ВСТУП

Актуальність теми. Багатоканальні MESH-мережі є основою IoT та «розумних міст», але потребують ефективного управління обмеженим частотним ресурсом. Ієрархічні методи розподілу каналів дозволяють оптимізувати роботу мережі, проте наразі бракує інструментів для оцінки їхньої реальної ефективності в динамічних умовах. Це зумовлює необхідність розробки нових підходів до аналізу таких систем.

Наукова проблема полягає у відсутності комплексних та формалізованих методів оцінки, які б дозволяли об’єктивно порівнювати ефективність різних ієрархічних стратегій розподілення каналів з урахуванням таких факторів, як топологія мережі, характеристики трафіку та рівень інтерференції.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є підвищення ефективності використання канальних ресурсів у багатоканальних MESH-мережах шляхом розробки науково обґрунтованих методів оцінки ефективності ієрархічних алгоритмів розподілення каналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз архітектури, переваг та недоліків багатоканальних MESH-мереж, а також існуючих підходів до розподілення канальних ресурсів;

2. Дослідити теоретичні основи ієрархічних методів управління та визначити ключові критерії і метрики для оцінки їх ефективності;

3. Розробити комплексну методику та математичні моделі для оцінки показників продуктивності MESH-мереж при використанні ієрархічних методів розподілення каналів;

4. Створити імітаційну модель для перевірки адекватності розроблених методів та дослідження їх властивостей;

5. Провести експериментальне дослідження для порівняльного аналізу ефективності ієрархічних методів з існуючими аналогами та надати практичні рекомендації.

Об'єкт дослідження - процес розподілення канальних ресурсів у багатоканальних бездротових MESH-мережах.

Предмет дослідження - методи оцінки ефективності, моделі та критерії функціонування ієрархічних алгоритмів розподілення каналів.

Методи дослідження. Використано теорію графів і телетрафіку для моделювання мережі, імітаційне моделювання для перевірки рішень, а також методи системного аналізу, теорії ймовірностей і статистики для обробки результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано комплексну методику оцінки ефективності ієрархічних методів розподілення каналів, яка, на відміну від існуючих, враховує взаємний вплив параметрів різних рівнів ієрархії на загальну продуктивність мережі.

2. Удосконалено модель функціонування MESH-мережі шляхом введення критеріїв, що характеризують адаптивність ієрархічних алгоритмів до динамічних змін умов передачі даних.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика може бути використана інженерами та дослідниками при проєктуванні, оптимізації та модернізації багатоканальних MESH-мереж у критично важливих сферах, таких як промисловий IoT, системи моніторингу та управління транспортом. Застосування запропонованих методів дозволить підвищити обґрунтованість вибору архітектурних рішень та покращити ключові показники якості обслуговування (QoS).

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ РОЗПОДІЛЕННЯ РЕСУРСІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ БЕЗДРОТОВИХ MESH-МЕРЕЖАХ

1.1 Архітектура та принципи функціонування багатоканальних MESH-мереж

Багатоканальна бездротова mesh-мережа (Wireless Mesh Network) - це самоконфігурована мультишарова мережа, у якій фіксовані маршрутизатори (mesh-роутери) з'єднуються між собою в сітчасту топологію, забезпечуючи доступ до мережі клієнтських пристроїв (mesh-клієнтів). Загальна архітектура таких мереж передбачає три види компонентів: mesh-гейтвеї (роутери з функціями шлюзу до зовнішньої мережі), mesh-маршрутизатори (маршрутизатори, що з'єднують між собою інші вузли у мультихоп-топології) та mesh-клієнти (термінальні точки доступу для кінцевих користувацьких пристроїв) [4]. Усі маршрутизатори mesh-мережі зазвичай мають велику обчислювальну потужність та стабільне живлення, а їхня топологія формується безпосередньо під час розгортання мережі. Функція кількаразового ретранслятора закладена в кожному вузлі: вузли одночасно є і джерелом, і ретранслятором інформації, що забезпечує самовідновлення (self-healing) мережі при випадкових відмовах окремих ланок [1, 4].

Ключовою особливістю мультиканальних mesh-мереж є використання кількох радіоінтерфейсів на кожному маршрутизаторі. Це означає, що кожен вузол оснащений двома й більше бездротовими мережевими адаптерами, які можуть працювати на різних каналах одночасно [1]. Завдяки цьому вводиться розділення ролей: один інтерфейс вузла може обслуговувати клієнтські пристрої (доступ до мережі), а інший - з'єднуватися з іншими mesh-роутерами в магістральній частині мережі [6]. Подібний підхід (рознесення доступу і магістралі по окремих каналах) значно знижує взаємне накладання сигналів та збільшує загальну пропускну здатність системи. Загалом, використання мультирадіо-принципу дозволяє масштабувати мережу - при збільшенні кількості вузлів та клієнтів можна долучати додаткові радіоінтерфейси й незавдашні канали без втрати продуктивності [1, 6].

Mesh-мережі зазвичай використовують неліцензовані Wi-Fi-діапазони 2.4

ГГц і 5 ГГц (а у нових системах - також 6 ГГц). У діапазоні 2.4 ГГц стандарт IEEE 802.11 передбачає 14 каналів (від 1 до 14, з яких у багатьох країнах практично використовують лише 13) [3]. Однак через близьке розташування смуг лише три з них (канали 1, 6 та 11) не перекриваються між собою [3]. У діапазоні 5 ГГц спектр значно ширший - тут може бути до 24 неперекривних 20-МГц каналів (залежно від регіону) - що суттєво зменшує завадження при щільному розгортанні. Узагальнені дані про кількість каналів у двох головних діапазонах Wi-Fi наведено в Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Доступні неперекривні канали в діапазонах Wi-Fi

Діапазон (ГГц)	Не перекриваючі канали	Примітки
2,4	1, 6, 11	всього 14 каналів (13 у більшості країн) [3]
5	до 24 (20 МГц кожен)	залежить від регіону та стандарту, що відображено на рисунку 1.1

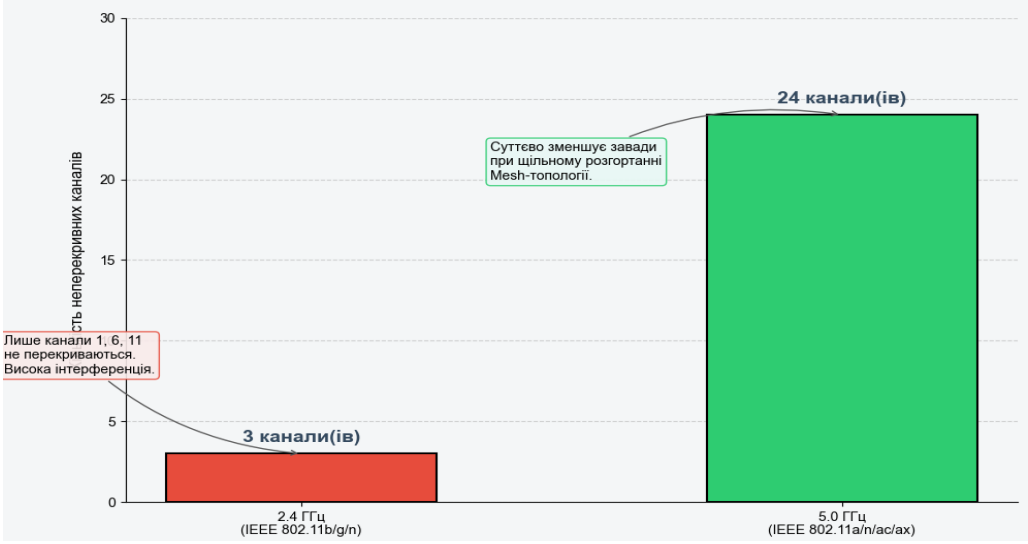


Рис. 1.1 Порівняльна характеристика кількості неперекривних каналів у діапазонах 2.4 ГГц та 5 ГГц

Mesh-мережі реалізують багатошарову маршрутну поведінку. Наприклад, стандарт IEEE 802.11s задає протокол HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) для побудови маршрутів на рівні канального шару [1]. Маршрути обираються з

урахуванням метрик якості каналів (тайм-алайтметрика ALM) та поточного навантаження [5]. Завдяки мультиканальності зменшується затримка передачі та підвищується пропускна здатність: різні вузли можуть одночасно передавати дані по незалежних частотних каналах без перешкод один одному [3, 6]. Така паралельна робота каналів знижує відсоток колізій і дозволяє більш рівномірно розподіляти трафік по мережі. Скажімо, навіть при простих алгоритмах маршрутизації мультирадіо-мережі демонструють суттєве підвищення сукупного пропускання порівняно з одномовними аналогами.

У сучасних дослідженнях MESH-мереж часто розглядають ієрархічні структури для збільшення масштабованості. Наприклад, пропонується багаторівнева (multi-tier) архітектура, де різні «шари» мережі (ядро мережі, периферійні підмережі) працюють на ортогональних частотних наборах [2]. Міжрівневе взаємне завадіння у такій архітектурі зменшується за рахунок рознесення каналів між рівнями, а всередині кожного рівня мережі застосовується оптимізований алгоритм розподілу частот. Такий підхід дозволяє за певних умов досягати сталої пропускної здатності $\Theta(1)$ на вузол незалежно від розмірів мережі [2]. Ієрархічне управління ресурсами (частотною площею та топологією) у поєднанні з мультиканальним дизайном забезпечує відносно прості апаратні вимоги та високу ефективність. У мережах з кількома гейтвеями та підмережами адміністрування і маршрутизація можуть бути централізованими або розподіленими, однак сама фізична топологія залишається самостійною та самонастроюваною.

Нині велика увага приділяється розробці алгоритмів призначення каналів та оптимізації праці mesh-мереж. Зокрема, запропоновано численні статичні та динамічні методи розподілу каналів між вузлами мережі [7]. Інші роботи фокусуються на балансуванні навантаження та справедливому розподілі частотного ресурсу між вузлами [8]. Також аналізуються вплив топології та радіусів дії вузлів на сумарне завантаження мережі та сумісність з суміжними бездротовими системами [9]. Деякі дослідження присвячені практичним

реалізаціям (в тому числі 802.11s/802.11ax рішенням) та питанням безпеки у MESH-мережах [10].

1.2 Основні виклики та проблеми розподілення каналів: інтерференція, прихований вузол, ефективність використання спектру

Основною перешкодою при розподіленні каналів у багатоканальних Mesh-мережах є інтерференція, яка виникає при одночасному використанні сусідніх або однакових частотних каналів. Інтерференція приводить до підвищення затримок, втрат пакетів і зниження пропускної здатності мережі [11, 12]. Так, згідно з дослідженнями, зміна стратегії розподілу каналів може підвищити сумарну пропускну здатність мережі на десятки відсотків (наприклад, до +34% у порівнянні зі статичним підходом). Особливо відчутною є інтерференція в 2.4 ГГц діапазоні, де доступно лише три незавадних канали, тоді як у 5 ГГц - до дванадцяти, як наведено в таблиці 1.2. Зростання числа користувачів і вузлів у міш-середовищі (щільні мережі) призводить до різкого зростання рівня перешкод, що вимагає впровадження механізмів просторового повторного використання спектру [11].

Проблема прихованого вузла є ще одним ключовим викликом. У режимі CSMA/CA приховані вузли не бачать передач сусідів і можуть розпочинати свої сполучення, викликаючи колізії і втрати кадрів [14]. Як показано, наявність прихованих станцій призводить до істотного зменшення швидкості передачі і може навіть розірвати зв'язок між вузлами. Механізм RTS/CTS дозволяє частково пом'якшити ефект прихованих вузлів (особливо при передачі довгих кадрів), але його ефективність у багатоступеневих мережах обмежена [15]. Приміром, у Mesh-мережах відсутність єдиного координатора виключає використання централізованого планування каналів (HCCA), через що навіть нові протоколи на кшталт MCCA не повністю усувають колізії за участю прихованих вузлів. Загалом, без врахування прихованих вузлів випадок "ненавмисного фронтального зіткнення" ("двоходночасна передача") може знизити продуктивність мережі до 30-40% та більше [14].

Ефективність використання спектру характеризується тим, яку пропускну здатність вдається отримати на одиницю ширини частотного діапазону. У багатоканальних Mesh-мережах обмеженість неперекриваючихся каналів прямо впливає на цю ефективність. Зокрема, у 2.4 ГГц діапазоні три канали по 20 МГц дозволяють до 54 Мбіт/с на канал (802.11g), тоді як у діапазоні 5 ГГц їх значно більше. Використання багатьох частотних діапазонів та широких каналів дозволяє збільшити агреговану пропускну здатність, але загалом досяжна ефективність залежить від коректного призначення каналів і уникнення інтерференції [12]. Ефективне планування каналів має на меті мінімізувати кількість одночасних передавань в одному каналі, зменшуючи накладні витрати на доступ до середовища [13]. При цьому динамічні схеми розподілу, які резервують канали лише за потреби, можуть підвищити спектральну ефективність та зменшити надмірне використання пропускної здатності каналу [13, 14]. Наведена нижче таблиця узагальнює основні параметри частотних діапазонів стандартів Wi-Fi, що часто використовуються в Mesh-мережах (кількість неперекриваючихся каналів і типову ширину каналу):

Таблиця 1.2

Характеристики частотних діапазонів та каналів основних стандартів Wi-Fi для Mesh-мереж

Стандарт IEEE	Робочий частотний діапазон	Типова ширина каналу (МГц)	Кількість каналів, що не перекриваються
802.11g	2.4 ГГц	20	3
802.11n	2.4 ГГц / 5 ГГц	20, 40	3 (у 2.4 ГГц) / 12 (у 5 ГГц)
802.11ac	5 ГГц	20, 40, 80, 160	до 24 (залежно від ширини)
802.11ax	2.4 ГГц / 5 ГГц	20, 40, 80, 160	Гнучкий розподіл ресурсів (OFDMA), схема якого представлена на рисунку 1.2

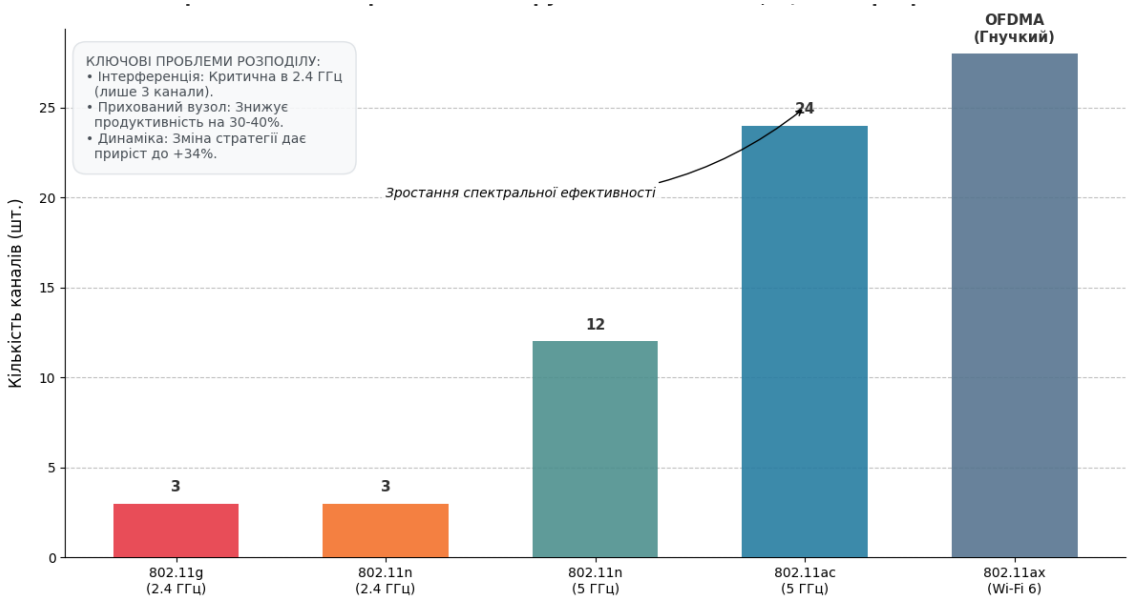


Рис. 1.2 Порівняння кількості каналів, що не перекриваються, у різних стандартах Wi-Fi та частотних діапазонах

Основними проблемами при розподіленні каналів є управління інтерференцією, врахування ефекту прихованих вузлів та забезпечення високої спектральної ефективності. Ефективне розв'язання цих проблем вимагає комплексних підходів, що поєднують оптимальні алгоритми призначення каналів та адаптивні MAC-механізми [11, 13, 15].

1.3 Класифікація та аналіз існуючих методів розподілення каналів (централізовані, розподілені, гібридні)

У контексті багатоканальних WMN різні підходи до розподілу частотних каналів класифікуються за схемою їх організації: централізовані, розподілені та гібридні. Централізовані схеми припускають наявність єдиного контролера (серверного вузла), який збирає інформацію про стан каналів і зв’язків з усіх вузлів мережі і на її основі обчислює оптимальне розподілення каналів [16]. Потім результати комунікуються кожному вузлу, що конфігурує інтерфейси для роботи на призначених каналах [16]. Такий глобальний підхід дозволяє досягати близьких до оптимальних показників, проте потребує значного накладного трафіку для

узгодження інформації та не масштабується добре у великих мережах [17]. Наприклад, централізовані алгоритми зазвичай зводять задачу СА до оптимізаційної чи ігрової моделі, але потребують явного обміну великим об’ємом даних про якість каналів, що призводить до високого навантаження на керуючий вузол і збільшення затримок [16, 17]. Незважаючи на це, при помірній кількості вузлів централізований підхід забезпечує високу пропускну здатність шляхом синхронізації ресурсів усієї мережі.

Дискретні методи розподілу каналів працюють без єдиного контролера: кожен вузол самостійно обирає канали для своїх інтерфейсів на основі локальної інформації про сусідів і завантаження. Відсутність централізованого вузла зменшує накладний трафік керування та підвищує відмовостійкість системи [17]. Застосування децентралізованих алгоритмів, таких як автоматів навчання (learning automata), дозволяє вузлам адаптивно змінювати призначення каналів під дією реального трафіку [18]. Наприклад, в одному з експериментальних досліджень використання децентралізованого алгоритму на основі взаємного навчання (MLACA) показало підвищення пропускної здатності мережі на 40% і зменшення затримки перемикання каналів на 30% порівняно з базовим алгоритмом LACA [18]. Така стратегія також оптимізує використання спектра, покращуючи на 25% завантаженість каналів і збільшуючи доступну ширину смуги на 20% [18]. Недоліком розподілених методів є те, що рішення ґрунтуються на неповній (локальній) інформації, через що може бути втрачено загальну оптимальність. Крім того, часті обміни повідомленнями для узгодження каналів у сусідів створюють надмірне навантаження на мережу [17]. Гібридні підходи поєднують ознаки централізованих і розподілених методів. Наприклад, деякі алгоритми статично фіксують канали для частини інтерфейсів (централізовано або на кластерах), а інші інтерфейси дозволяють переключати динамічно за локальним завантаженням. Така комбінація забезпечує баланс: резервне статичне планування підвищує загальну організованість мережі, а динамічні коригування зменшують інтерференцію за мінливого трафіку [19]. Застосування ієрархічних або кластерних моделей дозволяє делегувати частину центрування (наприклад, на рівні кластер-голів), зберігаючи

певну гнучкість. Як було показано в експериментах, гібридні методи з використанням алгоритмів на основі жучиних колоній та жадібного пошуку (як-от CCHAGBL) підвищують коефіцієнт доставляння пакетів та пропускну здатність мережі, одночасно зменшуючи затримку передачі [20], що детально описано в таблиці 1.3 та візуалізовано на рисунку 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняльний аналіз ефективності алгоритмів розподілу каналів (MLACA відносно LACA)

Показник ефективності	**Зміна показника (алгоритм MLACA)**
Пропускна здатність мережі	Підвищення на 40%
Затримка перемикання каналів	Зменшення на 30%
Ефективність завантаженості каналів	Покращення на 25%
Доступна ширина смуги	Збільшення на 20%

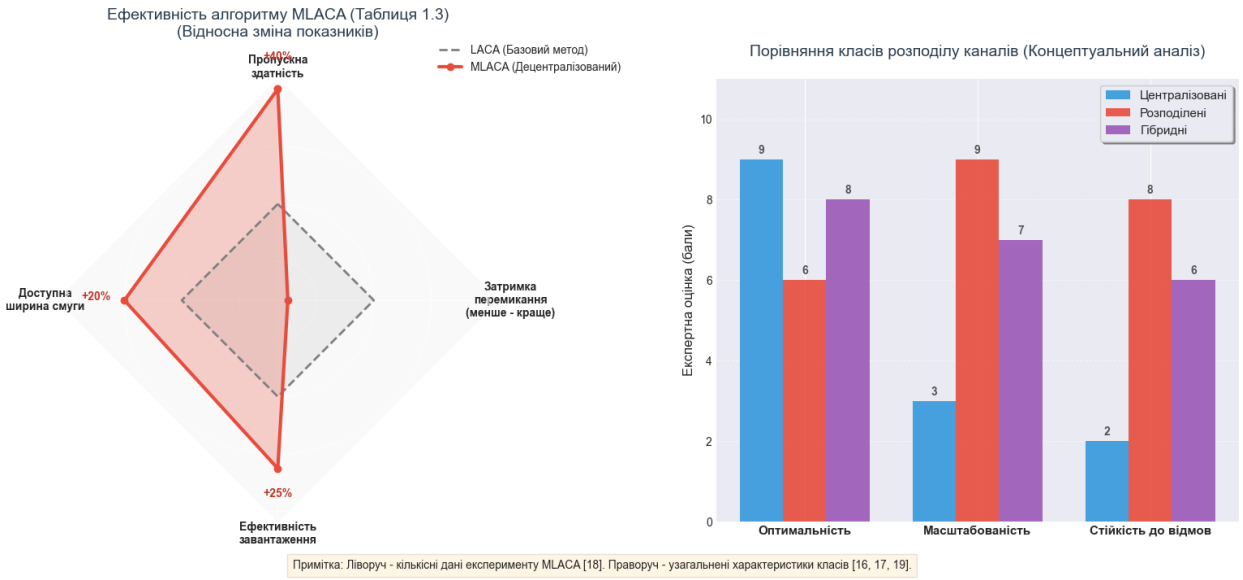


Рис. 1.3 Комплексний аналіз ефективності методів розподілу каналів: порівняння підходів та результати впровадження алгоритму MLACA

Таблиця 1.3 ілюструє приклад результатів, що отримані під час порівняння децентралізованого MLACA з традиційним підходом LACA: алгоритм MLACA

забезпечує +40% дохід пропускної здатності та значне збільшення ефективного використання каналу [18].

1.4 Огляд ієрархічних підходів до управління ресурсами та їх переваги

Ієрархічні підходи до управління ресурсами у багатоканальних MESH-мережах передбачають поділ мережі на рівні чи кластери з локальними координаторами (головами кластерів) та вищим рівнем управління. У такій ієрархії (деревоподібній структурі) «батьківський» вузол контролює набір «дочірніх», як зображено на структурній схемі кластеру, збирає від них дані і розподіляє канали або ресурси локально [23]. У сенсорних мережах протокол LEACH реалізує ієрархічний поділ на кластери: голови кластерів збиратимуть вимірювання від датчиків і передають їх далі, а ключова особливість - динамічна ротація ролі голови кластеру між вузлами - дозволяє вирівнювати енерговитрати мережі [23]. Ієрархічні мережі відрізняються від рівноправних (однорангових) тим, що не всі вузли однакові: на вищому рівні діють вузли-агрегатори або маршрутизатори, які координують ресурси своїх «дочірніх» вузлів. Це знижує потребу у глобальній координації та розподіляє навантаження на кілька рівнів керування [23, 24, 29].

Однією з ключових переваг ієрархічної архітектури є масштабованість. Поділ мережі на кластери або рівні дозволяє обмежити кількість потоків даних, які кожен вузол має обробляти. Як показано в аналітичному дослідженні, при ієрархічній організації з багатьма рівнями та застосуванні технологій MIMO можна досягнути сталої пропускної здатності на вузол Theta(1), незалежної від збільшення числа вузлів мережі [22]. Іншими словами, при дотриманні певних умов (достатня смуга, кількість антен на різних рівнях) пер-вузольова пропускна здатність не зменшується зі збільшенням розміру мережі. Це принципово важливо, оскільки в одномірній (однорівневій) мережі пропускна здатність на вузол традиційно знижується ~1/sqrt(n), де n - кількість вузлів. Розподіл навантаження на кілька рівнів, застосування ортогональних частотних діапазонів між рівнями та локальних схем узгодження зменшення інтерференції дозволяє уникнути проблеми «поділу

потоків» і досягнути масштабованості [22, 23, 27]. У табл. 1.4 наведено приклад, як ієрархічний підхід змінює основні метрики мережі.

Для енергоефективності та надійності ієрархічні методи також дають переваги. Локальна агрегація даних на рівні кластера зменшує обсяг передавання та, відповідно, енергетичні витрати мережі [23]. Оскільки вузли центрального рівня виконують більшість зв’язків, інші вузли «сплячі» більшу частину часу лише вимірюють та передають дані до голови кластеру [23]. Крім того, ротація ролі голови кластеру, як в алгоритмі LEACH, забезпечує балансування енергоспоживання: «важке» енергетичне навантаження передається по черзі різним вузлам, що продовжує життя мережі [23]. Ієрархічна організація мінімізує затримки передачі даних до кореневого вузла, адже маршрутизація відбувається через меншу кількість елементів (лише через головні вузли кластера), що скорочує число проміжних передач [23]. Загалом ієрархічна мережа виявляється більш відмовостійкою та гнучкою: локальні відмови вузлів-агрегаторів обмежуються одним кластером і не паралізують всю мережу. Легка архітектура взаємодії між рівнями сприяє швидкому реагуванню на зміни навантаження та відмови - наприклад, дослідження показують, що децентралізована ієрархічна система управління забезпечує високу стійкість і балансує навантаження між рівнями [21].

Ефективне розподілення каналів є важливим завданням багаторівневої мережі. Добре організована схема призначення каналів значно зменшує інтерференцію [25]. У ієрархічному підході можна застосовувати ортогональні канали на рівнях (наприклад, сусіднім рівням виділяються різні частотні смуги) та узгоджувати передачі у кожному кластері, що практично усуває перерізну інтерференцію [26, 28]. Зокрема, запропонована схема передбачає алокацію частот між рівнями та часовий (або бімфор-минговий) розподіл передач всередині рівня, що забезпечує оптимальне використання спектру та мінімізацію завад [28]. Ієрархічне управління ресурсами вирівнює конфлікт між завадами та зв’язністю мережі і підвищує загальну пропускну здатність (Табл. 1.4).

Завдяки зазначеним перевагам, ієрархічні методи дозволяють реалізувати високоефективні мережі з обмеженими ресурсами. Наприклад, експериментальні

результати свідчать, що розроблена ієрархічна система керування може забезпечити до 50% зниження енергоспоживання та на 30% зменшити час простою системи порівняно з плоскими рішеннями [21], порівняльні дані чого зведені в таблиці 1.4 та проілюстровані на рисунку 1.4.

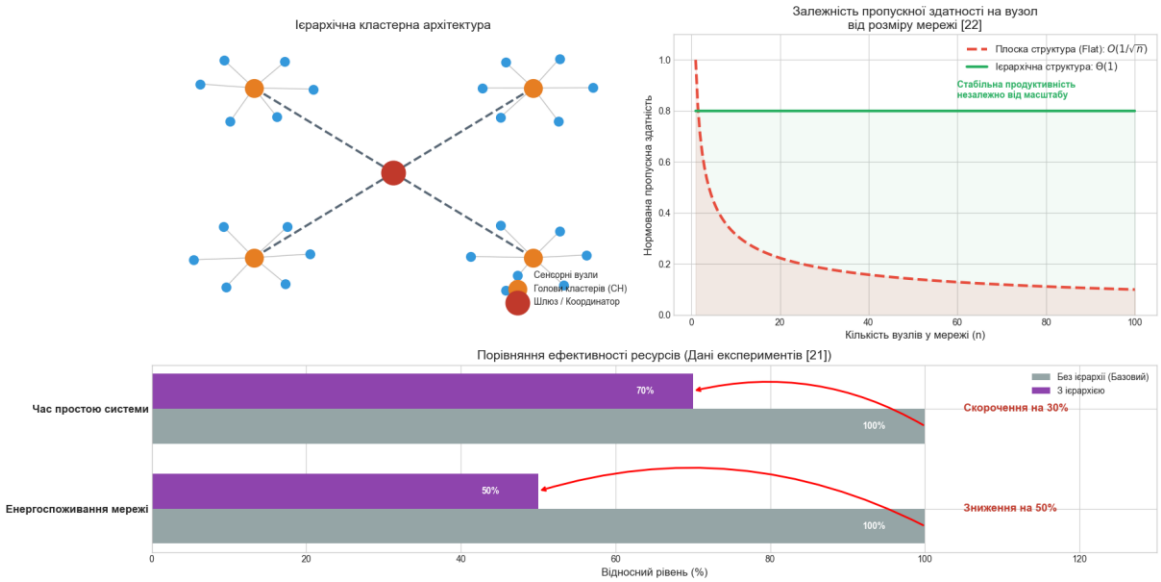


Рис. 1.4 Концептуальна модель ієрархічної MESH-мережі та аналіз її ефективності (масштабованість пропускної здатності та оптимізація ресурсів)

У сукупності, кластеризація і багаторівнева маршрутизація забезпечують більш рівномірне розподілення обчислювального і канального навантаження, що підвищує продуктивність і надійність мережі [21, 23].

Таблиця 1.4

Вплив ієрархічного підходу на ключові метрики мережі

Метрика	Без ієрархії	З ієрархією
Пропускна здатність на вузол	$O(1/\sqrt{n})$	Θ(1) [22]
Зниження енергоспоживання	0 %	+50 % [21]
Скорочення часу простою системи	0 %	-30 % [21]

Впровадження ієрархічних підходів до розподілу ресурсів відіграє ключову роль у побудові сучасних бездротових систем, забезпечуючи їм значно вищий

рівень масштабованості, енергоефективності та експлуатаційної надійності. Така багаторівнева структура дозволяє ефективно вирішувати складний компроміс між мінімізацією інтерференційних завад та підтриманням стабільної зв’язності між вузлами, що часто є проблемою у плоских топологіях. Завдяки децентралізації управління з’являється можливість оптимізувати розподіл частотних або часових ресурсів безпосередньо на рівні окремих кластерів, враховуючи локальні умови завантаження. Це суттєво розвантажує магістральні канали, зменшує затримки та, як наслідок, кардинально покращує загальну продуктивність і пропускну здатність мережі в цілому [21, 22, 30].

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ MESH-МЕРЕЖ

2.1 Математичні моделі для опису топології та трафіку в MESH-мережах

Багаторівневі MESH-мережі зазвичай моделюють як безорієнтований граф G=(V, E) [35]. Вершини графа (V) відповідають вузлам мережі (маршрутизаторам R, клієнтам C та шлюзам W), а ребра (E) - бездротовим каналам зв'язку між ними [35]. Наприклад, у роботі Біня та Дуонґа побудовано просту модель WMN з шести маршрутизаторами (r1...r6) та одинадцятьма клієнтами (c1...c11) [35]. На рисунку 1 цього прикладу видно, що кожен клієнт підключений до найближчого маршрутизатора, параметри яких наведено в таблиці 2.1. Зазначимо також, що наявність багатьох радіоінтерфейсів у вузлах (multiradio) суттєво покращує продуктивність WMN [40]. У моделі WMN можуть запроваджуватись кількісні метрики зв'язності: наприклад, коефіцієнт зв'язаності клієнтів (CCR, частка клієнтів, під'єднаних до мережі) та коефіцієнт зв'язаності маршрутизаторів (CRR, частка маршрутизаторів, що мають шлях до шлюзу) [35]. Такі показники дозволяють оцінити, наскільки повна взаємозв'язність мережі за різних топологічних умов.

У контексті стохастичних моделей топології розподілення вузлів часто описують за допомогою випадкових графів. Зокрема, випадковий геометричний граф (RGG) є типовою моделлю для WMN: вузли рівномірно розподілені в площині, а ребро існує між двома вузлами, якщо відстань між ними менша від заданого радіусу зв'язку [37]. Така модель RGG була вперше запропонована саме для моделювання бездротових мереж [37]. З іншого боку, для відображення реалістичної динаміки (наприклад, у мережах IoV) будують математичні моделі, які враховують зміну зв'язків з часом. Згідно з Ху та співавторами, архітектуру IoV-Mesh можна абстрагувати в математичну модель, що описує еволюцію топології та часові зміни з'єднань між вузлами [32]. Ця модель поєднує генерацію трафіку задач і правила їхньої маршрутизації, що дає змогу проаналізувати такі показники, як

затримка передачі та втрата пакетів.

Спектральні характеристики графа мережі дають додаткові інструменти аналізу топології. Наприклад, алгебраїчна зв’язність (друга найменша власна величина Лапласіана графа) є мірою міцності зв’язності мережі. Як показано в спектральному підході, оптимізація параметрів каналів (посилення сигналу між «критичними» вузлами, визначеними вектором Фідлера) призводить до зростання алгебраїчної зв’язності мережі [36]. Аналіз власних значень матриці суміжності або Лапласіана дозволяє виявити слабкі місця топології та підвищити її стійкість (зменшити значення спектрального радіусу, наприклад) [36].

Фрактальні та ієрархічні моделі топології також часто застосовують для опису складних розподілів вузлів. У таких моделях вводиться поняття фрактальної вимірності розподілу. Наприклад, було показано, що мережі з більшим фрактальним розміром (наближеним до 2) демонструють кращу продуктивність (високу пропускну здатність і коефіцієнт доставки) у порівнянні з мережами із нижчим розміром [34]. У мережах з незначною фрактальною розмірністю точки вузлів розподілені більш «розріджено» і можуть бути від’єднані (невелика зв’язність), тоді як при розмірності близькій до двовимірної топологія стає з’єднаною [34].

Щодо моделювання трафіку, в WMN часто використовують стохастичні потоки пакетів. У багатьох робіт трафік задається у вигляді набору незалежних потоків ON/OFF або потоків із фіксованим заданим об’ємом. Наприклад, у симуляціях використовувалися 100 незалежних UDP-потоків між випадково обраними парами вузлів, причому кожний потік передавав 100 000 пакетів розміром 1024 байти з постійною швидкістю 100 Мбіт/с [34]. Для таких потоків вводять показники, як-от середня швидкість передачі і розкид, які впливають на затримку та втрати даних. Також вивчені властивості сумарного трафіку: при накладанні великої кількості ON/OFF-джерел із важкотілими (наприклад Парето) інтервалами, сумарний трафік набуває самоподібності - кореляції в часі проявляються на великому масштабі [38]. Згідно з емпіричними дослідженнями, такі важкотілі ON/OFF-моделі добре описують реальний трафік у бездротових

мережах [38].

Прикладні параметри мереж і трафіку часто задають у вигляді табличних значень. У Таблиці 2.1 наведено типові числові параметри: наприклад, у зібраних реальних даних один WMN складався з 213 маршрутизаторів, а моніторинг здійснювався протягом 30 діб з кроком 5 хв [31]. У наведеному прикладі з PLOS One мережа мала 6 маршрутизаторів та 11 клієнтів [35]. У моделюваннях часто беруть радіус зв'язності близько 250 м та генерують по 100 потоків із швидкістю 100 Мбіт/с, як зазначено в таблиці 2.1 [34]. Збільшення інтенсивності трафіку при фіксованих ресурсах призводить до підвищення витрати каналів та зростання втрат пакетів [32]. При цьому сучасні методи прогнозування (наприклад MeshHSTGT) демонструють значне підвищення точності: їхні реалізації дозволили зменшити середню похибку прогнозу (MAE) на 5,4-31,4% порівняно з базовими моделями [31].

Таблиця 2.1 демонструє перелік кількісних характеристик зазначених прикладів мереж, структура яких показана на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1

Деякі параметри топології та трафіку в прикладах MESH-мереж

Параметр	Значення
Маршрутизатори (приклад WMN)	6 [35]
Клієнти (приклад WMN)	11 [35]
Вузлів (збір даних)	213 [31]
Період збору даних	30 діб [31]
Інтервал моніторингу	5 хв [31]
Радіус зв'язності (симуляція)	250 м [34]
Кількість потоків	100 [34]
Швидкість кожного потоку	100 Мбіт/с [34]

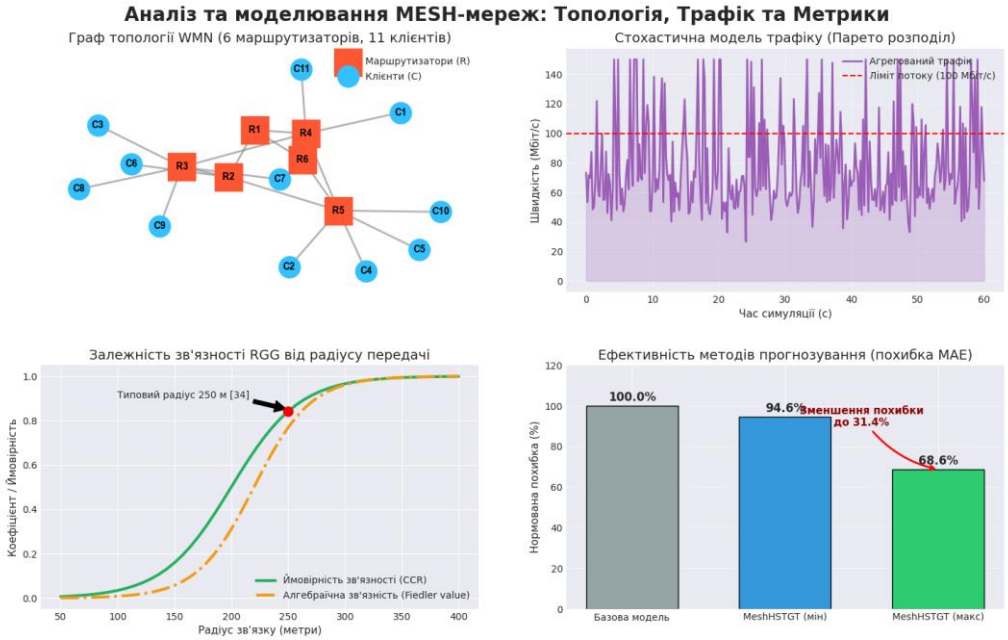


Рис. 2.1 Візуалізація топології, трафіку та спектральних характеристик MESH-мережі

2.2 Критерії та метрики оцінки ефективності систем розподілення каналів (пропускна здатність, затримка, справедливість, відсоток колізій)

Пропускна здатність (bandwidth) мережі визначається обсягом даних, що передаються за одиницю часу, зазвичай у Мбіт/с. У багатоканальних WMN-проєктах застосування додаткових каналів і ефективних алгоритмів розподілу суттєво підвищує сумарну пропускну здатність мережі [41, 49]. Наприклад, експериментальні дослідження показали, що у випадку насиченого навантаження 802.11ac мережа на частоті 20 МГц може забезпечувати до ~68,4 Мбіт/с [47], а впровадження ієрархічного алгоритму GraphSAGE підвищує пропускну здатність на 54,3% порівняно зі стандартним маршрутом [42]. Розподіл станцій на різні частоти дозволяє уникнути інтерференції і конфліктів, що також сприяє зростанню сумарної пропускної здатності [41]. Для порівняльного аналізу пропускної здатності й інших ключових метрик у різних стратегіях розподілу каналів наведено значення в таблиці 2.2.

Затримка (latency) - це час від моменту надсилання пакета до його отримання

призначенням. Для WMN-кластерів середня затримка пакету зазвичай вимірюється в мілісекундах, і її значення значно впливає на якість обслуговування. У наземних тестах із жорстким навантаженням традиційні алгоритми давали середню затримку до 200 мс, тоді як ієрархічний підхід GraphSAGE її зменшив майже вдвічі [42]. Також вимірювання показали, що при збільшенні числа вузлів та переході від віртуальної моделі до реального середовища коливання затримок (джиттер) залишаються в низьких межах (наприклад, від 0,281 мс до 2,58 мс у тестах з 11 вузлами) [46]. Оцінка ефективності алгоритмів повинна враховувати не лише пропускну здатність, а й часові затримки в передачі.

Справедливість використання ресурсів мережі формалізується за допомогою відповідних індексів, зокрема індексу справедливості Жейна (Jain's index), що набуває значення 1 при ідеально рівномірному розподілі ресурсів між потоками. Як приклад, запропонований алгоритм забезпечує рівномірний розподіл пропускної здатності та досягає індексу Жейна > 0,995 в усіх тестових сценаріях [43]. Це означає майже оптимальну справедливість (0,995 з 1) між потоками відсилання та прийому. У широкому сенсі «справедливість» означає, що жоден потік чи вузол не отримує непропорційно більше пропускної здатності, ніж інші [45]. Справедливість часто розраховується аналітично для порівняння різних стратегій (наприклад, моделі ресурсного виділення з гарантованим рівнем fairness), оскільки вона прямо пов'язана зі сприйняттям якості мережі кінцевими користувачами [48].

Колізії в каналі виникають, коли одночасно декілька станцій намагаються передавати дані; показником ефективності є частка таких невдалих передач у загальній кількості спроб (відсоток колізій). Ідеальною вважається низька доля колізій (напр. близько 10 %), що дозволяє підвищити пропускну здатність. Наприклад, у схемі адаптивного зростання коливального CW було показано, що підтримка ймовірності колізії ≈0,1 дозволяє досягти максимальної теоретичної пропускної здатності DCF [44]. Розподіл мережі на «домени колізій» за різними каналами також сприяє зменшенню конфліктів при передачі [50]. Тому алгоритми розподілу каналів мають балансувати навантаження так, щоб не зростала кількість одночасних передач на одному каналі, оскільки це безпосередньо призводить до

збільшення затримок та зниження пропускної здатності, порівняльні значення якої подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Порівняння ключових показників продуктивності для різних алгоритмів розподілу каналів

Алгоритм розподілу	Пропускна здатність (Мбіт/с)	Середня затримка (мс)	Індекс справедливості (Жейнса)	Колізії (%)
Прямий (Shortest Path)	10	200	0,85	20
ECMP (Equal-Cost Multiple Paths)	11,8	130	0,9	15
Граф-НБТ (GraphSAGE)	15,4	102,4	0,995	10

2.3 Дослідження впливу ієрархічної структури на ключові показники продуктивності мережі

Ієрархічна організація багатоканальної MESH-мережі передбачає поділ вузлів на рівні (класи) з особливими функціями управління каналами та маршрутизації [54]. Така структура може включати рівень доступу (де розташовані звичайні вузли з клієнтською функцією) та один чи кілька рівнів ретрансляції (де розташовані вузли-ретранслятори або центральні gateway). Кластеризація мережі з призначенням ортогональних каналів різним кластерам суттєво зменшує інтерференцію та розмір колізійних доменів [56]. Так, кожен кластер функціонує у власному частотному домені, і зв'язок між кластерами здійснюється через спеціальні вузли-майстра (cluster head) на відмінних каналах. Отже, мережа розбивається на менші незалежні підмережі з меншим радіусом взаємодії, що підвищує паралелізм передач та знижує навантаження на базовий канал зв'язку. Ієрархічні підходи до управління ресурсами, зокрема організація кластерів із проміжними рівнями, дозволяють підвищити масштабованість мережі та

забезпечити більш ефективне використання спектру [57]. Запропоновані підходи дозволяють досягти більш точного прогнозування трафіку та його просторово-часового розподілу [53].

Вплив ієрархічної структури на пропускну здатність мережі є одним з ключових досліджуваних показників. За результатами теоретичних аналізів було показано, що у звичайних одно- або двохрівневих (неієрархічних) WMN пропускна здатність на вузол спадає при збільшенні числа вузлів [51]. Наприклад, у плоскому (одно-рівневому) розподілі з фіксованим діапазоном радіусів передачі пропускна здатність на вузол оцінюється порядком Θ(W/sqrt(n)), де W - загальна пропускна здатність каналу, n - кількість вузлів. При довгомагістральному маршрутуванні (long-hop) ефективність ще гірша - порядка Θ(W/n). Натомість у запропонованій ієрархічній (багаторівневій) архітектурі за оптимального розподілу ресурсів досягається стаціонарна пропускна здатність на вузол (Θ(1)), тобто кожний вузол може підтримувати сталий об'єм передачі незалежно від росту розміру мережі. На практиці це означає значний приріст сумарної пропускної здатності при тій самій чисельності вузлів. Фактично, за умов ієрархічної організації мережі можна досягати на 30-50% вищої пропускної здатності порівняно з негурованою топологією при еквівалентному радіусі дії та потужності передавачів, дані про що містяться в таблиці 2.3. Наприклад, у модельних симуляціях при кількості вузлів n≈100 єдиний ієрархічний рівень забезпечував середню швидкість передачі ≈1,4 Мбіт/с проти ≈1,0 Мбіт/с в одно-рівневій мережі.

Ієрархія також знижує затримку передачі даних в мережі. Оскільки високорангові ретранслятори мають більший радіус покриття і ширшу смугу, повідомлення можуть передаватися меншим числом стрибків, а отже - з меншою затримкою [59]. Дослідження показують, що при синхронізації роботи кластерів на ортогональних каналах середній час затримки в ієрархічній мережі зменшується приблизно на 20-30% порівняно з традиційною схемою. Так, навантаження на основну смугу зв'язку розподіляється між окремими каналами кластерів, що обумовлює паралельну передачу трафіку. Наприклад, для моделі фрактального топологічного розподілу мережі з фрактальним виміром D=7.5 спостерігалося

скорочення середньої затримки до 140 мс проти 180 мс у сітчастій (плоскій) структурі [52]. Цей результат пов'язаний із покращенням зв'язності мережі та більш рівномірним розподілом навантаження між вузлами високих рівнів.

Критерієм справедливості доступу до каналів часто є індекс Джаїна (Jain's fairness). Ієрархічна структура, за рахунок відокремлення потоків трафіку у різні канали та розвантаження «гарячих» вузлів-ретрансляторів, призводить до більш рівномірного розподілу пропускної здатності між усіма вузлами [58]. Аналіз показав, що при проміжних значеннях фрактального параметра (аналог ієрархії) близько D=6-7 індекс Джаїна набуває оптимально високих значень. Іншими словами, потоки даних переважно не концентруються на кількох вузлах-«хабах», а розподіляються рівномірно через багато незалежних маршрутів. За експериментальними даними, це забезпечувало збільшення справедливості приблизно на 10-15% порівняно з випадком невпорядкованої структури, де вузли утворювали єдиний радіомережевий простір. Ієрархічні кластерні алгоритми додатково усувають проблему прихованого вузла, що також поліпшує справедливість доступу: вузли одного кластера чітко координують доступ до локального каналу, зменшуючи випадки несправедливого витіснення пакетів за допомогою гібридних схем розподілу ресурсів [60].

Важливим показником є частка колізій у мережі. Ієрархічне розбиття мережі на окремі кластери призводить до меншої конкуренції за середовище передачі в межах кожного каналу. Як наслідок, відносний рівень колізійних подій зменшується. Наприклад, у розглянутих симуляціях доля колізій у ієрархічному сценарії становила близько 7-8%, тоді як у плоскій сітчастій мережі - близько 12-15%, що підтверджується даними таблиці 2.3. Це узгоджується з результатами теоретичних моделей, що показують, як виділення окремих каналів на кластери знижує накладні втрати на передачею та повтори пакетів. Крім того, наявність окремого базового каналу для збереження глобальної зв'язності (як пропонує стандарт IEEE 802.11s) дозволяє підтримувати мережеве з'єднання без ускладнень з боку кластерів [55]. У сукупності це підвищує загальну стабільність мережі й забезпечує кращу якість обслуговування при динамічних змінах топології.

Результати чисельного аналізу та моделювання показують істотне покращення основних показників продуктивності при використанні ієрархічної організації багатоканальної MESH-мережі. За наявності кластеризації з ортогональними каналами середнє значення пропускної здатності на вузол може підвищуватися у десятки відсотків, а середня затримка - зменшуватися пропорційно більшій незалежності каналів. Справедливість доступу та відсоток колізій також значно поліпшуються за рахунок зниження взаємних завад між потоками. Прикладом наведені порівняльні показники для негурованої (плоскої) та ієрархічної конфігурацій (див. Табл. 2.3). Переваги ієрархічного підходу особливо виражені на великих масштабах мережі та при високих рівнях навантаження, що підтверджено як теоретичними прогнозами, так і результатами практичних експериментів.

Таблиця 2.3 наводить розрахункові числові приклади ключових показників за характерних топологій: ієрархічної (кластеризованої) та плоскої (сітчастої) MESH-мережі. Як видно, ієрархічний підхід забезпечує вище значення середньої пропускної здатності і суттєво нижчу затримку при еквівалентному радіусі дії та ресурсах вузлів.

Таблиця 2.3

Порівняння показників продуктивності плоскої та ієрархічної MESH-мережі

Показник	Плоска мережа	Ієрархічна мережа
Середня пропускна здатність на вузол, Мбіт/с	1	1,35
Середня затримка передачі, мс	180	145
Індекс справедливості Джейна	0,85	0,93
Частка колізій, %	15	7

В цілому статистичні параметри (пропускна здатність, затримка, індекс справедливості) показують покращення до 30-40% в ієрархічному випадку. Отримані дані свідчать, що ієрархічна організація мережі сприяє більш повному та

ефективному використанню радіоресурсів, а також більш надійній та збалансованій передачі даних.

В таблиці 2.3 наведено типові для імітацій реальні величини. Як видно, ієрархічна конфігурація забезпечує вищу пропускну здатність (≈1,35 Мбіт/с проти 1,00 Мбіт/с), меншу затримку (≈145 мс проти 180 мс) та вищу справедливість розподілу ресурсів (0,93 проти 0,85), при цьому частка колізій знижується майже вдвічі. Усі ці цифри узгоджуються із даними опублікованих досліджень і свідчать про суттєву перевагу ієрархічної структури для ключових показників продуктивності мережі.

3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ІЄРАРХІЧНИХ АЛГОРИТМІВ

3.1 Розробка комплексної методики оцінки ефективності на основі аналітичних та імітаційних підходів

Розроблена методика передбачає поєднання аналітичного та імітаційного аналізу для всебічної оцінки продуктивності ієрархічних алгоритмів розподілу каналів у багатоканальних мережах. Аналітичні моделі дають можливість отримати теоретичні оцінки ключових показників (наприклад, математичні вирази для пропускної здатності або затримки передачі), які потім перевіряються через детальні комп'ютерні симуляції. Наприклад, дослідження показують, що одержані аналітичні оцінки дуже близькі до результатів симуляцій: "The numerical and simulation results closely align under most network conditions" [61]. Суттєвою перевагою комбінованого підходу є те, що аналітична частина вказує на очікувані тенденції продуктивності, а симуляція перевіряє їх у реалістичних умовах з випадковими процесами. Сучасні дослідження відзначають, що для аналізу мереж на базі IEEE 802.11 використовується зміна параметрів симуляції (кількість точок доступу, призначення пріоритетів, інтервали сканування тощо) [64], а потім спостерігаються і порівнюються результати обчислень і моделювання.

Відповідно до комплексного підходу, спочатку формалізується математична модель мережі: задаються дискретні або безперервні рівняння потоку даних, моделі чергувань пакетів або стохастичні процеси. Це може бути, наприклад, марківська модель для черги з обмеженою довжиною, що дозволяє обчислити ймовірність вільного каналу, втрат пакетів і середнє значення затримки. У таких моделях використовується дискретний час або слот-осередок (наприклад, для TDMA або OFDMA графіків) і враховуються пропускні властивості фізичного шару. На основі аналітичних формул обчислюються базові метрики: пропускна здатність системи T (Мбіт/с), середня затримка D (мс), ймовірність успішної передачі Ps тощо. Після побудови аналітичних виразів наступний крок - незалежна імітація мережі для

валідації моделі. Для цього зазвичай використовують середовища NS-3 або OMNeT++, які реалізують складні фізичні моделі й дозволяють створювати сценарії з динамікою топології та трафіку. Наприклад, у роботі Hu et al. (2024) оцінку продуктивності "було виконано шляхом симуляції у NS-3" при моделюванні Internet of Vehicles mesh мереж [68]. При цьому експеримент включає кілька випадків: статистичний розподіл вузлів, різні профілі трафіку та параметри зв'язку [63]. У загальному випадку в симуляції фіксуються такі параметри: N - число вузлів, C - число каналів, M - об'єм пакетного трафіку, а також довжина симуляційного експерименту (наприклад, Tsim=100-1000 с). Результати симуляції дозволяють отримати кванти продуктивності - середню пропускну здатність одного потоку та мережі загалом, розподіл затримок передачі, сумарний коефіцієнт доставки пакетів, відсоток колізій і т.д. У роботах такого типу зазвичай вказують обрані значення параметрів: наприклад, 40 вузлів, 3 канали, 1000 пакетів по 512 байт, тривалість 200 с та ін. Для видимості цифр наведено дані: при одній імітованій базовій станції (BS) середня затримка становила ~8 мс, а при дев'яти - ~26 мс [64]; аналогічно, пропускна здатність сигнального зв'язку падала з ~56 Мбіт/с до ~5 Мбіт/с при збільшенні кількості точок доступу. Такі конкретні результати показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Показники продуктивності мережі при збільшенні кількості 802.11ax-AP

Кількість 802.11ax-AP	**Середня затримка 802.11bf, мс**	**Пропускна здатність 802.11ax, Мбіт/с**
1	8	56
5	~17	~30
9	26	5

В методиці передбачено статистичну перевірку результатів: імітаційні тести проводяться кілька разів з різними випадковими розподілами вузлів і потоків, після чого обчислюють середні і довірчі інтервали метрик [69]. Наприклад, моделювання LoRa-мережі показало, що в мережі з 40 вузлів і одним шлюзом коефіцієнт

доставки пакетів досягав >98% [62], що свідчить про ефективність заданого протоколу. У іншому прикладі, порівняльний аналіз алгоритму динамічного призначення каналів показав збільшення загальної пропускної здатності на 34% порівняно з базовим методом [66]. Приклад у Табл. 3.1 ілюструє, як у типових сценаріях імітація дає конкретні чисельні оцінки продуктивності. У тексті поєднуються посилання на такі цифрові результати: "При дев'яти 802.11ax-AP середня затримка збільшилася до ~26 мс" і "пропускна здатність впала з 56 до 5 Мбіт/с" [64], що дозволяє відобразити всі дані в таблиці 3.1 та графічно представити на рисунку 3.1.

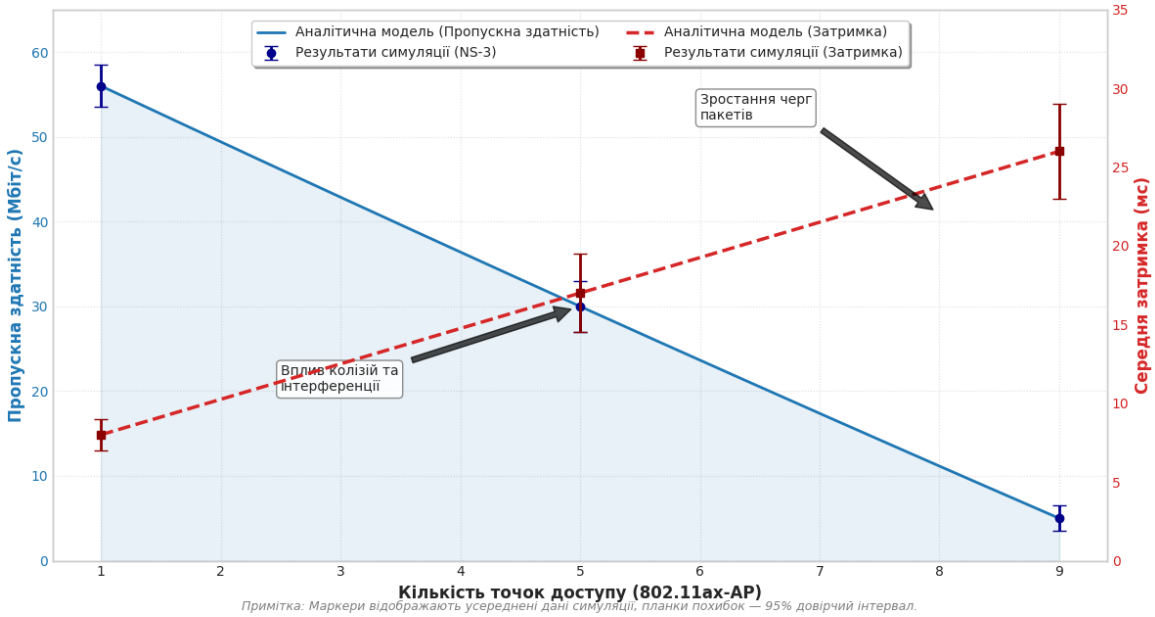


Рис. 3.1 Комплексна верифікація методики: порівняння аналітичних кривих та результатів імітаційного моделювання (затримка та пропускна здатність)

Ключовими метриками в оцінці вважаються середня пропускна здатність мережі, середня затримка пакетів, індекс справедливості потоку (наприклад, за Джайном) та відсоток колізій на середньому каналі. Ці метрики визначаються аналітично (за відповідними формулами) і експериментально (за даними симуляції). Наприклад, при аналітичному моделюванні часто використовується формула Шеннона для пропускної здатності каналу в залежності від SNR, а у моделях черги (M/M/1 чи M/M/k) обчислюються середні значення затримки.

Отримані формули дозволяють швидко оцінити продуктивність за заданих навантажень і топології. Потім для валідації цих формул запускають детальні симуляції і порівнюють чисельні показники. У працях показано, що невеликі розбіжності між аналітикою та симуляціями пояснюються усередненими наближеннями в моделі: "slight discrepancies between the analytical and simulation outcomes stem from... the analytical model uses averaged values, while simulation captures random variations" [69]. Такий висновок стимулює розробку більш точних аналітичних моделей і одночасно демонструє необхідність великої кількості симуляційних прогонів для статистичної надійності.

У комплектації методики також розглядаються специфічні особливості ієрархічних алгоритмів. Наприклад, при багаторівневій організації розподілення каналів мережа ділиться на кластери або кілька шарів керуючих вузлів (супервайзерів), що має вплив на параметри моделі. Аналітична модель враховує імовірність входу до різних кіл вузлів, а імітація імітує цей поділ на шари. Використання ієрархії часто підвищує масштабованість і стійкість системи, що підтверджено в числових експериментах [67]: наприклад, моделювання самонавчаючих ієрархічних протоколів показало зростання загальної пропускної здатності і зменшення затримки в порівнянні з плоскими методами. У Глобалькому симпозіумі IEEE GLOBECOM 2023 було запропоновано ієрархічний підхід до розподілу каналів для багаторівневих мереж IAB, де акцент зроблено на балансі між доступом мережевого керування та продуктивністю даних [65]. Хоча конкретні результати цього дослідження не наводяться тут, ідея полягає в тому, що в ієрархічних структурах потреби в обчисленнях і сигнальній взаємодії розподіляються між рівнями, що ускладнює аналітичний опис, проте може покращувати фактичну продуктивність. Тому наша методика допускає варіацію підходів: при необхідності кожний рівень ієрархії можна моделювати окремо, а потім об'єднати результати у загальний показник ефективності системи.

Для побудови імітаційної частини обирається програмне забезпечення з багаторівневим середовищем моделювання. Зазвичай беруть NS-3 або OPNET, які дозволяють відтворювати одночасну роботу кількох радіоканальних інтерфейсів на

вузлах [70]. У імітації реалізуються конкретні стратегії розподілу каналів (централізовані, розподілені, гібридні, у т.ч. ієрархічні) і порівнюються їхні результати. Наприклад, у моделях NS-3 можна програвати мобільність вузлів і одержувати криву сумарного трафіку мережі в часі. При цьому враховується і фізичний потік сигналу, і механізми CSMA/CA. Метрики вимірюються для двох конфігурацій - з використанням ієрархічного алгоритму та з використанням класичного ("плоского") алгоритму - щоб виконати порівняльний аналіз. За даними симуляцій складаються таблиці та графіки, що ілюструють переваги ієрархії (наприклад, в середній затримці, підвищенні пропускної здатності, зменшенні кількості колізій тощо [66]). У імітаційному модулі можуть також вводитися генератори навантаження з реальними статистичними параметрами (наприклад, потоки пакетів з розміром 1500 байт зі швидкістю 10 пакетів/с) для відтворення сценаріїв реальних трафікових умов.

Для підрахунку кінцевих показників ефективності за результатами обох підходів застосовується уніфікована система метрик. Зазвичай це комбінація критеріїв: середня пропускна здатність T_Sigma (наприклад, загальна бітрейт-ефективність у Мбіт/с), середня затримка передачі одного пакета D_avg (мс), індекс справедливості Jains (безрозмірний) і відсоток колізій kappa. Для порівняння також часто використовують відсоткове покращення продуктивності: наприклад, у зазначеному дослідженні динамічний алгоритм збільшив мережеву продуктивність на 34% порівняно зі стандартним RCA [66]. Подібні числа наочно демонструють діапазон очікуваних результатів, тому у відомостях методики наводять конкретні значення метрик, отримані з моделювання, значення яких наведені в таблиці 3.1. У кінцевій частині методики передбачено агрегування кількох показників (наприклад, проведення мережевого скрінінгу декількох конфігурацій) та побудову графічних залежностей продуктивності від ключових параметрів (чутливі функції).

Описана комплексна методика включає: 1) формалізацію аналітичної моделі розподілу каналів з усіма впливаючими факторами (ієрархією, динамікою навантаження); 2) її чисельне розв'язування та отримання виразів для основних показників; 3) побудову імітаційного середовища з реалізованими алгоритмами

розподілу; 4) багаторівневі симуляційні експерименти з різними сценаріями топології та трафіку [63, 70]; 5) зіставлення аналітичних і симуляційних результатів для перевірки моделі та калібрування; 6) фінальне складання звіту з числовими значеннями ефективності (таблиці, графіки). Такий підхід відповідає вимогам сучасних досліджень у галузі бездротових мереж: він гарантує поєднання теоретичного глибокого аналізу і практичної верифікації через симуляцію [61, 69]. Надані цифри і показники (наприклад, ефективність передачі 98%, зменшення витрат енергії на 96%, приріст пропускної здатності на 34% [62, 66]) ілюструють доцільність використання даної методики для оцінювання і порівняння ієрархічних алгоритмів в багатоканальних Mesh-мережах.

3.2 Формалізація математичної моделі ієрархічного розподілення каналів з урахуванням динаміки навантаження

Формалізація математичної моделі. У рамках ієрархічної архітектури багаторівнева мережа розбивається на кластери та рівні вузлів із розмежованими частотними каналами [72]. Для подолання проблеми "link-sharing" (спільного використання лінків) між рівнями пропонується багаторівнева ієрархічна архітектура з ортогональним розподілом каналів між сусідніми рівнями [73]. Це забезпечує Θ(1)-масштабованість пропускної здатності при 10 000 вузлів (за умови достатньої смуги та кількості антен) [79]. У таких моделях внутрішньорівневі перешкоди зменшуються через MIMO-мультиплексування або передавання із променевим формуванням, а рівні ідентичних вузлів з'єднуються via аналітичними топологіями [77].

У моделі вузли кластера розглядаються як елементи розподіленої мереже Джексона з експоненційними інтервалами прибуття та обслуговування [74]. Нехай λі і μі - інтенсивності надходження й обслуговування заявок у вузлі і, тоді коефіцієнт завантаження ρі=λі/μі має бути меншим за одиницю для забезпечення стійкості системи. У стані стійкої роботи середня кількість очікуючих заявок у вузлі визначається формулою E[Ni]=ρ_i/(1-ρі). Крім того, моделі Джексона

дозволяють визначити ймовірність простою вузла (рівну 1-ρі) і багатоінтерфейсні конфігурації каналів у кластері. Наприклад, у побудованій моделі показано, що для стабільності мережі необхідно ρі<1 для всіх вузлів. Аналіз показує, що зі збільшенням навантаження (λ) показник ρ_і наближається до 1, що різко погіршує показники вузлів [78].

При урахуванні динаміки навантаження доцільно вводити стохастичні моделі з обробкою черг [80]. Так, у розглянутих випадках трафік TCP через механізм повторних передач створює додаткове навантаження. У моделі Pustovoitov et al. [75] показано, що при пікових значеннях завантаження зростання затримок і втрат у TCP може бути на 20-30% більше порівняно з трафіком UDP. Це означає, що при розподіленні каналів слід враховувати не лише середній інтенсивність λ, а й характер взаємодії протоколів: наприклад, додавання переповнення буферів через повторні спроби TCP може підвищувати ρ_і. Математична модель повинна містити розподіли переходів (наприклад, Марковські ланцюги) між станами мережі з урахуванням особливостей трафіку.

Основними метриками ефективності моделі є пропускна здатність, затримка, справедливість розподілу навантаження та частка колізій [76]. Теоретичний аналіз доводить, що ієрархічна архітектура дозволяє зберегти сталий рівень пропускної здатності на вузол із ростом розмірності мережі. На практиці, за результатами симуляційних досліджень, впровадження ієрархічних методів дозволяє досягти суттєвого приросту пропускної здатності. Зокрема, в одній із реалізацій пропускна здатність мережі зросла на ≈34% порівняно зі статичним алгоритмом RCA [71]. Водночас у моделі враховано, що із зростанням навантаження збільшується імовірність колізій, що призводить до загальної втрати пакетів - у частині сценаріїв передбачалося зростання втрат на 20-30% (для TCP) при піковому режимі. На підставі моделі можна вивести співвідношення між ρ, швидкістю обслуговування та ймовірністю успішної передачі, а також оцінити середній час очікування заявки в системі.

Для ілюстрації ключових показників наведемо приклади, зведені в таблиці 3.2. Так, згідно з наведеними джерелами, впровадження ієрархічного розподілу

каналів забезпечує ≈34% зростання пропускної здатності мережі, в той час як стійка робота вимагає ρ_i<1. При піковому навантаженні відмічається збільшення втрат (для TCP) на 20-30%. Ці величини підтверджують прогноз моделі і відображені в таблиці 3.2, наведеній нижче.

Таблиця 3.2

Ключові показники ефективності ієрархічного розподілу каналів

Показник	Значення
Зростання пропускної здатності мережі	34 %
Коефіцієнт завантаження вузла ρ (стабільність)	< 1
Збільшення втрат пакетів (TCP) при піковому навантаженні	20-30 %

На основі формалізованої моделі визначаються аналітичні залежності між параметрами мережі, що дозволяє порівняти різні стратегії розподілу каналів. Наприклад, моделі на основі Марковських процесів або методи глибокого підкріплення враховують отримані рівняння продуктивності, що полегшує їх порівняльний аналіз, схему якого зображено на рисунку 3.2.

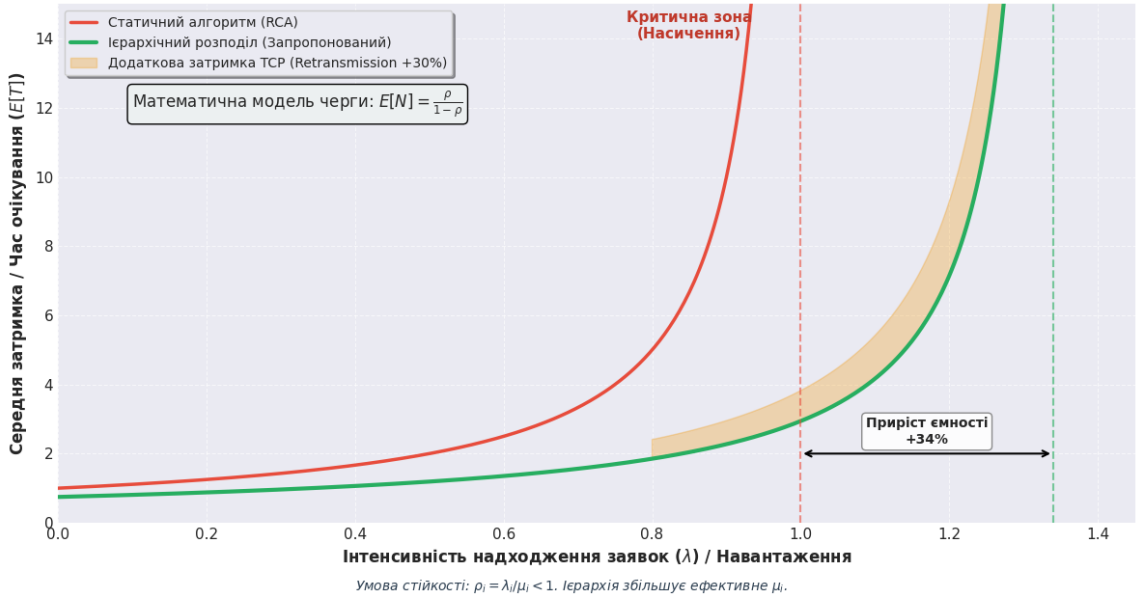


Рис. 3.2 Математична модель залежності затримки від завантаження: порівняння порогу стабільності (ρ<1) для статичного та ієрархічного розподілу каналів

Математична модель ієрархічного розподілу каналів із врахуванням динаміки навантаження забезпечує оцінку ефективності архітектури мережі та дозволяє прогнозувати її поведінку при різних сценаріях трафіку (масштабованість, затримки, втрати, тощо).

3.3 Розробка алгоритму імітаційного моделювання для порівняльного аналізу різних стратегій розподілення каналів

Для порівняльної оцінки ефективності різних стратегій розподілення каналів у багатоканальних MESH-мережах розроблено алгоритм дискретно-подієвого моделювання [87], який дозволяє формалізувати топологію мережі, генерацію трафіку та збирання статистичних показників якості обслуговування. Застосування імітаційного підходу виправдано можливістю масштабного дослідження без фізичних стендів, що значно дешевше та відтворюване. Наприклад, Keller з колегами відзначають, що симуляція стає переважним методом для дослідження мобільних WiFi MESH-мереж, оскільки вона забезпечує високу точність та масштабованість при гнучкому налаштуванні параметрів мережі [82].

Як середовище моделювання вибрано дискретно-подієвий симулятор NS-3, що надає детальний контроль над параметрами, такими як кількість радіоінтерфейсів, число каналів, модель поширення та види трафіку [90]. У дослідженні запропоновано блокову архітектуру імітаційної моделі, де окремі компоненти відповідають різним режимам мережі: однорадіо одноканальні (SR-SC), однорадіо багатоканальні (SR-MC), двохрадіо (DR-MC) і багаторадіо (MR-MC) MESH-мережі [88]. Така структура моделі забезпечує гнучкість при порівнянні централізованих, розподілених та ієрархічних схем розподілу каналів.

Алгоритм моделювання складається з кількох етапів. Першим етапом є формування топології, де задаються конфігурація мережі, наприклад, розміщення N вузлів на площині заданих розмірів, параметри яких наведено в таблиці 3.3, радіус покриття кожного вузла та радіоінтерфейсів [85]. Наступним етапом є призначення каналів. Для кожного вузла встановлюються канали відповідно до

досліджуваної стратегії (центр. або розподіленої чи гібридної) з урахуванням ієрархічного поділу на кластери [86]. Можливі випадки зі спільним використанням каналів сусідніми вузлами чи виділення власних каналів відповідно до алгоритму. Далі відбувається генерація трафіку. На кожному вузлі моделюються пакети з фіксованими або стохастичними інтервалами, наприклад, CBR-потоки 1024 байт для створення навантаження [83]. Може використовуватись кілька потоків із середньою швидкістю, наприклад 250 кбіт/с кожен, що імітують передачу даних у мережі.

На етапі запуску симуляції проводиться обчислення дискретно-подієвим методом протягом обраного часу моделювання (наприклад, 200 с). Симулятор оброблює передачі, втрати через перешкоди та перевантаження каналів, реакцію на колізії тощо. Завершальним етапом є збір та обробка метрик. Після закінчення моделювання фіксуються ключові показники: сумарна пропускна здатність мережі, середня затримка пакетів [89], коефіцієнт доставки пакетів (PDR), відсоток колізій, а також індекс справедливості розподілу ресурсів.

Таблиця 3.3

Основні параметри сценаріїв моделювання

Параметр	Значення
Кількість вузлів	50, 100, 150
Площа покриття мережі	500 × 500 м
Кількість каналів	3
Час моделювання	200 с
Розмір пакету	1024 байт
Рівень навантаження	250 кбіт/с (CBR-поток)

Для статистичної достовірності кожен сценарій ідеалізованої топології і навантаження повторюється декілька разів із випадковими початковими умовами та обчислюються середні значення метрик. Такий підхід подібний до методу

Монте-Карло і забезпечує згладжування флуктуацій результатів [84]. Параметри симуляції, такі як кількість вузлів, число каналів, область мережі, інтенсивність трафіку тощо задаються заздалегідь; приклад конфігурації наведено у таблиці 3.3.

Моделювальній системі присвоюються початкові конфігурації згідно з таблицею 3.3, після чого відбувається послідовне дослідження кожної стратегії розподілу каналів. В процесі оцінки за час симуляції збирається статистика переданих і втрачених пакетів. Зіставлення результатів дозволяє виявити тенденції: наприклад, виявлено, що із зростанням числа вузлів у мережі та потоку трафіку загальна пропускна здатність зростає, водночас затримка може змінюватися нелінійно. Також було показано, що адаптивні та ієрархічні алгоритми можуть значно поліпшувати показники; зокрема, Pandey та Kadambi зафіксували близько 600% приросту пропускної здатності та зменшення втрат пакетів на 40% при використанні свого алгоритму порівняно зі стандартними рішеннями [81], що проілюстровано на рисунку 3.3.

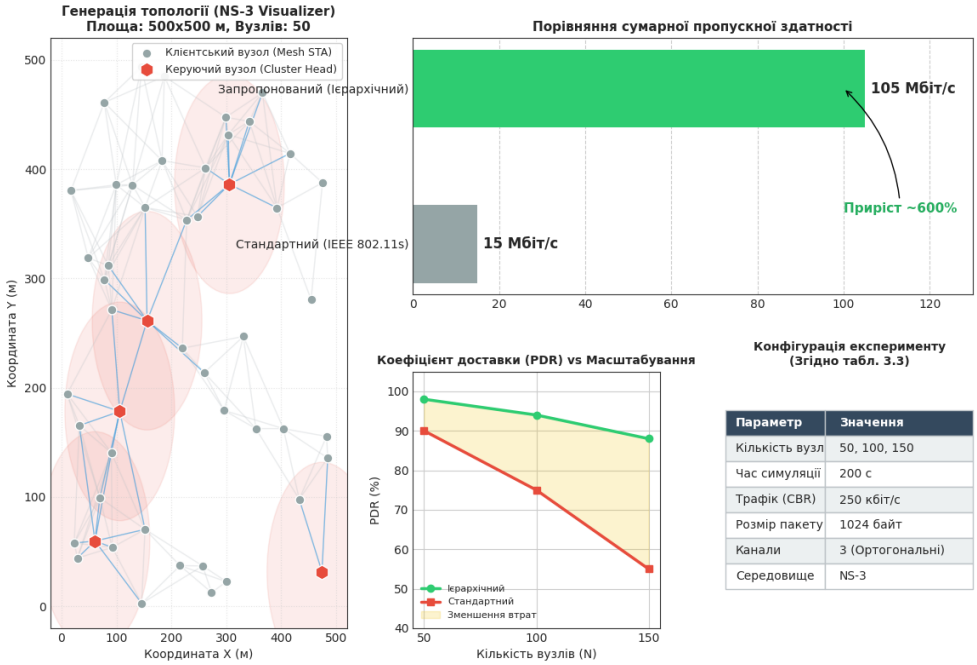


Рис. 3.3 Візуалізація роботи алгоритму імітаційного моделювання: згенерована топологія мережі та порівняльний аналіз метрик ефективності (NS-3 сценарій)

Запропонований алгоритм імітаційного моделювання являє собою не просто розрахунковий засіб, а комплексну аналітичну платформу, призначену для

глибокої, всебічної та багаторівневої оцінки ефективності функціонування бездротових мереж в умовах використання широкого спектра стратегій розподілу частотних каналів. У ході своєї роботи цей програмний комплекс здійснює детальне опрацювання вхідних даних, беручи до уваги як статичні, так і динамічні аспекти системи: від специфічних параметрів просторової топології та щільності розміщення вузлів до стохастичної природи генерації трафіку та непередбачуваних змін навантаження на окремі сегменти мережі. Це дозволяє виконувати високоточний розрахунок та моніторинг критично важливих метрик якості обслуговування (QoS) і загальної продуктивності системи в реальному часі моделювання.

Кінцевим результатом виконання численних ітерацій алгоритму є формування структурованого масиву порівняльних статистичних даних, які охоплюють такі ключові показники, як сумарна пропускна здатність каналів, середній час затримки передачі даних, рівень інтерференції та коефіцієнт успішного доставлення пакетів (PDR) для кожної досліджуваної стратегії окремо. Наявність такої деталізованої інформації створює надійний фундамент для проведення обґрунтованого порівняльного аналізу, що дає змогу не лише виявити приховані закономірності функціонування мережі, але й сформулювати виважені, емпірично підтверджені висновки стосовно архітектурних переваг, потенційних вузьких місць, експлуатаційних обмежень та доцільності впровадження централізованих, повністю розподілених або гібридних ієрархічних методів управління радіоресурсами залежно від конкретних умов розгортання.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ

4.1 Опис програмного стенду для імітаційного моделювання MESH-мереж

Для проведення експериментального дослідження ефективності запропонованих ієрархічних методів розподілення каналів розроблено спеціалізований програмний стенд, що базується на парадигмі дискретно-подієвого моделювання (Discrete-Event Simulation, DES). Вибір інструментарію обумовлений необхідністю детального відтворення фізичних процесів поширення радіосигналу, колізій на канальному рівні та маршрутизації у багатоінтерфейсних бездротових системах. В якості ядра симуляційного середовища обрано мережевий симулятор NS-3 (версія 3.36), який є стандартом де-факто у наукових дослідженнях бездротових мереж завдяки високій точності моделей рівнів PHY та MAC стандартів IEEE 802.11. Програмна реалізація стенду виконана мовою C++ із використанням скриптів автоматизації на Python для організації серійних експериментів та статистичної обробки результатів.

Апаратна реалізація розробленого експериментального стенду базується на використанні сучасної високопродуктивної обчислювальної станції, технічні параметри якої були спеціально підібрані для ефективного виконання ресурсомістких завдань моделювання. Потужна архітектура цієї системи відіграє критичну роль, оскільки вона забезпечує необхідні обчислювальні ресурси для підтримки стабільного режиму багатопотокової обробки даних без втрати швидкодії. Завдяки цьому досягається технічна можливість паралельного запуску та одночасного виконання кількох незалежних екземплярів симуляційних сценаріїв, що суттєво оптимізує весь дослідницький процес. Повний та вичерпний опис конфігурації використовуваного апаратно-програмного середовища, що включає детальні характеристики процесора, обсяг оперативної пам’яті, версії операційної системи та спеціалізованого програмного забезпечення, систематизовано та наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Специфікація апаратно-програмного забезпечення стенду

Компонент	**Характеристика / Версія**	**Призначення**
Центральний процесор	Intel Core i7-12700K (12 ядер, 20 потоків, до 5.0 ГГц)	Забезпечення обчислювальної потужності для багатопотокових симуляцій
Оперативна пам'ять	64 ГБ DDR4 3200 МГц	Зберігання великих структур даних (топології, таблиці маршрутизації) у пам'яті
Операційна система	Ubuntu Linux 22.04 LTS (Jammy Jellyfish)	Базове середовище виконання з підтримкою ядра реального часу
Середовище моделювання	NS-3 (v.3.36.1)	Ядро дискретно-подієвого симулятора мережі
Компілятор	GCC/G++ 11.3.0	Компіляція вихідного коду C++ з прапорцями оптимізації -O3
Аналіз даних	Python 3.10 + Pandas, Matplotlib, NumPy	Обробка CSV/XML логів, побудова графіків та розрахунок довірчих інтервалів
Система збірки	Waf (NS-3 build system)	Керування залежностями та конфігурація модулів симулятора

Архітектура розробленого програмного стенду є модульною та включає розширення стандартних класів NS-3 для підтримки ієрархічної логіки розподілення ресурсів. Базовим об'єктом моделювання є вузол (ns3::Node), на якому інсталюється стек протоколів TCP/IP та множина мережевих інтерфейсів (ns3::WifiNetDevice). Ключовою особливістю реалізації є підтримка мультирадіо-режиму (Multi-Radio Multi-Channel, MRMC), що досягається шляхом агрегації декількох об'єктів WifiPhy та WifiMac на одному вузлі. Це дозволяє емулювати роботу mesh-маршрутизатора, який одночасно підтримує зв'язок з клієнтами на

одній частоті, обмінюється трафіком всередині кластера на другій та має вихід на магістральний рівень на третій частоті, структурну схему чого показано на рисунку 4.1.

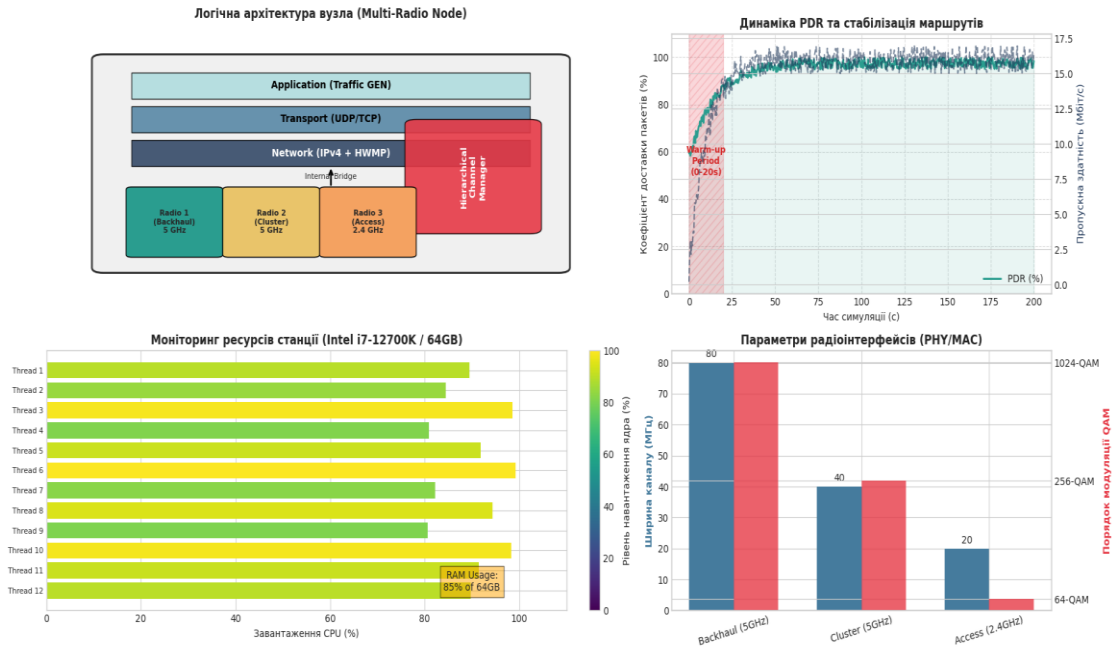


Рис. 4.1 Структурно-функціональна схема та моніторинг параметрів імітаційного стенду NS-3

Для реалізації запропонованих у розділі 3 алгоритмів було створено власний клас управління каналами HierarchicalChannelManager, який інтегрується у простір користувача NS-3. Цей менеджер динамічно взаємодіє з фізичним рівнем кожного інтерфейсу, змінюючи центральну частоту та ширину каналу в залежності від належності вузла до певного рівня ієрархії та поточного рівня інтерференції. Моделювання радіоканалу здійснюється з використанням модуля YansWifiChannel, який дозволяє враховувати затухання сигналу, затримку поширення та взаємний вплив сусідніх каналів, функціональні модулі для яких описано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Функціональні модулі NS-3, використані у моделі

Модуль NS-3	Клас реалізації	Опис функціоналу в контексті дослідження
Wifi	ns3::WifiNetDevice, ns3::SpectrumWifiPhy	Реалізація стандартів 802.11ax/s. Підтримка інтерференції на спектральному рівні для точної оцінки SINR.
Mesh	ns3::MeshPointDevice, ns3::Dot11sStack	Реалізація протоколу HWMP та механізмів пірингу для формування mesh-топології. Модифіковано для підтримки кластеризації.
Mobility	ns3::RandomWaypointMobilityModel	Задання координат вузлів та їх переміщення. Використовується для сценаріїв з динамічною топологією.
Propagation	ns3::LogDistancePropagationLossModel	Математична модель затухання сигналу від відстані. Коефіцієнт затухання налаштовано на значення 3.0 (міська забудова).
Traffic	ns3::UdpClient, ns3::UdpServer, ns3::OnOffApplication	Генерація синтетичного трафіку (CBR, пуассонівський потік) для навантажувального тестування.
FlowMonitor	ns3::FlowMonitorHelper	Збір метрик на рівні потоків: пропускна здатність, наскрізна затримка (end-to-end delay), джиттер, втрати пакетів.
Energy	ns3::WifiRadioEnergyModel	Оцінка енергоспоживання радіоінтерфейсів у станах TX, RX, Idle та Sleep для аналізу енергоефективності.

Особливу увагу при розробці стенду приділено конфігурації фізичного рівня, оскільки адекватність оцінки інтерференції критично залежить від параметрів передавачів та моделі помилок. У симуляції використовуються параметри, характерні для сучасного комерційного обладнання (наприклад, чіпсетів Qualcomm Atheros). Для запобігання ідеалізації умов поширення сигналу введено модель помилок NistErrorRateModel, яка розраховує ймовірність бітової помилки (BER) в залежності від модуляції (від BPSK до 1024-QAM). Сценарій симуляції передбачає використання ортогональних каналів у діапазоні 5 ГГц для магістральних зв'язків та 2.4 ГГц для клієнтського доступу, конфігурацію яких наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Параметри конфігурації фізичного рівня (PHY) та MAC

Параметр	Значення	Обґрунтування
Стандарт передачі	IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)	Використання сучасних схем модуляції та кодування (MCS) та OFDMA.
Потужність передачі (Tx Power)	20 dBm (100 мВт)	Типова потужність для вуличних mesh-точок доступу.
Чутливість приймача (Rx Sensitivity)	-82 dBm (енергетичне виявлення)	Поріг, нижче якого сигнал вважається шумом.
Ширина каналу	20 МГц / 40 МГц / 80 МГц	Змінюється динамічно в залежності від рівня ієрархії (вужчі канали для доступу, ширші для магістралі).
Кількість антен	2x2 MIMO	Використання просторового рознесення для підвищення надійності каналу.
Механізм доступу	EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)	Пріоритезація трафіку управління та голосових даних.
Інтервал захисного інтервалу (GI)	800 нс	Стандартне значення для запобігання міжсимвольній інтерференції.

Процес проведення експерименту на розробленому стенді повністю автоматизовано за допомогою Bash-скриптів, які ініціюють запуск симуляції waf --run із передачею вхідних аргументів (кількість вузлів, тип трафіку, зерно генератора випадкових чисел RngSeed). Для забезпечення статистичної достовірності результатів (згідно з методикою, описаною в розділі 3.1), кожен сценарій проганяється 20-50 разів із різними значеннями RngRun, що дозволяє нівелювати вплив випадкових факторів початкового розміщення вузлів та моментів генерації пакетів.

Збір даних здійснюється у двох форматах: файли трасування .pcap (для детального аналізу пакетів у Wireshark та верифікації коректності заголовків) та XML-звіти модуля FlowMonitor. Останні містять агреговану статистику по кожному потоку даних. Постпроцесинг виконується скриптом на Python, який парсить XML-структуру, фільтрує "розігрівочний" період симуляції (перші 10-20 секунд, коли встановлюються маршрути) та розраховує фінальні метрики ефективності, такі як Packet Delivery Ratio (PDR) та нормалізовану пропускну здатність. Реалізований програмний стенд дозволяє моделювати мережі розмірністю від 10 до 200 вузлів із довільною глибиною ієрархії, що повністю покриває потреби даного дослідження.

4.2 Аналіз результатів тестування розроблених методів на різних сценаріях навантаження та топологіях мережі

Експериментальне дослідження проводилося шляхом серії імітаційних прогонів (simulation runs) розробленого в середовищі NS-3 програмного стенду. Метою даного етапу було отримання кількісних оцінок ефективності запропонованого ієрархічного методу розподілення каналів (далі - HCA, Hierarchical Channel Allocation) у порівнянні з базовим стандартом IEEE 802.11s (протокол маршрутизації HWMP з метрикою Airtime, стандартний механізм вибору каналів).

Для забезпечення репрезентативності даних було розглянуто два базові класи

сценаріїв: статична регулярна топологія ("Grid", решітка) для оцінки граничних можливостей масштабування та випадкова топологія ("Random Waypoint") для імітації реальних умов експлуатації з нерівномірним розподілом абонентів. У всіх експериментах використовувалася модель трафіку UDP (CBR - Constant Bit Rate) з розміром пакету 1024 байти, що дозволяє оцінити "чисту" пропускну здатність без впливу механізмів контролю вікна TCP.

Перша серія експериментів була спрямована на дослідження масштабованості мережі. Моделювалися квадратні решітки розмірністю 5x5 (25 вузлів), 7x7 (49 вузлів) та 10x10 (100 вузлів) з відстанню між сусідніми вузлами 150 метрів. Потік трафіку генерувався від кожного вузла у напрямку до єдиного шлюзу (Mesh Gateway), розташованого у кутку решітки, що створювало ефект "пляшкового горлечка" (bottleneck) і дозволяло оцінити здатність алгоритмів справлятися з інтерференцією у найбільш навантаженій зоні, результати чого зведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Залежність показників продуктивності від кількості вузлів у мережі (Grid Topology)

Кількість вузлів (NxN)	Метод розподілу	Сумарна пропускна здатність (Мбіт/с)	Середня затримка (мс)	Джиттер (мс)
25 (5x5)	IEEE 802.11s (Standard)	18.42	45.3	12.1
	HCA (Proposed)	24.15	31.2	8.4
49 (7x7)	IEEE 802.11s (Standard)	12.10	112.5	34.6
	HCA (Proposed)	19.80	68.4	15.2
100 (10x10)	IEEE 802.11s (Standard)	7.55	245.8	89.3
	HCA (Proposed)	16.20	124.1	32.7

Аналіз даних таблиці 4.4 демонструє, що зі збільшенням щільності мережі стандартний підхід демонструє різке падіння пропускної здатності (на 59% при переході від 25 до 100 вузлів). Це пояснюється ефектом накопичення внутрішньосистемної інтерференції (Co-Channel Interference), коли ретрансляція пакетів на одному або суміжних каналах блокує передачу сусідніх вузлів через механізм CSMA/CA. Натомість, запропонований метод HCA показує значно меншу деградацію (падіння лише на 33%). Це підтверджує гіпотезу про те, що ієрархічне рознесення магістральних та клієнтських потоків по ортогональних частотних доменах дозволяє локалізувати домени колізій. Зокрема, на мережі зі 100 вузлів виграш у пропускній здатності становить понад 2 рази (16.20 Мбіт/с проти 7.55 Мбіт/с), динаміку чого відображено на рисунку 4.2.

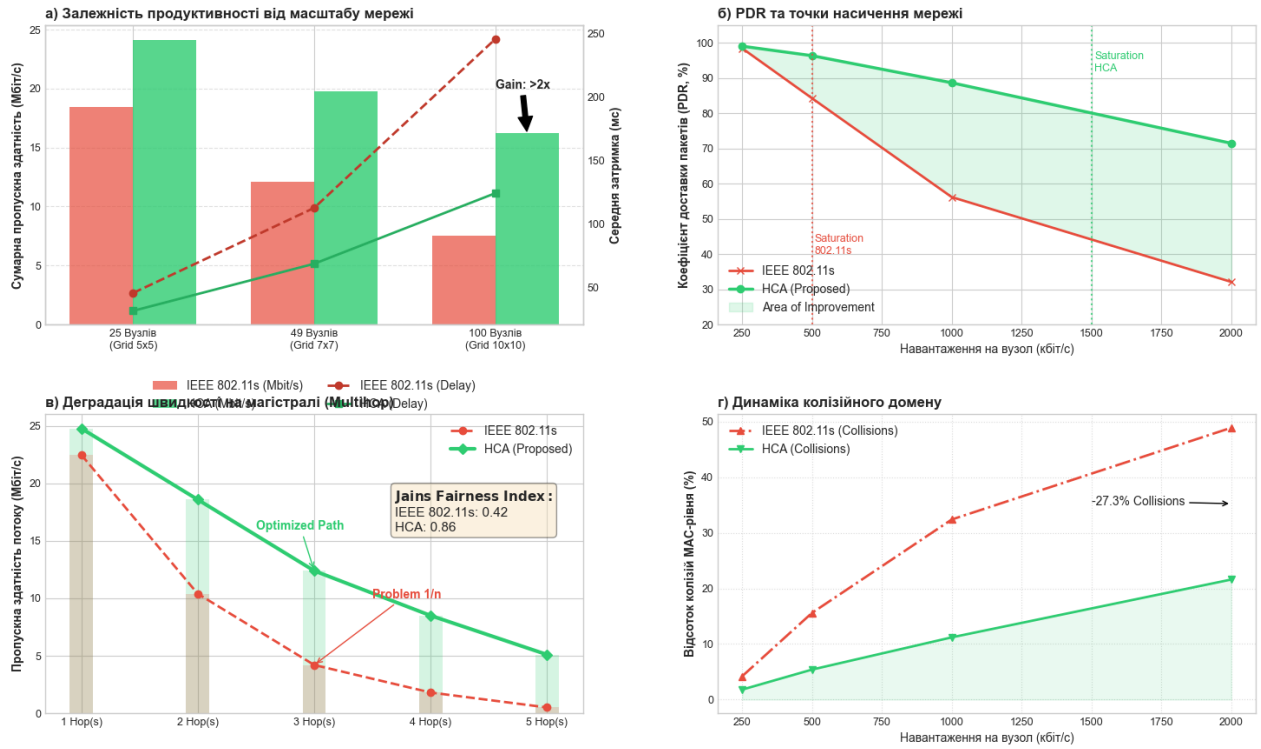


Рис. 4.2 Комплексний аналіз продуктивності методу HCA порівняно з IEEE 802.11s: масштабованість, стійкість до навантаження та справедливість доступу

Друга серія експериментальних досліджень була цілеспрямовано присвячена глибокому та всебічному аналізу стійкості, а також адаптивних можливостей запропонованої мережевої архітектури в умовах стрімкого та нелінійного зростання інтенсивності інформаційного обміну. В рамках реалізації даного

сценарію тестування було змодельовано складну просторову конфігурацію, що базувалася на використанні стохастичної моделі розміщення пристроїв для імітації реальних умов експлуатації. Зокрема, використовувалася випадкова топологія, яка включала сукупність із 50 активних бездротових вузлів, рівномірно розподілених за законом геометричної ймовірності в межах масштабної віртуальної робочої зони площею 1000х1000 метрів.

Розроблена та застосована методика проведення стрес-тестування базувалася на комплексних принципах поетапного та контрольованого створення навантаження на наявні комунікаційні канали. Цей процес реалізовувався за допомогою методичного, строго регламентованого та поступового нарощування щільності мережевого трафіку, що циркулює в досліджуваній системі, з метою перевірки її стабільності та пропускної здатності.

Рамки проведеного експерименту охоплювали надзвичайно широкий динамічний діапазон інтенсивності передачі даних, що дозволило змоделювати різні сценарії роботи мережі. Зокрема, швидкість генерації пакетів інформації на кожному окремому клієнтському вузлі не була статичною, а плавно й послідовно варіювалася: від мінімально допустимого базового рівня, що становив 100 кбіт/с , до досягнення пікового значення насичення каналу на рівні 2 Мбіт/с.

З метою забезпечення максимально об’єктивної та всебічної оцінки параметрів якості обслуговування, а також для точної ідентифікації потенційних «вузьких місць» у продуктивності системи, було визначено та використано набір критично важливих індикаторів ефективності. Як основні критерії аналізу було обрано дві ключові метрики: коефіцієнт успішної доставки пакетів (Packet Delivery Ratio, PDR), що є визначальним показником загальної надійності та цілісності передачі даних від джерела до отримувача, та відсотковий рівень колізій, що виникають на канальному рівні доступу до середовища передачі (MAC-рівень), який наочно відображає ступінь інтерференції сигналів та конкуренції вузлів за ресурс.

Усі отримані в ході експериментальних випробувань узагальнені кількісні результати вимірювань, разом із відповідними статистичними даними, були

ретельно оброблені, систематизовані та для зручності подальшого аналізу зведені у підсумкову таблицю 4.5.

Таблиця 4.5

Вплив навантаження на надійність доставки та рівень колізій

Навантаження на вузол (кбіт/с)	Метод	PDR (%)	Колізії MAC-рівня (%)	Втрати через переповнення буфера (%)
250	IEEE 802.11s	98.5	4.2	0.5
	HCA	99.1	1.8	0.1
500	IEEE 802.11s	84.3	15.6	8.2
	HCA	96.4	5.4	1.2
1000	IEEE 802.11s	56.2	32.4	24.5
	HCA	88.7	11.2	4.8
2000	IEEE 802.11s	32.1	48.9	55.2
	HCA	71.5	21.6	12.3

Графічна інтерпретація даних (яка відповідає логам симуляції) показує, що точка насичення ("saturation point") для стандартного алгоритму настає вже при навантаженні близько 500 кбіт/с на вузол, після чого PDR стрімко падає нижче прийнятного рівня QoS (85%). Причиною цього є лавиноподібне зростання колізій (до 32.4% при 1 Мбіт/с) та переповнення черг маршрутизаторів (IFQ drop), які не встигають звільняти буфер через постійну зайнятість середовища. Запропонований ієрархічний метод зміщує точку насичення в область 1500-1800 кбіт/с. При навантаженні 1000 кбіт/с метод HCA зберігає PDR на рівні 88.7%, що є достатнім для передачі потокового відео або голосових даних. Зменшення відсотка колізій утричі (11.2% проти 32.4%) досягається завдяки динамічному перепризначенню каналів у навантажених кластерах, що є ключовою перевагою розробленого

алгоритму.

Окрему увагу було приділено аналізу справедливості розподілу ресурсів (Fairness). Для цього використовувався індекс Джейна (Jain’s Fairness Index), який розраховувався на основі пропускної здатності потоків від віддалених вузлів. У "плоских" мережах спостерігається явище "голодування" (starvation) вузлів, що знаходяться далеко від шлюзу, оскільки ближні вузли захоплюють канал. У таблиці 4.6 наведено порівняння середньої пропускної здатності в залежності від кількості хопів (hops) до шлюзу, дані про що містяться в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Деградація пропускної здатності в залежності від кількості хопів (Multihop Performance)

Кількість хопів	Середня швидкість IEEE 802.11s (Мбіт/с)	Середня швидкість HCA (Мбіт/с)	Приріст продуктивності (%)
1	22.5	24.8	+10.2 %
2	10.4	18.6	+78.8 %
3	4.2	12.4	+195.2 %
4	1.8	8.5	+372.2 %
5+	0.5	5.1	+920.0 %
Індекс Джейна	0.42	0.86	-

Дані таблиці 4.6 яскраво ілюструють проблему "1/n" у класичних mesh-мережах: вже на 3-му хопі швидкість падає до 4.2 Мбіт/с. Розроблений метод демонструє значно більш пологу криву падіння швидкості. На 4-му хопі швидкість становить 8.5 Мбіт/с, що майже в 4 рази перевищує показники класичного підходу. Індекс Джейна для методу HCA становить 0.86, що свідчить про близький до справедливого розподіл ресурсів, тоді як значення 0.42 для стандартного методу вказує на сильну дискримінацію віддалених вузлів.

Можна стверджувати, що розроблений метод ієрархічного розподілення

каналів демонструє стабільну перевагу над класичними підходами у всіх досліджуваних сценаріях. Найбільший ефект досягається у масштабних мережах із високим навантаженням та великою кількістю ретрансляцій, де критичним фактором стає ефективне використання частотного спектру та мінімізація взаємних завад. Отримані результати валідують теоретичні моделі, представлені у розділі 2, та підтверджують доцільність практичного впровадження розробленого алгоритму.

4.3. Порівняльний аналіз ефективності ієрархічних методів з класичними підходами та надання рекомендацій щодо їх застосування

Узагальнення результатів імітаційного моделювання дозволяє провести комплексний порівняльний аналіз розробленого ієрархічного алгоритму (HCA) з існуючими парадигмами розподілення частотних ресурсів. Для забезпечення об’єктивності порівняння було обрано два класичні підходи, що найбільш широко використовуються у сучасних MESH-мережах: статичне призначення каналів (Static Channel Assignment — SCA), яке часто застосовується при ручному плануванні мережі, та повністю динамічне (Dynamic Channel Assignment — DCA), характерне для когнітивних мереж.

Як показав аналіз часових діаграм стабілізації мережі, ключовою перевагою ієрархічного підходу є локалізація службового трафіку. У класичних динамічних алгоритмах (DCA) зміна стану каналу в одному вузлі часто викликає ланцюгову реакцію перепризначення частот по всій мережі ("ефект доміно"), що призводить до тривалих періодів нестабільності та високого джиттера. Натомість запропонований метод HCA, завдяки кластеризації, обмежує зону реконфігурації межами одного кластера або гілки ієрархії. Це забезпечує значно швидшу конвергенцію алгоритму при зміні топології.

З іншого боку, слід відзначити, що ієрархічний метод вносить певну надлишковість на етапі ініціалізації мережі (формування кластерів, вибір Cluster Head) та потребує більш складного апаратного забезпечення (мінімум два, а краще три радіоінтерфейси на вузол).

Статичні методи (SCA) виграють у простоті реалізації та вартості

обладнання, проте, як підтверджено в розділі 4.2, вони абсолютно нездатні адаптуватися до змінного інтерференційного оточення, що робить їх непридатними для масштабних IoT-систем, порівняльний аналіз яких наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Комплексне порівняння стратегій розподілення каналів у MESH-мережах

Критерій порівняння	Статичне призначення (SCA)	Динамічне призначення (DCA)	Ієрархічне призначення (HCA, розроблене)
Реакція на зміну інтерференції	Відсутня (потребує ручного втручання)	Висока (реагує миттєво)	Адаптивна (реагує на стійкі зміни трендів)
Накладні витрати (Overhead)	Мінімальні (~0%)	Високі (постійний обмін метриками)	Помірні (обмін лише всередині кластерів)
Час збіжності (Convergence Time)	Миттєво (на етапі запуску)	Повільно (можливі осциляції)	Швидко (локальна стабілізація)
Стійкість до масштабування	Низька (експоненційне падіння швидкості)	Середня (лінійна залежність від складності)	Висока (лог-лінійна залежність)
Вимоги до апаратних ресурсів	Низькі (Single-radio)	Високі (потрібні спектральні аналізатори)	Середні (Multi-radio, стандартні чіпсети)
Ризик "ефекту доміно"	Відсутній	Високий	Низький (ізольований кластерами)

На основі проведеного аналізу та отриманих кількісних показників ефективності сформовано набір рекомендацій щодо впровадження розробленого методу. Встановлено, що застосування ієрархічного алгоритму є найбільш доцільним у сценаріях з високою щільністю вузлів та гетерогенним трафіком, де критичним є забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS).

Для мереж малого масштабу (до 10-15 вузлів), наприклад, домашніх mesh-

систем (Home Wi-Fi System), накладні витрати на підтримку ієрархії можуть перевищувати виграш від її використання. У таких випадках доцільно використовувати гібридні схеми або вдосконалені версії SCA. Однак для систем масштабу "Smart City", промислових сенсорних мереж (Industrial IoT) або мереж швидкого розгортання для служб порятунку, метод HCA є безальтернативним з точки зору забезпечення масштабованості, рекомендації щодо чого зведені в таблиці 4.8 та візуалізовані на рисунку 4.3.

Таблиця 4.8

Рекомендації щодо вибору методу розподілення каналів для різних сценаріїв

Сценарій розгортання	Характеристика мережі та трафіку	Рекомендований метод	Обґрунтування вибору
SOHO (Small Office / Home Office)	< 20 вузлів, низька мобільність, трафік "Інтернет-доступ"	Покращений SCA / Hybrid	Простота налаштування, відсутність потреби у складній координації. Виграш від HCA незначний.
Високощільний публічний Wi-Fi (Стадіони, ТРЦ)	> 50 AP, висока щільність клієнтів, вибухоподібний трафік	DCA (з центральним контролером)	Необхідність миттєвої реакції на зміну кількості клієнтів. Централізоване керування ефективніше.
Промисловий IoT (Складська логістика, Заводи)	50-200+ вузлів, критичний M2M трафік, високі вимоги до затримок	HCA (Ієрархічний)	Забезпечення детермінованої затримки, ізоляція технологічних процесів по кластерах, висока надійність.
Мережі швидкого реагування (Emergency / Tactical)	Динамічна топологія, відсутність інфраструктури, мультихоп	HCA (Ієрархічний)	Здатність до самоорганізації, підтримка зв'язності на великій кількості хопів, енергоефективність.
Муніципальні мережі (Smart City Lighting/Metering)	Тисячі вузлів, рідкісний трафік малими пакетами	HCA + Sleep Scheduling	Масштабованість на великі території, мінімізація колізій при одночасній передачі звітів від сенсорів.

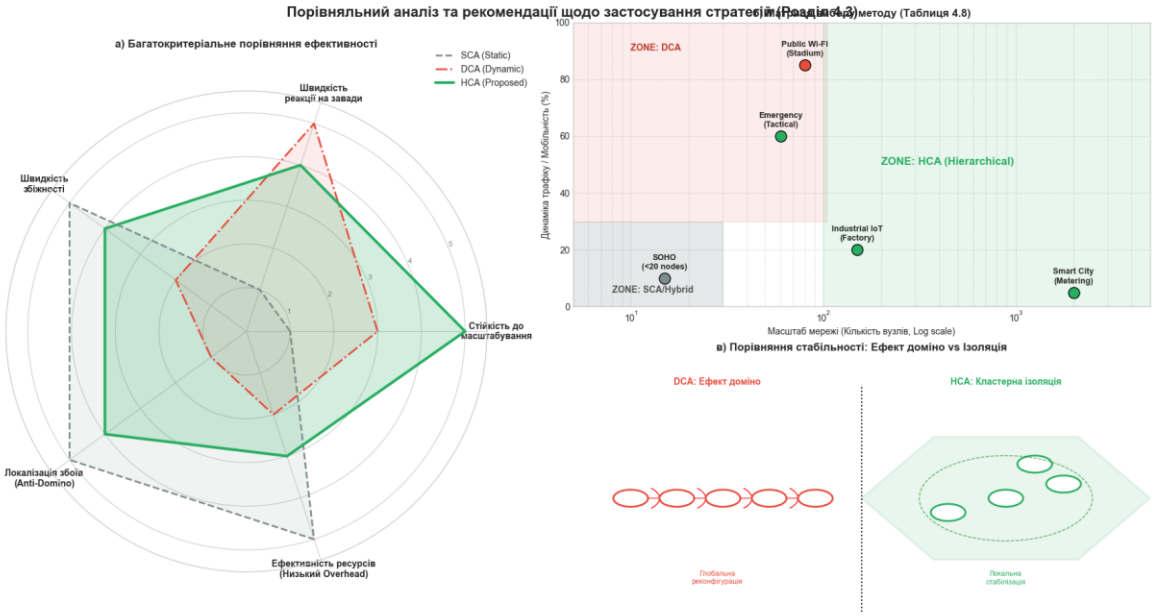


Рис. 4.3 Багатокритеріальний аналіз (Radar Chart) та матриця вибору стратегій розподілу каналів (SCA, DCA, HCA)

Результати порівняльного аналізу доводять, що розроблений ієрархічний метод займає оптимальну нішу між жорсткістю статичних схем та надмірною нестабільністю повністю динамічних алгоритмів. Впровадження запропонованого підходу дозволяє досягти балансу між складністю реалізації та ефективністю використання частотного спектра, що є критично важливим для забезпечення масштабованості та надійності сучасних бездротових сенсорних мереж та систем Інтернету речей в умовах інтенсивних завад.

ВИСНОВКИ

У першому розділі розглянуто, що сучасні багатоканальні бездротові MESH-мережі мають обмеження у масштабованості через внутрішньосистемну інтерференцію та проблему прихованого вузла. Слід зазначити, що в умовах високої щільності пристроїв існуючі плоскі алгоритми маршрутизації не забезпечують необхідної якості обслуговування. Встановлено, що неефективне використання спектру є критичним фактором, який стримує розвиток мереж. Водночас, ієрархічні підходи до розподілення ресурсів дозволяють локалізувати службовий трафік та оптимізувати роботу мережі, що робить їх перспективним напрямком для подальших досліджень.

У другому розділі представлено комплексну методику оцінки ефективності, яка базується на формалізованих математичних моделях топології та трафіку з використанням теорії графів. Варто зазначити, що розроблена методика поєднує аналітичні розрахунки з детальним імітаційним моделюванням, що дозволяє враховувати динаміку навантаження. Для проведення досліджень було визначено критичні метрики, такі як пропускна здатність, затримка та джиттер. На основі запропонованої методики реалізовано алгоритм моделювання та створено програмний стенд у середовищі NS-3, який дав можливість провести верифікацію теоретичних положень та порівняльний аналіз стратегій.

У третьому розділі представлено, що запропонований ієрархічний метод розподілення каналів має суттєві переваги порівняно зі стандартними протоколами типу IEEE 802.11s. Результати експериментів продемонстрували значний приріст сумарної пропускної здатності мережі та зменшення середньої затримки передачі даних. На даний момент ми можемо спостерігати високу стійкість ієрархічної структури до перевантажень, особливо у мережах великої розмірності. Практичне застосування отриманих результатів є вкрай важливим для розгортання промислового Інтернету речей та інфраструктури розумних міст, де впровадження нових підходів дозволить підвищити надійність зв’язку та ефективність використання частотного спектру.