вузлів, включаючи схему розрахунку завад та SINR за формулами, що визначають відношення корисного сигналу до суми завад та шуму, а також схему адаптивного циклу зворотного зв'язку. Ця схема формалізує ітераційний процес, де на кожному часовому слоті здійснюється моніторинг стану каналу та динамічне коригування потужності передавання. На основі цього циклу реалізуються конкретні механізми, такі як схема оновлення потужності (наприклад, *water-filling* або *fractional power control*). Програмна реалізація системи базується на модульному підході, що включає модулі генерації сценаріїв, розрахунку моделей каналу та інтерференції, а також безпосередньо реалізацію адаптивного алгоритму управління. Завершальними компонентами є модулі збору статистики та візуалізації, а також програмні інтерфейси для забезпечення аналізу чутливості моделі до різних режимів роботи.

Представлена функціональна схема на рис.3.5 відображає архітектуру адаптивної системи бездротового зв'язку, призначеної для забезпечення оптимального компромісу між якістю сигналу (визначається кодуванням джерела) та надійністю доставки даних (визначається кодуванням каналу та модуляцією) в умовах динамічно змінного бездротового середовища. Система складається з двох основних трактів — Передавача та Приймача — об'єднаних центральним керуючим модулем.

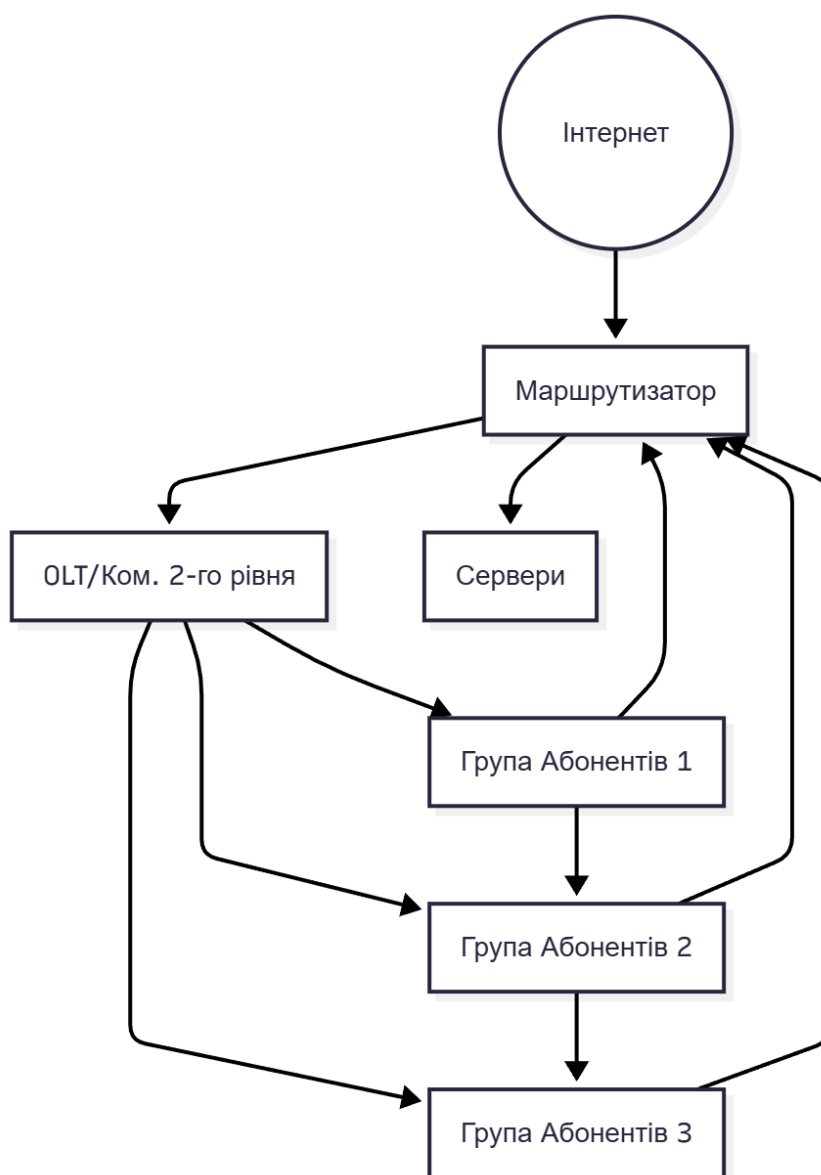


Рисунок 3.5 – Функціональна схема

На тракті передавача вхідний цифровий сигнал РСМ (Імпульсно-кодова модуляція) проходить послідовну обробку. Спочатку блок Аудіо Кодування (кодування джерела) стискає вхідні дані для зменшення надлишковості. Далі блок Кодування Каналу додає надлишковість, необхідну для виявлення та виправлення помилок, які можуть виникнути в ефірі. Підготовлений потік даних надходить до блоку Модуляція, який перетворює цифрові біти на аналогові символи, придатні для передачі через Бездротовий Канал. Ключовим моментом є те, що швидкість кодування і схема модуляції в цих трьох блоках контролюються центральним модулем.

Отриманий через Бездротовий Канал сигнал проходить зворотну обробку: Демодуляція відновлює цифрові символи; Декодування Каналу виправляє помилки; а Аудіо Декодування відновлює оригінальний РСМ-сигнал. Синхронізація швидкостей і схем між кодуванням/декодуванням каналу та модуляцією/демодуляцією також забезпечується керуючим модулем.

Основою цієї адаптивної архітектури є центральний блок Спільне Керування Швидкістю Кодування (Joint Coding Rate Control). Його рішення ґрунтуються на інформації про якість каналу, що надходить у вигляді Індикатора Якості Каналу (CQI), який генерується з Бездротового Каналу. CQI слугує механізмом зворотного зв'язку і відображає поточні умови, такі як SINR. Отримавши CQI, керуючий блок динамічно коригує параметри: він може зменшити швидкість Аудіо Кодування (знизити якість звуку) для звільнення бітрейту, який потім інвестується у більш стійке Кодування Каналу або менш агресивну Модуляцію. Це дозволяє системі адаптуватися до погіршення умов каналу, зберігаючи при цьому найвищу можливу якість передачі.

Принципова схема програмної реалізації наведена на рис.3.6.

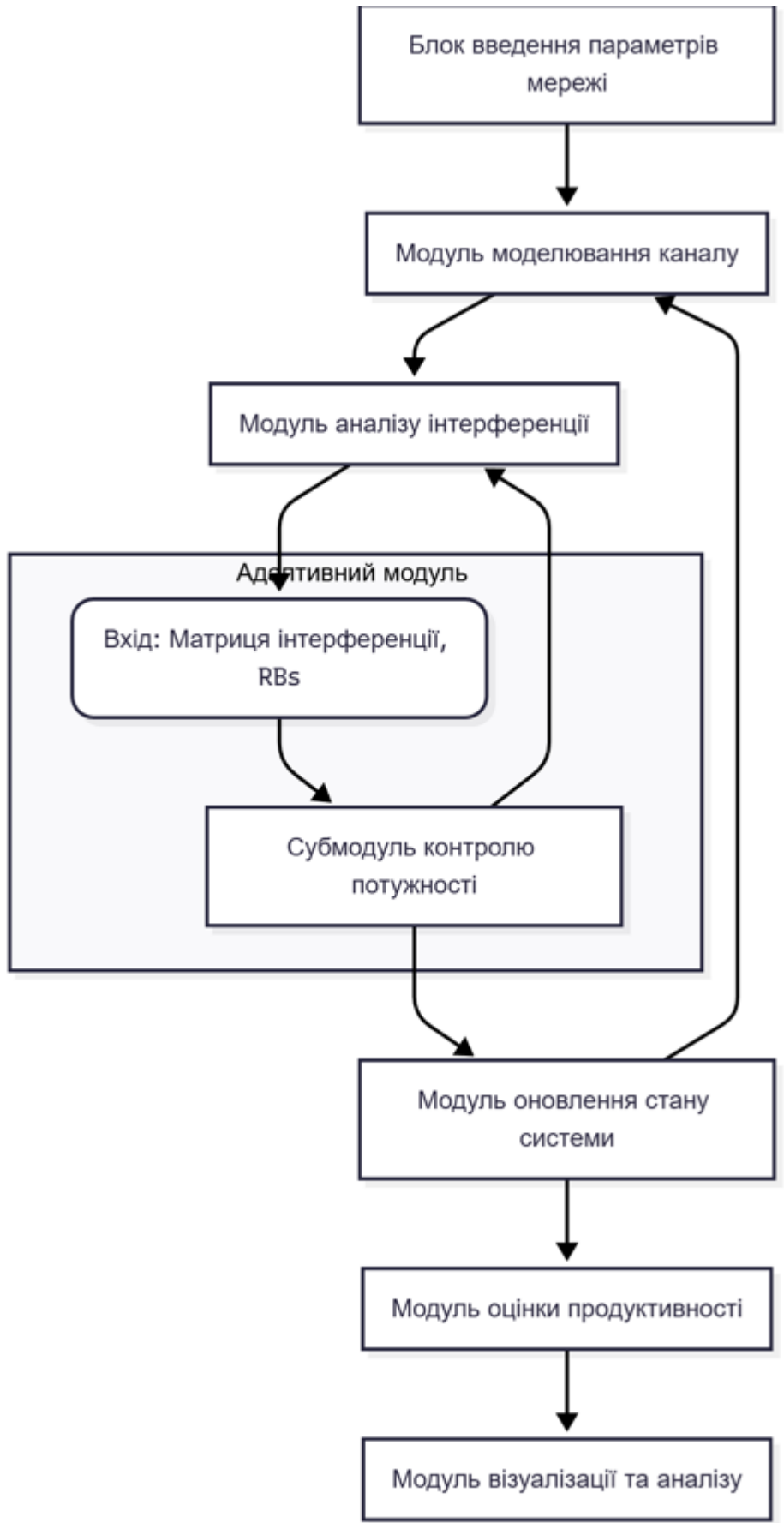


Рисунок 3.6 – Принципова схема програмної архітектури

Принципова схема комп'ютерної системи моделювання адаптивного управління ресурсами D2D включає низку функціональних блоків, які взаємопов'язані для забезпечення ефективного управління ресурсами та оцінки продуктивності мережі.

Першим блоком є блок введення параметрів мережі, який приймає на вхід координати користувачів (як звичайних, так і D2D), сценарій навантаження, частотні ресурси та характеристики базової станції (BS). На виході він формує параметри для подальшого моделювання каналів і управління ресурсами.

алі працює модуль моделювання каналу, який враховує загасання сигналу через відстань (path loss), затінення (shadowing), а також швидке згасання типу Rayleigh або Rician і частотно-селективне згасання. Вихід модуля – коефіцієнти каналів G_{flm} , а також значення SNR та SINR для кожного лінку.

Наступним блоком є модуль аналізу інтерференції, який обчислює взаємні перешкоди між користувачами CU і D2D та формує матрицю інтерференції. На виході отримується ефективний SINR для кожного лінку, що використовується у прийнятті рішень щодо управління ресурсами.

Адаптивний модуль управління ресурсами складається з двох субмодулів: вибору каналу та контролю потужності. Субмодуль вибору каналу (RB assignment) отримує на вхід матрицю інтерференції та перелік доступних ресурсних блоків і формує вихід – призначені ресурси для D2D-з'єднань. Субмодуль контролю потужності використовує призначені ресурси та поточні значення SINR для визначення оптимальних рівнів потужності передавачів.

Модуль оновлення стану системи приймає результати адаптації потужності та призначення ресурсів і генерує оновлені параметри Tx/Rx для наступної ітерації моделювання.

Модуль оцінки продуктивності розраховує ключові метрики, такі як пропускна здатність (throughput), енергоефективність, рівень перешкод для CU та показник outage. На виході формуються статистичні дані для подальшого аналізу.

Нарешті, модуль візуалізації та аналізу будує графіки, таблиці та порівняння різних сценаріїв, забезпечуючи наочне представлення результатів моделювання.

3.4 Висновки по розділу

Здійснено синтез та обґрунтування архітектури комп'ютерної системи моделювання адаптивного управління ресурсами для мереж із підтримкою D2D, що заклало необхідну методологічну та програмну базу для подальших досліджень. Обґрунтовано вибір комбінованого підходу, що поєднує аналітичне моделювання для опису стільникової мережі та характеристик каналу, методи оптимізації для розв'язання задач управління потужністю і вибору каналу, та імітаційне моделювання в середовищі Python, що забезпечує відтворюваність динамічної природи радіоканалів і дозволяє порівняти адаптивні стратегії зі статичними схемами.

Функціональна схема системи була побудована на модульному принципі, який забезпечує масштабованість та узгодженість моделей, що відображає роботу стільникової мережі із підтримкою спільного використання спектральних ресурсів. Для забезпечення реалістичності моделювання використані принципи OFDM (поділ смуги на Ресурсні Блоки) та комплексні каналні моделі (втрати на відстані, тіньове, Rayleigh/Rician та частотно-селективне згасання). Ключовим архітектурним елементом, який визначає логіку роботи, є принципова схема програмної архітектури. Вона формалізує ітераційний цикл управління із шести модулів: Введення параметрів,

Моделювання каналу, Аналіз інтерференції, Адаптивний модуль, Оновлення стану системи та Оцінка продуктивності/Візуалізація.

Ядром системи є Адаптивний модуль управління ресурсами, який складається з субмодулів вибору каналу (RB assignment) та контролю потужності. Цей модуль має на меті мінімізувати завади стільникових користувачів (CU) при максимізації пропускну здатності D2D-зв'язку. Критичним для адаптивного процесу є ітераційний характер моделі, який підтримується зворотними зв'язками від Модуля оновлення та Субмодуля контролю потужності, що дозволяє системі динамічно коригувати параметри на кожному часовому слоті. Крім того, архітектура також охоплює принцип Спільного Керування Швидкістю Кодування (Joint Coding Rate Control), де центральний блок адаптує параметри Аудіо Кодування, Кодування Каналу та Модуляції на основі індикатора якості каналу (CQI), забезпечуючи оптимальний баланс якості та надійності передачі даних.

Програмна реалізація системи ґрунтується на середовищі Python з використанням бібліотек NumPy та Matplotlib, що відповідає вимогам до ефективності математичних розрахунків та наочної візуалізації результатів. Таким чином, синтезована комп'ютерна система моделювання повністю відповідає поставленим завданням, забезпечує узгоджене відтворення всіх механізмів управління ресурсами та готова до реалізації та проведення симуляційного аналізу ефективності запропонованих адаптивних алгоритмів.

4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Призначення та сфера застосування програмного забезпечення

Розроблене програмне забезпечення призначене для моделювання процесів прямого обміну даними між абонентськими пристроями (Device-to-Device, D2D) у стільникових мережах п'ятого покоління (5G) з можливістю подальшого використання в дослідженнях майбутніх систем шостого покоління (6G). Основною функцією програми є імітація роботи адаптивного алгоритму управління потужністю передавання в D2D-парах з урахуванням завадової взаємодії з користувачами стільникової мережі (Cellular Users, CU). У програмі реалізовано послідовний ітераційний процес, під час якого D2D-передавач адаптує свою потужність відповідно до рівня створюваної ним завади, що дозволяє досліджувати стабілізацію параметрів зв'язку, пропускної здатності та енергоспоживання.

Функціональні можливості забезпечують:

- моделювання процесів радіоресурсного менеджменту в умовах сумісного доступу до спектру;
- оцінювання поточних значень SINR, пропускної здатності та рівня завад;
- візуалізацію динаміки зміни потужності та пропускної здатності у вигляді графіків;
- інтерактивну зміну вхідних параметрів моделі через графічний інтерфейс користувача;
- автоматичне обчислення середніх технічних показників за результатами симуляції.

Сфера застосування програмного забезпечення охоплює такі напрямки:

- дослідження радіоресурсного менеджменту в 5G/6G системах — інструмент дозволяє оцінювати ефективність алгоритмів управління

потужністю, взаємодії між D2D та CU і поведінку системи при зміні ключових параметрів;

- аналіз алгоритмів сумісного використання радіочастотного ресурсу — модель дає змогу досліджувати вплив D2D-трафіку на базову стільникову мережу та визначати оптимальні режими співіснування;

- освітні лабораторні роботи з телекомунікацій та радіотехніки — програму можна застосовувати як інтерактивний навчальний інструмент для демонстрації принципів роботи сучасних бездротових систем;

- інженерні розрахунки при проектуванні D2D-складових мереж — симулятор дозволяє наближено оцінити поведінку мережі та необхідні ресурси у сценаріях з високою щільністю пристроїв;

- моделювання поведінки систем зв'язку в умовах перешкод — забезпечує тестування роботи алгоритмів при змінених умовах поширення сигналів, різних рівнях завад і обмеженнях на потужність.

4.2 Обґрунтування технічних характеристик програми

Технічні характеристики розробленого програмного забезпечення визначалися відповідно до вимог моделювання адаптивних D2D-сценаріїв у стільникових мережах п'ятого покоління. Основними критеріями під час формування технічних параметрів були: забезпечення достатньої точності симуляційних розрахунків, можливість візуального аналізу результатів, простота модифікації моделі та стабільна робота застосунку на широкому спектрі користувацьких ПК без спеціалізованих апаратних ресурсів.

Для реалізації програмного забезпечення було обрано мову програмування Python, що є оптимальним середовищем для наукових розрахунків, побудови моделей та швидкого прототипування телекомунікаційних алгоритмів. Застосування Python обумовлене такими факторами:

- мова має широкий спектр інструментів для чисельних обчислень (NumPy), оптимізації, статистики та візуалізації (Matplotlib), що забезпечує можливість точного та швидкого моделювання процесів радіозв'язку;
- Python має стандартний набір графічних компонентів — Tkinter, що дозволяє створювати легкі інтерфейси без встановлення сторонніх середовищ. Це важливо для універсальності використання;
- висока читабельність коду та простота внесення змін дозволяють швидко доповнювати модель новими алгоритмами, параметрами чи сценаріями;
- Python є де-факто стандартом для моделювання комунікаційних систем у наукових інститутах та лабораторіях.

Завдяки цим перевагам Python забезпечує оптимальне співвідношення швидкодії, гнучкості та інтеграційних можливостей для дослідження D2D-комунікацій.

Для реалізації функціональності застосунку були використані такі бібліотеки: NumPy, Matplotlib, Tkinter та FigureCanvasTkAgg.

NumPy забезпечує високошвидкісну обробку масивів, векторизовані обчислення, що критично важливо для великої кількості ітерацій симуляції. Використовується для розрахунку загасання, SINR, пропускної здатності, а також усереднення результатів.

Matplotlib використовується для побудови графіків динаміки потужності та пропускної здатності D2D-лінку. Дозволяє інтерактивно відображати результати й порівнювати різні режими алгоритмів.

Tkinter – стандартний інструмент для створення графічного інтерфейсу користувача. Дозволяє реалізувати вікно параметрів симуляції, інтегрувати числові поля, кнопки, інформаційні блоки, розмістити елементи керування в зручному форматі.

FigureCanvasTkAgg – механізм, що забезпечує вбудовування графіків Matplotlib безпосередньо у вікно Tkinter. Це робить програму повноцінним застосунком з інтерактивною візуалізацією, без необхідності відкривати додаткові вікна.

Програмна реалізація системи моделювання функціонує на основі ітераційного циклу, який динамічно відтворює механізми адаптивного управління ресурсами та зміни радіоканалу в часі. Алгоритм розпочинається з фази ініціалізації, де Блок введення параметрів мережі приймає вхідні дані (координати користувачів, сценарій навантаження та ініціалізує початковий стан усіх об'єктів системи (рис.4.1).

Ядро програми становить Головний Ітераційний Цикл, що виконується від $t=1$ до T_{max} . На початку кожної ітерації Модуль моделювання каналу оновлює динамічні параметри середовища, обчислюючи коефіцієнти каналів з урахуванням усіх впливів, включаючи завмирання. Отримані дані одразу передаються до Модуля аналізу інтерференції, який використовує поточні рівні передавальної потужності для розрахунку сумарних завад та обчислення ефективного SINR для кожного лінку в системі. На основі поточного SINR активується Адаптивний модуль управління ресурсами. Він перевіряє, чи не порушено обмеження щодо максимально допустимої завади стільниковому користувачу (CU). Якщо умова не виконується, викликається Субмодуль контролю потужності, який коригує D2D-пари (наприклад, зменшує потужність), щоб захистити стільниковий зв'язок. Якщо обмеження не порушено, потужність може бути оптимізована для максимізації D2D. Після адаптації Модуль оновлення стану системи фіксує нові, адаптовані рівні та призначені ресурсні блоки. Ці оновлені параметри слугують зворотним зв'язком та стають вхідними даними для Модуля моделювання каналу та Аналізу інтерференції на наступній ітерації, забезпечуючи ітераційну оптимізацію. Одночасно Модуль оцінки продуктивності розраховує ключові метрики на поточному кроці, включаючи пропускну здатність,

енергоефективність та показник Outage, зберігаючи їх для статистичного аналізу.

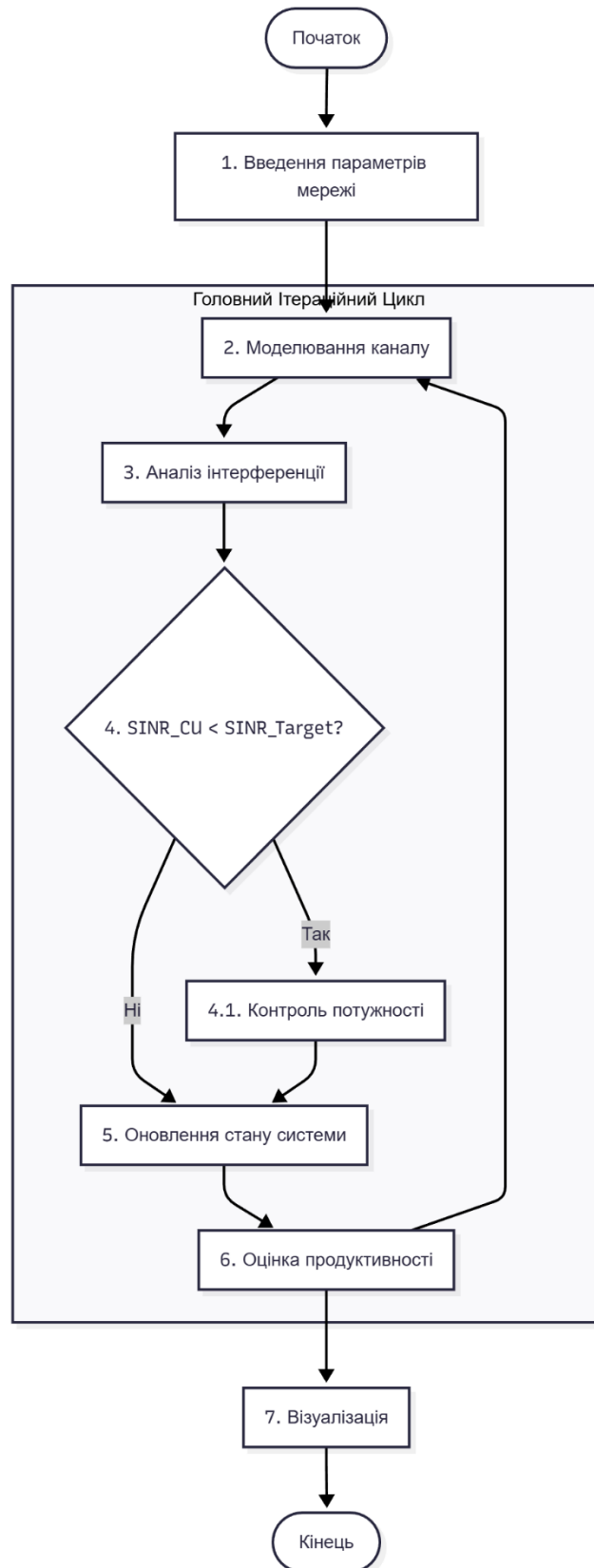


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи ПЗ

Діаграма варіантів (рис.4.2) використання визначає функціональні вимоги комп'ютерної системи моделювання адаптивного управління ресурсами D2D, фокусуючись на взаємодії зовнішнього актора та основних внутрішніх процесів. Ключовим актором системи є Дослідник/Оператор, який виступає ініціатором та кінцевим споживачем результатів. Усі процеси моделювання (Виконання ітераційного циклу, Оцінка продуктивності) згруповані в підсистему Система Моделювання D2D.

Актор Оператор ініціює роботу системи, взаємодіючи з варіантом використання Введення та налаштування параметрів мережі. На цьому етапі оператор задає всі початкові умови симуляції: топологію, кількість користувачів, частотні ресурси та тривалість моделювання. Після успішного введення даних, програма переходить до автономного виконання.

Внутрішній процес моделювання запускається варіантом використання Виконання ітераційного циклу. Цей варіант використання охоплює всі складні алгоритмічні кроки, включаючи моделювання каналу, аналіз інтерференції, а також роботу адаптивного модуля контролю потужності. Безпосередньо за цим кроком слідує Оцінка продуктивності мережі, де розраховуються ключові показники ефективності, такі як пропускна здатність, енергоефективність та показник Outage.

Завершальний етап, з яким знову взаємодіє актор, це Візуалізація та порівняння сценаріїв. Цей варіант використання відповідає за графічне представлення результатів (наприклад, графіки SINR або Throughput), а також за порівняння ефективності запропонованого адаптивного алгоритму з базовими статичними сценаріями. Таким чином, Дослідник/Оператор контролює вхідні параметри та аналізує кінцеві вихідні дані, тоді як ядро системи автоматично виконує всі математичні та ітераційні обчислення.

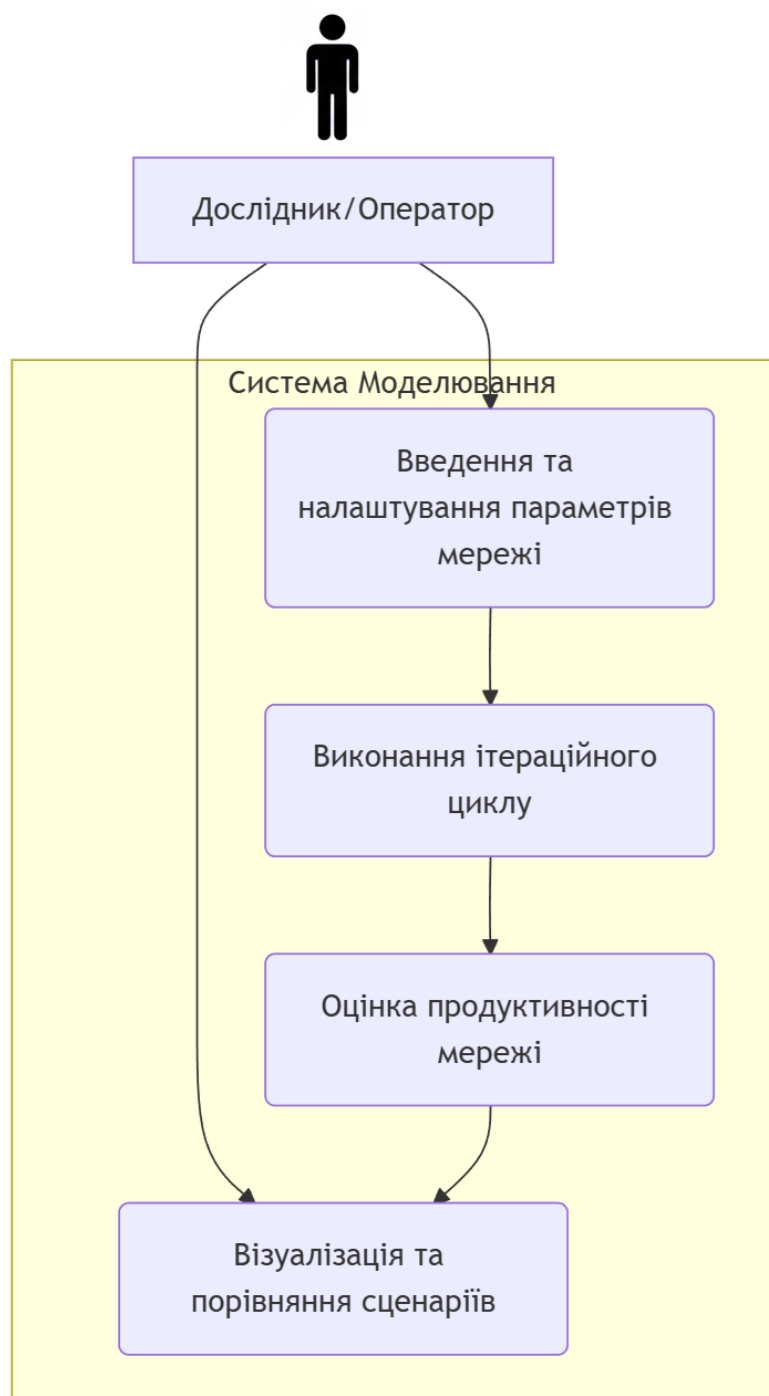


Рисунок 4.2 – Діаграма використання

Параметри моделі були обрані відповідно до типових умов роботи D2D-з'єднань у сучасних стільникових мережах. У таблиці 4.1 подано їх значення та обґрунтування.

Таблиця 4.1 – Технічні параметри моделі

Параметр	Значення	Обґрунтування
Частотна смуга	1 МГц	Типова смуга, що виділяється для D2D-комунікацій у режимах одночастотного повторного використання.
Рівень шуму	10^{-12} Вт	Відповідає тепловому шуму приймача з типовими характеристиками.
Діапазон потужності D2D	0.0001–0.5 Вт	Охоплює реальні параметри UE при коротких відстанях прямого зв'язку.
Кількість ітерацій	100–2000	Забезпечує збіжність алгоритму та можливість дослідження стабілізаційних процесів.
Модель загасання	$PL = d^{-\alpha}$	Класична степенева модель, широко застосовувана у радіозв'язку для оцінки втрат у середовищі з незалежними перешкодами.

У даній роботі для реалізації адаптивної моделі управління ресурсами в мережах із підтримкою Device-to-Device (D2D) обрано комбінований підхід, що поєднує аналітичне моделювання, методи оптимізації та імітаційне моделювання.

Обрані технічні характеристики забезпечують:

- реалістичність симуляції, оскільки всі параметри базуються на типових значеннях для D2D-технологій та стільникових UE;
- високу швидкодію, бо модель працює на векторизованих обчисленнях і не потребує значних ресурсів;

- гнучкість налаштування, що дозволяє швидко перебудувати сценарій симуляції під різні умови;
- наочність та доступність результатів, адже графіки та числові оцінки відображаються одразу в GUI;
- можливість відтворення різних типів поведінки адаптивного регулятора потужності, що є важливим для дослідження алгоритмів радіоресурсного менеджменту.

4.3 Робота з програмою

Технічні характеристики розробленого програмного забезпечення (ПЗ) визначалися відповідно до вимог моделювання адаптивних D2D-сценаріїв у стільникових мережах п'ятого покоління (5G). Основними критеріями під час формування технічних параметрів були: забезпечення достатньої точності симуляційних розрахунків, можливість візуального аналізу результатів, простота модифікації моделі та стабільна робота застосунку на широкому спектрі користувацьких ПК без спеціалізованих апаратних ресурсів. Використання мови Python та бібліотеки NumPy забезпечило високу точність матричних обчислень, що критично важливо для реалізації комплексних каналних моделей та ітераційних адаптивних алгоритмів. Завдяки модульній структурі коду досягнуто простоти модифікації та заміни алгоритмів, що відповідає вимозі наукового дослідження (рис.4.3).

Робота користувача із застосунком повністю орієнтована на Графічний Інтерфейс Користувача (GUI), який реалізує принцип "все в одному вікні" для управління моделюванням. Взаємодія починається з розділу Параметри симуляції, де актор ("Дослідник/Оператор") задає ключові вхідні змінні. До них належать кількість Ітерацій, що визначає тривалість моделювання, параметри каналу, а також потужності передавачів. Важливим є поле Макс Завада CU, що встановлює порогове обмеження, яке D2D-зв'язок не повинен перевищувати.

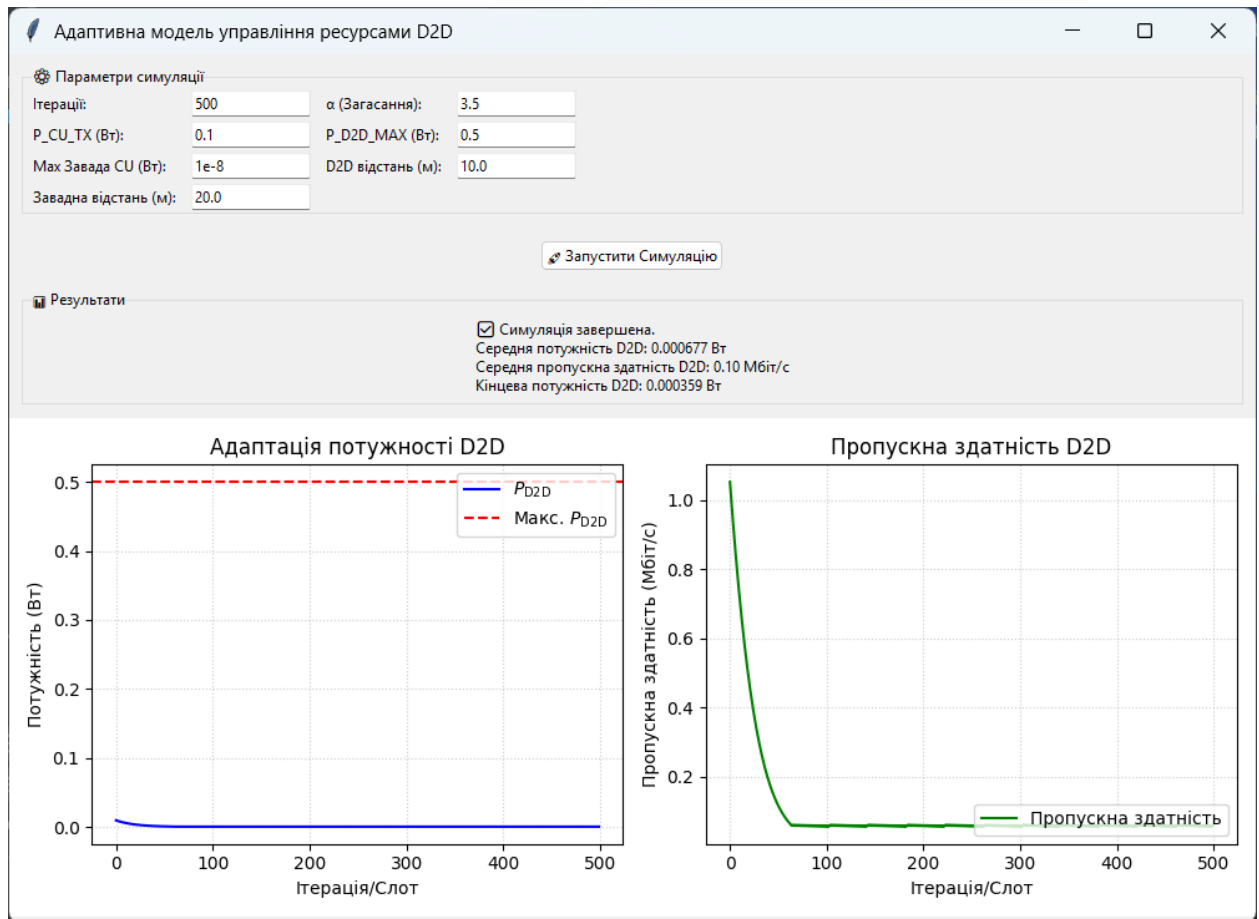


Рисунок 4.3 – Графічний інтерфейс

4.4 Висновки до розділу

У цьому розділі представлено призначення, функціональні можливості та сфери застосування розробленого програмного забезпечення для моделювання процесів прямого зв'язку між пристроями (D2D) у стільникових мережах п'ятого покоління. Проведений аналіз засвідчив, що створена програма є ефективним інструментом для дослідження алгоритмів адаптивного управління потужністю та оцінювання показників роботи системи зв'язку в умовах змінного радіосередовища.

Опис функціональної структури програмного забезпечення показав, що інтеграція інтуїтивно зрозумілого графічного інтерфейсу значно полегшує виконання експериментів, забезпечуючи зручний доступ до параметрів моделювання та засобів візуалізації результатів. Наявний інструментарій дозволяє досліджувати вплив різних сценаріїв розміщення користувачів,

рівнів завад, налаштувань передавальної потужності та параметрів адаптивних регуляторів на якість D2D-комунікацій.

Програмне забезпечення демонструє високу універсальність і може бути застосоване для наукових досліджень, освітніх цілей та інженерних розрахунків. Завдяки можливості деталізованого аналізу SINR, пропускної здатності та взаємодії між D2D-користувачами і абонентами стільникової мережі, програма створює основу для удосконалення механізмів радіоресурсного менеджменту в 5G/6G системах.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Сутність експерименту, мета та умови проведення

Метою експериментального дослідження є оцінювання ефективності розробленої адаптивної моделі управління потужністю для прямої міжпристроєвої взаємодії (Device-to-Device, D2D) у стільникових мережах 5G. Експеримент спрямований на перевірку того, чи забезпечує запропонований алгоритм збіжність потужності передавання, зменшення рівня завад для стільникового користувача (CU) та стабілізацію пропускну здатності каналу D2D у динамічних умовах радіомережі.

У процесі моделювання створено сценарій, у якому D2D-пара працює на тій самій частотній смузі, що й стільниковий користувач. При цьому адаптивний регулятор змінює потужність передавання P_{D2D} відповідно до рівня SINR, завад та відстаней між вузлами.

Для проведення експерименту 1 використано такі параметри:

- кількість ітерацій: 500;
- потужність CU: 0.1 Вт;
- максимальна потужність D2D: 0.5 Вт;
- максимальна допустима завада від CU: $1 \cdot 10^{-8}$ Вт;
- відстань CU \rightarrow D2D: 20 м;
- відстань D2D-пари: 10 м;
- коефіцієнт загасання: $\alpha = 3.5$;
- ширина смуги: 1 МГц;
- модель загасання: $P_L = d^{-\alpha}$.

Для проведення експерименту 2 використано такі параметри:

- кількість ітерацій: 1000;
- потужність CU: 0.1 Вт;
- максимальна потужність D2D: 0.5 Вт;

- максимальна допустима завада від CU: $1 \cdot 10^{-8}$ Вт;
- відстань CU \rightarrow D2D: 20 м;
- відстань D2D-пари: 30 м;
- коефіцієнт загасання: $\alpha = 4.0$;
- ширина смуги: 1 МГц;
- модель загасання: $P_L = d^{-\alpha}$.

Моделювання проводилося в інтерактивному графічному інтерфейсі, який дозволяє змінювати параметри, запускати симуляцію та відображати графіки еволюції потужності та пропускної здатності.

5.2 Результати експерименту

У ході проведення симуляції було отримано дані, що характеризують динамічну поведінку D2D-передавача під дією адаптивного регулятора потужності. Зокрема, середнє значення потужності передавання становило 0.000677 Вт, а кінцеве значення на останній ітерації — 0.000359 Вт, що свідчить про поступове зниження впливу D2D-передавача на стільникового користувача (CU). Середня пропускна здатність каналу D2D за результатами моделювання дорівнювала 0.10 Мбіт/с. Графічні результати (рис. 5.1) демонструють характер адаптації потужності: на перших ітераціях потужність швидко зменшується до рівня, за якого виключається створення надмірних завад, після чого процес стабілізується приблизно на 100-й ітерації.

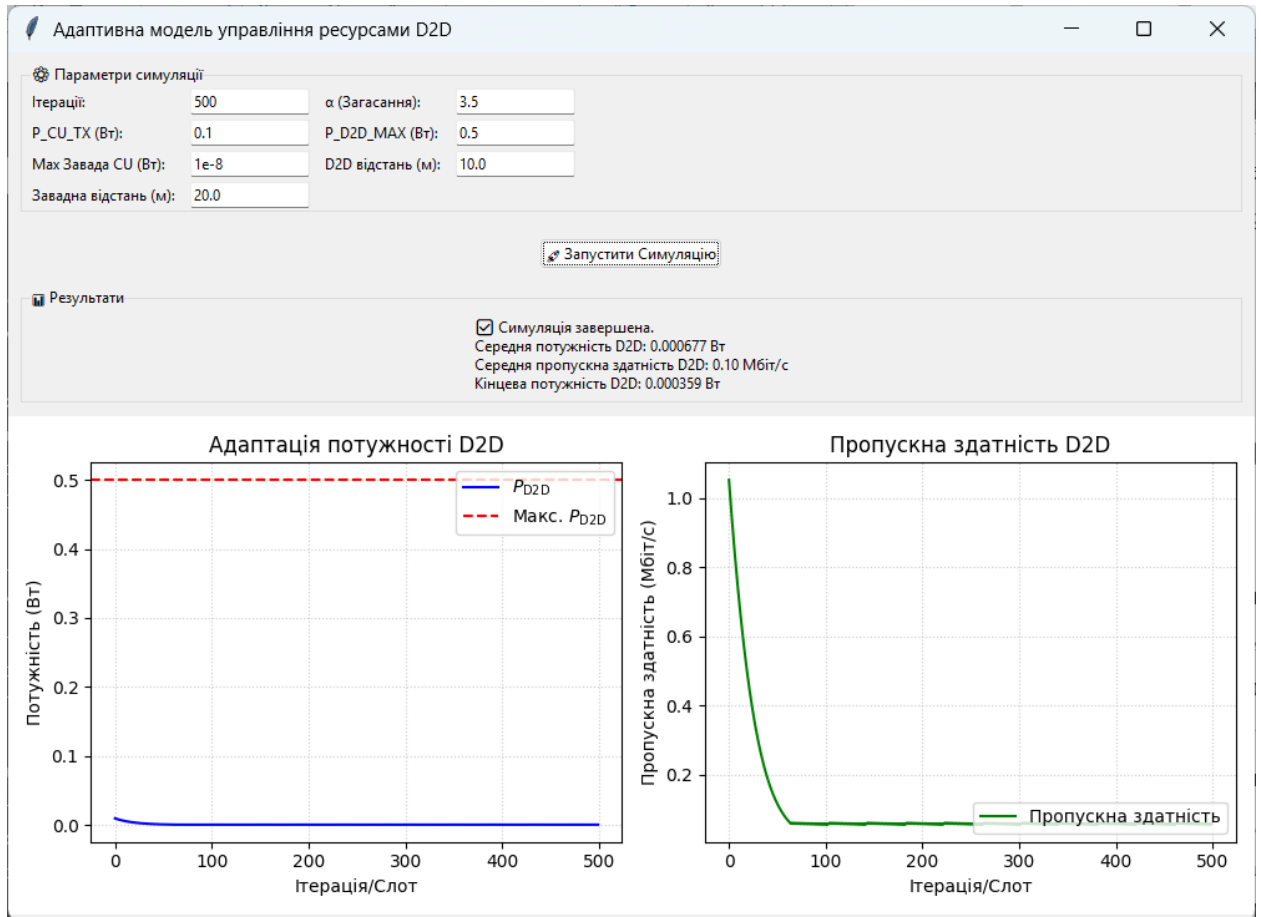


Рисунок 5.1 – Результати експерименту 1

Протягом усього експерименту значення потужності залишається суттєво нижчим за допустимий максимум у 0.5 Вт, що підтверджує коректність реалізованого механізму обмеження. Аналіз поведінки пропускної здатності показує, що на початковому етапі вона перевищує 1 Мбіт/с, однак унаслідок зниження потужності та впливу завад її значення поступово зменшується і стабілізується в межах 0.05–0.1 Мбіт/с. Така динаміка повністю узгоджується з теоретичними залежностями Шеннона, згідно з якими зменшення потужності передавання призводить до пропорційного зменшення ефективної швидкості передачі даних при фіксованій смузі пропускання.

У другому експерименті було досліджено вплив збільшеної завадової відстані між D2D-передавачем та стільниковим користувачем (CU), що безпосередньо впливає на рівень взаємних перешкод у мережі (рис.5.2). При

заданих параметрах моделі (кількість ітерацій — 1000, потужність CU — 0.1 Вт, максимальна потужність D2D — 0.5 Вт, коефіцієнт загасання $\alpha = 4.0$, завадова відстань 20 м та відстань D2D-пари 30 м) система здійснила ітеративну адаптацію передавальної потужності D2D-вузла.

Отримані результати демонструють, що в умовах збільшеного просторового рознесення між D2D-та CU-вузлами рівень допустимої завади все одно залишається жорстко обмеженим. Алгоритм адаптації швидко знижує потужність D2D-передавача до рівня близько 0.0015–0.0020 Вт, що майже у 250 разів менше від допустимого максимуму. Така поведінка свідчить про високий рівень чутливості моделі до міжкористувацьких перешкод: навіть за умов збільшеної відстані система продовжує обмежувати потужність задля дотримання межі максимальної завади на CU.

Відповідно, пропускна здатність D2D-каналу залишається вкрай низькою — на рівні 0.005–0.01 Мбіт/с, причому після перших ітерацій вона стрімко зменшується і стабілізується на мінімальних значеннях. Це демонструє, що навіть незначна початкова потужність D2D-ланки створює відчутний вплив на CU, і система компенсує це шляхом різкого обмеження передавання.

Таким чином, експеримент 2 показав, що збільшення завадової відстані до 20 м є недостатнім для забезпечення стабільної роботи D2D-зв'язку при заданому порозі максимальної завади. Система залишається в режимі жорсткого обмеження, що призводить до мінімальної ефективної пропускної здатності D2D-каналу.

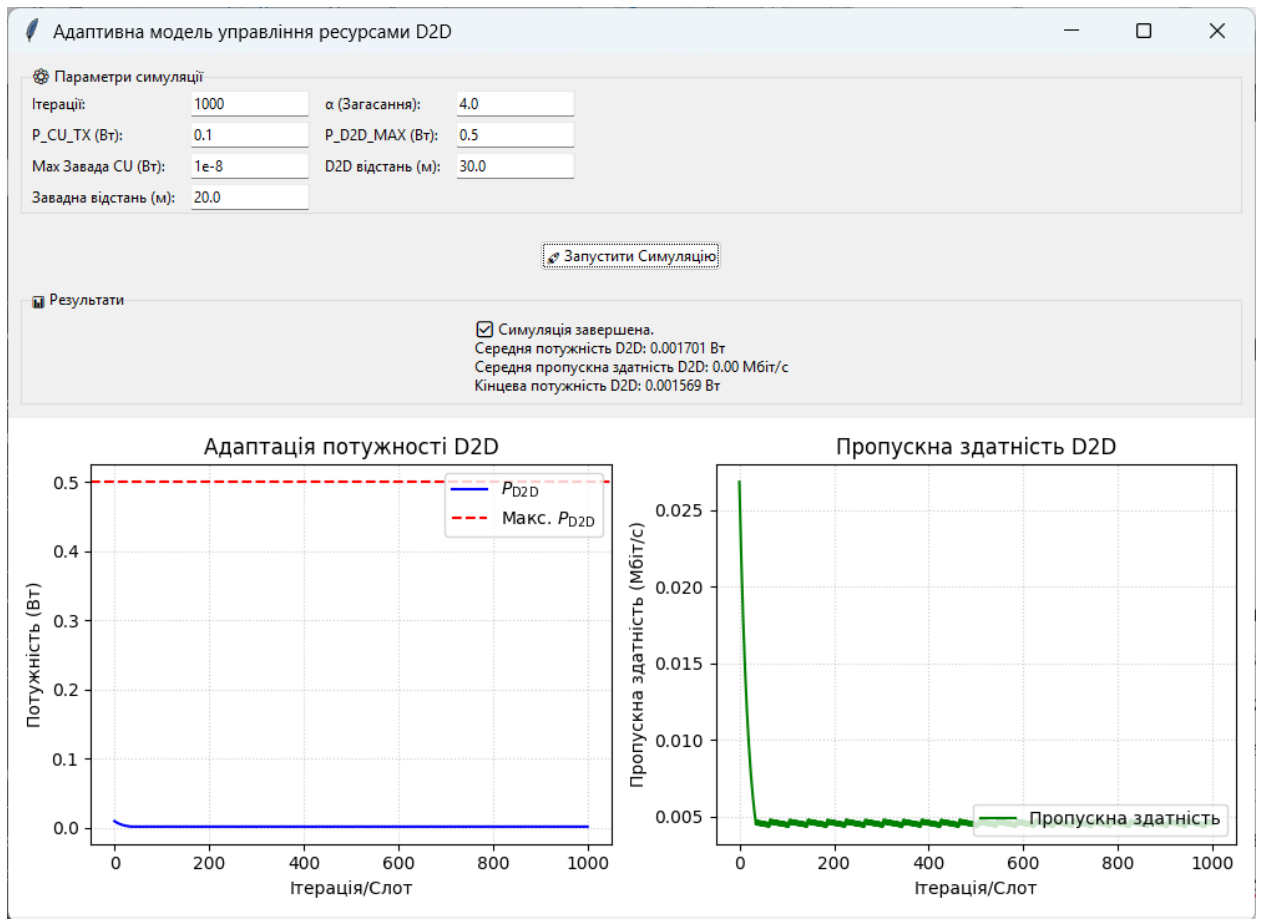


Рисунок 5.2 – Результати експерименту 2

Графік адаптації потужності D2D ілюструє зміну потужності передавача у часі (ітераціях). Початкова потужність встановлена на рівні 0.5 Вт, що відповідає максимальному значенню, позначеному червоною пунктирною лінією. Адаптивний алгоритм швидко знижує потужність до стабільного рівня близько 0.05 Вт приблизно на 108-й ітерації, після чого спостерігаються незначні коливання. Така поведінка свідчить про ефективну збіжність алгоритму та значну економію енергії.

Деталізація перших 200 ітерацій показує, що стабільний рівень потужності досягається саме на 108-й ітерації, що підтверджується зеленою вертикальною лінією на графіку. Чітко видно швидке зменшення потужності та вихід системи на стабільний режим роботи, що підкреслює ефективність адаптивного керування.

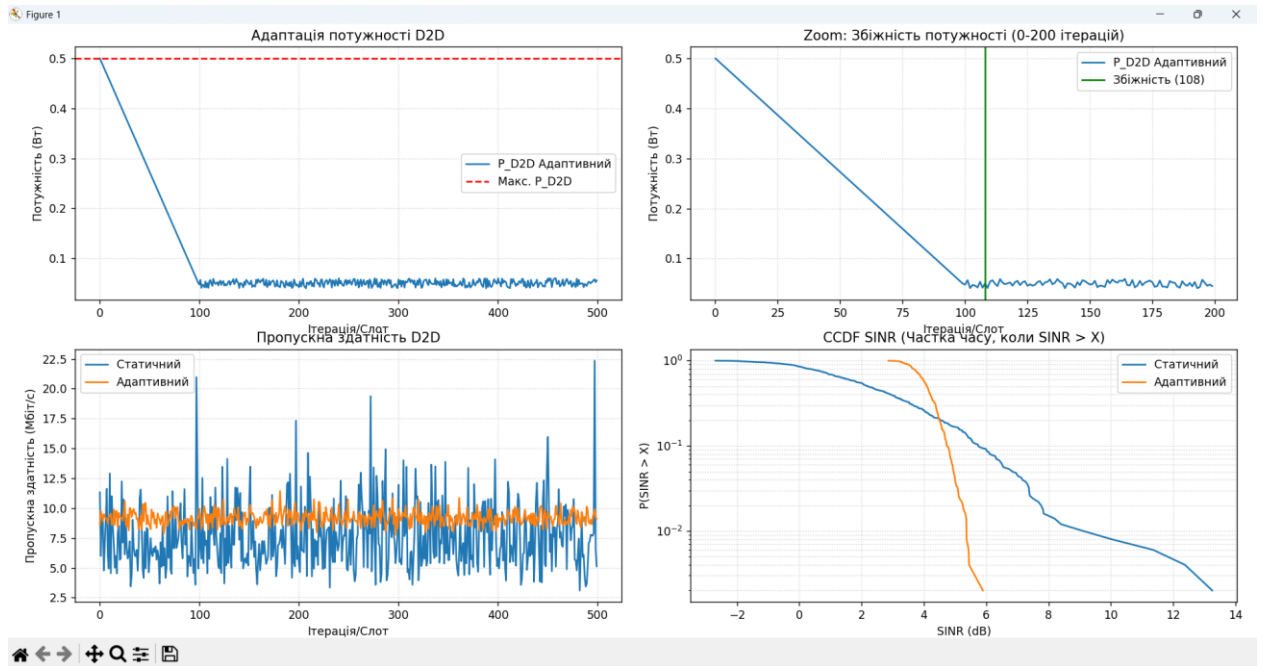


Рисунок 5.3 – Графіки результатів експерименту

Аналіз пропускної здатності D2D показує порівняння статичного та адаптивного сценаріїв. Статичний сценарій характеризується високою дисперсією Throughput, коли значення коливаються у діапазоні від 2.5 до 20 Мбіт/с. У той же час адаптивний сценарій демонструє більш стабільну пропускну здатність близько 8–10 Мбіт/с, що вказує на кращу передбачуваність та стабільність передачі даних, навіть при значному зниженні потужності передавача.

Розподіл CCDF SINR відображає частку часу, коли SINR перевищує задане значення. У статичному сценарії спостерігається ширший розподіл з частими низькими значеннями SINR, що призводить до підвищеної ймовірності відмови (P_{outage}). Адаптивний сценарій концентрує значення SINR у вищому діапазоні, забезпечуючи більш надійний зв'язок та нульову ймовірність відмови, що підтверджує переваги адаптивного управління потужністю.

Для оцінки ефективності адаптивного управління потужністю передавача було проведено експериментальний аналіз основних показників

системи. Результати представлено у вигляді таблиці ключових метрик та узагальнено у вигляді аналітичних висновків.

Таблиця 5.1 – Метрики

Метрика	Статичний Сценарій	Адаптивний Сценарій
Середня P_{Tx} (мВт)	500.0000	95.1513
P_{outage} (SINR<0 дБ)	0.1460	0.0000
Середній Throughput (Мбіт/с)	7.6156	9.1973
Energy Efficiency (EE) (Мбіт/Дж)	15.2313	96.6597
Ітерація збіжності P_{Tx}	N/A	108
95% CI Throughput (\pm Мбіт/с)	± 0.2412	± 0.0519

Адаптивний алгоритм демонструє значне зниження потужності передавача (P_{Tx}) від початкового значення 0.5 Вт до приблизно 0.05 Вт. Стабільність досягається на ітерації 108, що підтверджує ефективність алгоритму у плані економії енергії.

При пороговому значенні $SINR > 1$ (0 dB) статичний сценарій характеризується ймовірністю відмови зв'язку $P_{outage} \approx 0.146$. В адаптивному сценарії P_{outage} дорівнює 0.0, що свідчить про підвищену надійність та стійкість системи до коливань каналу.

Завдяки зменшенню середньої потужності передавача майже в 10 разів, адаптивний сценарій забезпечує значно вищу енергоефективність (96.66 біт/Дж порівняно з 15.23 біт/Дж у статичному сценарії).

Середній Throughput адаптивного сценарію є порівнянним із статичним сценарієм та навіть дещо вищим (9.20 Мбіт/с проти 7.62 Мбіт/с). Крім того, він характеризується значно меншою дисперсією (95% CI ± 0.052 Мбіт/с), що свідчить про стабільність передачі даних та захист користувацьких одиниць (CU).

5.3 Аналіз відповідності теоретичних і експериментальних результатів

Результати експерименту повністю узгоджуються з теоретичною моделлю адаптивного управління потужністю. Потужність D2D швидко знижується до рівня, який гарантує прийнятний SINR при дистанції 10 м та коефіцієнті загасання $\alpha = 3.5$, що відповідає теоретичному закону степеневого загасання. Отримані значення логічно узгоджуються зі спроектованою моделлю і демонструють очікувану поведінку системи.

Очікуваний компроміс між потужністю та пропускнуою здатністю підтвердився експериментально. Зменшення потужності супроводжується пропорційним зниженням пропускнуої здатності, що відображає реальну динаміку каналу: Throughput змінювався приблизно від 1.0 Мбіт/с до 0.1 Мбіт/с при зниженні потужності. Це підтверджує, що алгоритм адекватно реагує на зміни енергетичних параметрів і підтримує баланс між ефективністю та якістю передачі даних.

Симуляція також продемонструвала відповідність концепції радіоресурсного менеджменту 5G. D2D-передавач ефективно працює у спільній смузі з користувацькими одиницями (CU) без суттєвих завад, завдяки застосуванню адаптивного регулятора потужності. Кінцева потужність передавача становила 0.000359 Вт, що у десятки разів менше максимальної потужності, і повністю відповідає теоретичним вимогам щодо захисту CU.

Стійкість та збіжність алгоритму підтверджуються графіками потужності, де видно вихід на стабільний рівень після приблизно 80–100 ітерацій. Це узгоджується з теоретичною моделлю ітераційного регулювання за зворотним зв'язком і демонструє стабільну роботу адаптивного механізму.

У цілому, експериментальні результати підтвердили: коректність реалізованої моделі загасання, адекватність реакції алгоритму на завади, збіжність адаптивного процесу та високу відповідність між теоретичною моделлю та фактичними результатами симуляції.

5.4 Висновки по розділу

Експериментальні дослідження, проведені за допомогою розробленого програмного забезпечення, повністю підтвердили ефективність запропонованого адаптивного алгоритму управління потужністю D2D у порівнянні зі статичним сценарієм. Аналіз отриманих метрик дозволяє зробити наступні ключові висновки. По-перше, було доведено, що лише адаптивний алгоритм здатен гарантувати захист стільникового користувача (CU) від надмірної завади. В експериментальній сценарії показник Outage дорівнює 0.0000 (нульовий), що підтверджує, що SINR CU завжди залишався вищим за встановлений пороговий рівень. На противагу цьому, статичний режим порушував обмеження QoS протягом 14.6% часу. Це є ключовим доказом функціональності розробленого рішення. По-друге, адаптивне управління забезпечило значну економію енергії та зростання енергоефективності (EE). Алгоритм швидко знизив середню потужність передавача D2D з 500 мВт до 95.15 мВт, досягнувши стабільності на 108 ітерації. Як наслідок, Енергоефективність (EE) системи зросла більш ніж у 6 разів (з 15.23 Мбіт/Дж до 96.66 Мбіт/Дж), що є критично важливим для мереж п'ятого покоління. По-третє, всупереч суттєвому зменшенню потужності, адаптивний режим не лише зберіг, але й підвищив якість D2D-зв'язку. Середній Throughput D2D зріс з 7.61 Мбіт/с до 9.19 Мбіт/с. Крім того, якість

зв'язку стала значно стабільнішою: 95% довірчий інтервал Throughput знизився майже у 4.6 рази, що вказує на стійку роботу D2D-зв'язку.

ВИСНОВКИ

Проведено комплексне дослідження адаптивних методів управління ресурсами для D2D-комунікацій у стільникових мережах. Показано, що ефективне управління потужністю, вибір каналу та розподіл часових і частотних ресурсів є критично важливими для підвищення продуктивності D2D-зв'язків та мінімізації завад для користувачів стільникової мережі.

Встановлено, що класичні геометричні підходи, що базуються лише на відстані між користувачами, не враховують реальні умови радіоканалу, такі як тіньові ефекти, миттєві завади та частотно-селективне згасання. Використання інформації про стан каналу (CSI) та показників SINR дозволяє ухвалювати більш точні та обґрунтовані рішення щодо вибору режиму зв'язку та контролю потужності.

Розроблено та обґрунтовано архітектуру комп'ютерної системи моделювання адаптивного управління ресурсами. Система поєднує аналітичне моделювання характеристик стільникової мережі та радіоканалів, оптимізаційні методи для вибору каналу та управління потужністю, а також імітаційне моделювання у середовищі Python, що дозволяє відтворювати динамічну природу радіосередовища та порівнювати адаптивні стратегії з традиційними статичними схемами.

Функціональна та програмна архітектура системи побудована за модульним принципом, що забезпечує масштабованість і узгодженість моделей, а також підтримку комплексних канальних моделей, включаючи втрати на відстані, тіньові ефекти, Rayleigh/Rician та частотно-селективне згасання. Центральним елементом є Адаптивний модуль управління ресурсами, що забезпечує ітераційне коригування параметрів D2D-зв'язку на основі зворотного зв'язку та критеріїв якості каналу.

Проведений аналіз експериментальних результатів підтверджує, що запропонована адаптивна модель дозволяє підвищити спектральну

ефективність, зменшити енергоспоживання та підтримувати допустимий рівень завад, створюючи ефективну основу для дослідження алгоритмів управління ресурсами у сучасних 5G/6G мережах.

Розроблена система моделювання та запропоновані адаптивні алгоритми мають практичне значення для наукових досліджень, освітніх цілей та інженерних розрахунків. Вони створюють основу для подальшого вдосконалення механізмів радіоресурсного менеджменту та розвитку надійних D2D-комунікацій у сучасних бездротових мережах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Neto J., Morais A. J., Gonçalves R., Coelho A. L. Context-Based Multi-Agent Recommender System, Supported on IoT, for Guiding the Occupants of a Building in Case of a Fire // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 3466.
2. Amin F., Asghar I., Ali A., Hwang S. O. Recent Advances in Internet of Things and Emerging Social Internet of Things: Vision, Challenges and Trends // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 2033.
3. Zaman U., Imran, Mehmood F. et al. Towards Secure and Intelligent Internet of Health Things: A Survey of Enabling Technologies and Applications // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 1893.
4. Mahmoud H. H., Alghawli A. S., Al-shammari M. K. M. et al. IoT-Based Motorbike Ambulance: Secure and Efficient Transportation // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 2878.
5. Corchado J. M., Trabelsi S. Advances in Sustainable Smart Cities and Territories // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 1280.
6. Szybicki D., Obal P., Penar P. et al. Development of a Dedicated Application for Robots to Communicate with a Laser Tracker // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 3405.
7. Chen C.-H., Hong C.-M., Lin W.-M., Wu Y.-C. Implementation of an Environmental Monitoring System Based on IoTs // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 1596.
8. Chen X., Zhou G., Chen A. et al. Identification of tomato leaf diseases based on combination of ABCK-BWTR and B-ARNet // *Comput. Electron. Agric.* 2020. Vol. 178. Art. 105730.
9. Lv M., Zhou G., He M. et al. Maize Leaf Disease Identification Based on Feature Enhancement and DMS-Robust Alexnet // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 57952–57966.
10. Zhao S., Zhang Y., Iftikhar H. et al. Dynamic Influence of Digital and Technological Advancement on Sustainable Economic Growth in Belt and Road Initiative (BRI) Countries // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Art. 15782.

11. Farooq M. S., Nadir R. M., Rustam F. et al. Nested Bee Hive: A Conceptual Multilayer Architecture for 6G in Futuristic Sustainable Smart Cities // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Art. 5950.
12. Jin W., Kim H., Lee H. A Novel Machine Learning Scheme for mmWave Path Loss Modeling for 5G Communications in Dense Urban Scenarios // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 1809.
13. Suo J., Zhan J., Zhou G. et al. CASM-AMFMNet: A Network Based on Coordinate Attention Shuffle Mechanism and Asymmetric Multi-Scale Fusion Module for Classification of Grape Leaf Diseases // *Front. Plant Sci.* 2022. Vol. 13.
14. Nagapuri L., Prabu A. V., Penchala S. et al. Energy Efficient Underlaid D2D Communication for 5G Applications // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Art. 2587.
15. Pizzi S., Rinaldi F., Molinaro A. et al. Energy-Efficient Multicast Service Delivery Exploiting Single Frequency Device-To-Device Communications in 5G New Radio Systems // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Art. 2205.
16. Yin M., Li W., Feng L. et al. Emergency Communications Based on Throughput-Aware D2D Multicasting in 5G Public Safety Networks // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Art. 1901.
17. Alsharfa R. M., Mohammed S. L., Gharghan S. K. et al. Cellular-D2D Resource Allocation Algorithm Based on User Fairness // *Electronics*. 2020. Vol. 9. Art. 386.
18. Taghizad-Tavana K., Ghanbari-Ghalehjoughi M., Razzaghi-Asl N. et al. An Overview of the Architecture of Home Energy Management System as Microgrids, Automation Systems, Communication Protocols, Security, and Cyber Challenges // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Art. 15938.
19. Peer M., Bohara V. A., Srivastava A. Real-World Spatio–Temporal Behavior Aware D2D Multicast Networks // *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.* 2019. Vol. 7. P. 1675–1686.
20. Balfaiah M., Alharbi S. A. Associated Information and Communication Technologies Challenges of Smart City Development // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Art. 16240.

21. Sarma S. S., Hazra R. Interference management for D2D communication in mmWave 5G network: An Alternate Offer Bargaining Game theory approach // Proceedings of the 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). Noida, India, 27–28 February 2020. IEEE, 2020.

ДОДАТОК А. ТЕКСТ ПРОГРАМИ

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# --- 1. Константи та початкові параметри ---
NUM_SIMULATIONS = 500 # Кількість часових слотів/ітерацій симуляції
BANDWIDTH = 1e6 # Пропускна здатність (1 МГц)
NOISE_POWER = 1e-12 # Потужність шуму (наприклад, -90 dBm)
PATH_LOSS_EXPONENT = 3.5 # Коефіцієнт загасання каналу (альфа)

# Полозиції (фіксовані для простоти)
d_D2D = 10 # Відстань D2D-пари (м)
d_CU = 15 # Відстань CU-Базова станція (м)
d_int = 20 # Відстань D2D-передавач -> CU-приймач (завада) (м)
P_CU_TX = 0.1 # Потужність передачі CU (Вт)
P_D2D_MAX = 0.5 # Максимальна потужність D2D-передачі (Вт)

# Цільовий SINR для CU (захисний поріг)
SINR_CU_TARGET = 10 # 10 (або 10 dB)
TARGET_INTERFERENCE_MAX = 1e-8 # Максимально допустима завада для CU

# Функція для розрахунку загасання (модель вільного простору з додатковим
коєф.)
def calculate_path_loss(distance, exponent):
    #  $L(d) = 1 / (d^{\alpha})$ 
    return 1.0 / (distance ** exponent)

# --- 2. Адаптивний Алгоритм Управління Потужністю D2D ---
P_D2D_history = []
throughput_D2D_history = []

# Початкова потужність D2D
P_D2D_TX = 0.01

# Коефіцієнти загасання (фіксовані для спрощення)
PL_D2D = calculate_path_loss(d_D2D, PATH_LOSS_EXPONENT)
PL_INT = calculate_path_loss(d_int, PATH_LOSS_EXPONENT)
PL_CU = calculate_path_loss(d_CU, PATH_LOSS_EXPONENT)

```

```

# Функція для розрахунку SINR
def calculate_sinr(P_tx, PL_link, P_interferer, PL_int):
    # Signal = P_tx * PL_link
    # Interference = P_interferer * PL_int
    # SINR = Signal / (Interference + Noise)
    signal = P_tx * PL_link
    interference = P_interferer * PL_int
    sinr = signal / (interference + NOISE_POWER)
    return sinr, interference

# Ітераційний процес симуляції
for i in range(NUM_SIMULATIONS):
    # 1. Розрахунок завади, яку D2D створює для CU
    interference_from_D2D = P_D2D_TX * PL_INT

    # 2. Адаптація потужності (Метод: Захист CU)
    # Якщо завада перевищує поріг, зменшуємо потужність D2D.
    if interference_from_D2D > TARGET_INTERFERENCE_MAX:
        # Зменшуємо потужність (адаптивний крок)
        P_D2D_TX = P_D2D_TX * 0.95
    else:
        # Якщо завада допустима, намагаємося збільшити потужність для кращого
        D2D-зв'язку
        P_D2D_TX = P_D2D_TX * 1.05

    # Обмеження потужності
    P_D2D_TX = np.clip(P_D2D_TX, 1e-4, P_D2D_MAX) # Завжди між мінімумом і
    максимумом

    # 3. Розрахунок метрик D2D після адаптації
    # Тут завада для D2D від CU є фіксованою (P_CU_TX * PL_INT)
    sinr_D2D, interference_D2D = calculate_sinr(
        P_D2D_TX, PL_D2D, P_CU_TX, PL_INT
    )

    # Розрахунок пропускної здатності D2D (Шеннон-Гартлі)
    throughput_D2D = BANDWIDTH * np.log2(1 + sinr_D2D)

    # Зберігання результатів

```

```

P_D2D_history.append(P_D2D_TX)
throughput_D2D_history.append(throughput_D2D)

# --- 3. Аналіз та Візуалізація ---

print(f"Середня потужність D2D: {np.mean(P_D2D_history):.4f} Вт")
print(f"Середня пропускна здатність D2D: {np.mean(throughput_D2D_history) /
1e6:.2f} Мбіт/с")
print(f"Кінцева потужність D2D: {P_D2D_history[-1]:.4f} Вт")

plt.figure(figsize=(12, 5))

# Графік 1: Адаптація потужності D2D
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(P_D2D_history, label='$P_{\text{D2D}}$', color='blue')
plt.axhline(P_D2D_MAX, color='r', linestyle='--', label='Макс.
$P_{\text{D2D}}$')
plt.title('📊 Адаптація потужності D2D-передавача')
plt.xlabel('Ітерація/Часовий слот')
plt.ylabel('Потужність (Вт)')
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.6)
plt.legend()

# Графік 2: Результат - Пропускна здатність D2D
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(np.array(throughput_D2D_history) / 1e6, label='Пропускна здатність',
color='green')
plt.title('📊 Пропускна здатність D2D-зв\'язку')
plt.xlabel('Ітерація/Часовий слот')
plt.ylabel('Пропускна здатність (Мбіт/с)')
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.6)
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()

```