

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МІХНЕНКО ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.75

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ У БЕЗДРОТОВИХ
СІТЧАСТИХ МЕРЕЖАХ**

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Я.О. Міхненко

Науковий керівник: Скулиш Марія Анатоліївна, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Міхненко Я.О. Моделі та метод маршрутизації у бездротових сітчастих мережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2026.

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена стрімким зростанням обсягів передавання даних у бездротових мережах, що супроводжується підвищенням навантаження на мережеву інфраструктуру, обмеженістю доступного радіочастотного спектра та постійним зростанням вимог до якості обслуговування (QoS) у сучасних і перспективних телекомунікаційних системах. Особливої гостроти ці проблеми набувають у когнітивних бездротових сітчастих мережах (CR-WMN), які характеризуються динамічною зміною доступності спектра, необхідністю врахування активності первинних користувачів (PU), а також значним впливом внутрішньосистемних і міжканальних інтерференцій. У таких умовах класичні підходи до маршрутизації, що базуються переважно на статичних або напівдинамічних метриках, виявляються недостатньо ефективними, оскільки не враховують специфіку когнітивного радіосередовища. Це призводить до зниження пропускної здатності, зростання затримок та погіршення стабільності маршрутів. Таким чином, виникає об'єктивна необхідність у розробці нових, QoS-орієнтованих і спектрально-обізнаних методів маршрутизації, здатних адаптуватися до швидкоплинних змін мережевого та спектрального середовища.

Метою дисертаційної роботи є підвищення якості обслуговування в когнітивних бездротових сітчастих мережах шляхом розробки, математичного обґрунтування та експериментального дослідження модифікованого методу маршрутизації, який здатний комплексно враховувати динамічну доступність спектральних ресурсів, інтерференційні впливи між вузлами та каналами, а також вимоги різних класів мережевого трафіку (зокрема, чутливого до

затримок або втрат). Досягнення поставленої мети передбачає вирішення ряду взаємопов'язаних задач, серед яких формалізація процесу маршрутизації як багатокритеріальної оптимізації, розробка нового методу маршрутизації та створення ефективних алгоритмів його обчислення та застосування в реальному часі.

У дисертації сформульовано задачу маршрутизації в CR-WMN як багатокритеріальну оптимізаційну задачу з QoS-обмеженнями, де одночасно враховуються показники затримки, пропускної здатності, надійності каналів, рівня інтерференції та доступності спектра. Запропоновано модифіковану метрику маршрутизації mWCETT, яка є подальшим розвитком класичної метрики WCETT і розширює її функціональні можливості за рахунок інтеграції додаткових параметрів, зокрема витрати на перемикання каналів, оцінки інтерференції між суміжними каналами та показників доступності спектра в умовах присутності первинних користувачів, тобто поєднує оцінювання часу передачі даних, інтерференції, доступності та надійності спектра в одному показнику. На відміну від традиційного підходу, запропонована метрика інтегрується в протокол маршрутизації на основі AODV, що дозволяє реалізувати адаптивний вибір маршрутів з урахуванням динамічних змін радіосередовища.

Модифікація протоколу AODV полягає у вдосконаленні процедур виявлення та підтримки маршрутів шляхом включення значень метрики mWCETT у службові повідомлення (RREQ, RREP), а також у зміні механізму вибору оптимального маршруту на основі багатокритеріального оцінювання. Це забезпечує більш точне відображення стану мережі під час встановлення маршруту та дозволяє уникати перевантажених, інтерференційно-насичених або спектрально нестабільних ділянок мережі.

Метод mWCETT забезпечує узагальнене оцінювання вартості маршруту як інтегрального показника, що дозволяє більш точно відображати реальний стан мережі. У роботі побудовано математичну модель запропонованого методу, яка описує процес формування маршрутів із урахуванням

накопичення метрики вздовж шляху, а також онтологічну модель, що формалізує взаємозв'язки між параметрами різних рівнів мережевої архітектури (фізичного, каналного та мережевого). На основі цих моделей розроблено алгоритм обчислення складових метрики (зокрема $S(P)$, $I(P)$, $A(P)$) та їх агрегації в процесі маршрутизації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці комплексного методу побудови QoS-орієнтованої маршрутизації для когнітивних бездротових сітчастих мереж, який поєднує модифікований протокол AODV із багатокритеріальною метрикою mWCETT, що, на відміну від існуючих підходів, реалізується на основі модифікованого протоколу AODV із інтеграцією багатокритеріальної метрики в процеси встановлення та підтримки маршрутів який відрізняється від існуючих рішень інтегрованими урахуванням динаміки спектрального середовища, інтерференційних впливів як у межах одного каналу, так і між суміжними каналами, а також різнорідних вимог мережевого трафіку. Запропонований метод дозволяє підвищити точність оцінювання маршрутів і, як наслідок, забезпечити зростання наскрізної пропускної здатності, зменшення затримок та підвищення стабільності маршрутів у динамічних умовах. Удосконалено математичну модель маршрутизації шляхом формалізації задачі вибору маршруту як задачі багатокритеріальної оптимізації з урахуванням QoS-обмежень, що дозволяє отримувати оптимальні або квазіоптимальні рішення в умовах неповної та змінної інформації про стан мережі. Подальшого розвитку набули міжрівневі та онтологічні підходи до прийняття маршрутних рішень, які, на відміну від традиційних методів, інтегрують знання про стан різних рівнів мережі та забезпечують адаптивну реакцію на зміни топології, навантаження та спектральної ситуації, що у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності використання радіоресурсів і загальної продуктивності CR-WMN.

Експериментальні дослідження виконано в середовищі імітаційного моделювання Python із використанням когнітивного розширення CRCN, що дозволило адекватно відтворити динамічні умови функціонування

когнітивних мереж, включаючи появу та зникнення первинних користувачів, зміну доступності каналів і вплив інтерференції. Проведено комплексний порівняльний аналіз запропонованого методу маршрутизації з базовими протоколами (зокрема WCETT та його похідними) за ключовими показниками QoS, такими як наскрізна пропускна здатність, середня затримка пакетів, коефіцієнт доставки пакетів (PDR), варіація затримки (jitter) та накладні витрати маршрутизації. Результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу в умовах динамічного спектрального середовища. Зокрема, встановлено підвищення середньої продуктивності мережі на 34%, збільшення наскрізної пропускної здатності на 10,5% та зростання коефіцієнта доставки пакета на 11,5% при використанні методу mWCETT порівняно з класичним WCETT. Отримані результати свідчать про здатність запропонованого методу забезпечувати більш стабільну та ефективну передачу даних у складних умовах когнітивного радіосередовища.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості застосування розробленого методу маршрутизації при проектуванні, аналізі та оптимізації когнітивних бездротових сітчастих мереж, а також у гетерогенних мережах нового покоління (5G/6G) та системах Інтернету речей (IoT), де критично важливим є ефективне використання спектральних ресурсів і забезпечення гарантованого рівня якості обслуговування. Запропоновані моделі та алгоритми можуть бути використані як основа для подальших досліджень у напрямі інтелектуалізації мереж, впровадження адаптивних протоколів маршрутизації та розвитку когнітивних телекомунікаційних систем.

Ключові слова: КОГНІТИВНЕ РАДІО, БЕЗДРОТОВІ СІТЧАСТІ МЕРЕЖІ, МАРШРУТИЗАЦІЯ, МОБІЛЬНА МЕРЕЖА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ, 5G/6G, ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ, AODV, DYMO, WCETT, mWCETT, IoT, QoS.

ABSTRACT

Mikhnenko Y.O. Models and Routing Method in Wireless Mesh Networks. – Qualification scientific work on manuscript rights.

Thesis for graduation scientific degree of Philosophy Doctor by speciality 172 – Telecommunications and radio engineering. – Educational and Scientific Institute of Telecommunication Systems of KPI named after Igor Sikorsky, Kyiv, 2026.

The relevance of the dissertation topic is driven by the rapid growth of data transmission volumes in wireless networks, which is accompanied by increased load on network infrastructure, limited availability of radio frequency spectrum, and continuously rising requirements for Quality of Service (QoS) in modern and future telecommunication systems. These challenges become particularly acute in cognitive wireless mesh networks (CR-WMN), which are characterized by dynamic spectrum availability, the necessity to account for primary user (PU) activity, and significant impact on intra-system and inter-channel interference. Under such conditions, classical routing approaches based primarily on static or semi-dynamic metrics prove to be insufficiently effective, as they do not consider the specifics of the cognitive radio environment. This results in reduced throughput, increased delays, and decreased route stability. Therefore, there is an objective need to develop new QoS-oriented and spectrum-aware routing methods capable of adapting to rapid changes in both network and spectrum environments.

The aim of the dissertation is to improve the Quality of Service in cognitive wireless mesh networks by developing, mathematically substantiating, and experimentally validating a modified routing method capable of comprehensively accounting for dynamic spectrum availability, interference effects between nodes and channels, as well as the requirements of different classes of network traffic (particularly delay- and loss-sensitive traffic). Achieving this goal involves solving a set of interrelated tasks, including formalization of the routing process as a multi-criteria optimization problem, development of a new routing method, and creation of efficient algorithms for its computation and real-time application.

In the dissertation, the routing problem in CR-WMN is formulated as a multi-criteria optimization problem with QoS constraints, where delay, throughput, channel reliability, interference level, and spectrum availability are simultaneously considered. A modified routing metric, mWCETT, is proposed as an extension of the classical WCETT metric, enhancing its functionality through integration of additional parameters, including channel switching cost, inter-channel interference estimation, and spectrum availability indicators under the presence of primary users. Thus, the proposed metric combines the evaluation of transmission time, interference, availability and spectrum reliability into a single indicator. Unlike the traditional approach, the proposed metric is integrated into an AODV-based routing protocol, enabling adaptive route selection considering dynamic changes in the radio environment.

The modification of the AODV protocol involves improving route discovery and maintenance procedures by incorporating mWCETT metric values into control messages (RREQ, RREP), as well as modifying the route selection mechanism based on multi-criteria evaluation. This ensures a more accurate representation of the network state during route establishment and allows avoidance of congested, interference-prone, or spectrally unstable network segments,

The mWCETT method provides a generalized evaluation of route cost as an integral indicator, enabling a more accurate representation of the actual network state. A mathematical model of the proposed method is developed, describing the route formation process considering metric accumulation along the path, as well as an ontological model that formalizes relationships between parameters at different layers of the network architecture (physical, data link, and network layers). Based on these models, algorithms for calculating metric components (in particular $S(P)$, $I(P)$, $A(P)$) and their aggregation during routing are developed.

The scientific novelty of the obtained results lies in the development of a comprehensive method to QoS-oriented routing in cognitive wireless mesh networks, which combines a modified AODV protocol with a multi-criteria mWCETT metric. Unlike existing approaches, the proposed method integrates the

multi-criteria metric directly into route discovery and maintenance processes and accounts for the dynamics of the spectral environment, interference effects both within a single channel and between adjacent channels, as well as heterogeneous traffic requirements. The proposed method improves the accuracy of route evaluation and, consequently, ensures increased end-to-end throughput, reduced delay, and enhanced route stability under dynamic conditions. The mathematical routing model has been improved by formalizing the route selection problem as a multi-criteria optimization problem with QoS constraints, enabling optimal or near-optimal solutions under incomplete and dynamic network state information. Further development has been achieved in cross-layer and ontological approaches to routing decision-making, which, unlike traditional methods, integrate knowledge about different network layers and ensure adaptive response to changes in topology, load, and spectral conditions, thereby improving the efficiency of radio resource utilization and overall CR-WMN performance.

Experimental studies were conducted in a simulation environment based on Python using the CRCN cognitive extension, which enabled accurate reproduction of dynamic cognitive network conditions, including the appearance and disappearance of primary users, changes in channel availability, and interference effects. A comprehensive comparative analysis of the proposed routing method with baseline protocols (including WCETT and its derivatives) was performed using key QoS metrics such as end-to-end throughput, average packet delay, packet delivery ratio (PDR), jitter, and routing overhead. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed approach under dynamic spectral conditions. In particular, an increase in overall network performance by 34%, an improvement in end-to-end throughput by 10,5%, and an increase in packet delivery ratio by 11,5% were observed when using the mWCETT method compared to classical WCETT. These results demonstrate the capability of the proposed method to provide more stable and efficient data transmission in complex cognitive radio environments.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the developed routing method in the design, analysis and optimization of

cognitive wireless mesh networks, as well as in next-generation heterogeneous networks (5G/6G) and Internet of Things (IoT) systems, where efficient spectrum utilization and guaranteed QoS are critically important. The proposed models and algorithms can serve as a foundation for further research in network intelligence, development of adaptive routing protocols, and advancement of cognitive telecommunication systems.

Keywords: COGNITIVE RADIO, WIRELESS MESH NETWORKS, ROUTING, MOBILE NETWORK, TELECOMMUNICATION, 5G/6G, QUALITY OF SERVICE, AODV, DYMO, WCETT, mWCETT, IoT, QoS.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Міхненко Я.О., Кононова І.В.(2023). «Аналіз якості обслуговування в безпроводових мережах з кількома стрибками». Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». С.170-176. ISSN 2219-9365. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-23>

Особистий внесок Міхненко Я.О. – проведено аналіз показників якості обслуговування в бездротових мережах з кількома стрибками, результати якого використано при формуванні математичної моделі системи маршрутизації та методу QoS-орієнтованої маршрутизації когнітивних бездротових сітчастих мережах.

Особистий внесок Кононова І.В. – здійснено наукове керівництво дослідженням, сформовано напрямки та методологію аналізу показників якості обслуговування, надано рекомендації щодо інтерпретації результатів дослідження.

2. Міхненко Я.О. «Аналіз якості обслуговування в програмно-визначених мережах». Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Том 36 (75) № 1 2025. С. 73-78. ISSN 2663-5941. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/11>

Особистий внесок Міхненко Я.О. – досліджено механізми забезпечення якості обслуговування програмно-визначених мережах та обґрунтовано підходи до міжрівневої взаємодії, які були використані при розробленні онтологічної моделі процесу маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах.

3. Міхненко Я.О., Кононова І.В. «Метод підвищення оцінювання продуктивності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж». Хмельницький національний університет (Україна). Том 355 № 4 (2025).

C.395-403. ISSN 2307-5732. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-56>

Особистий внесок Міхненко Я.О. – запропоновано системний підхід до оцінювання параметрів мережевої продуктивності та наведено розрахункові співвідношення для визначення часу передачі пакетів і бітрейту корисного навантаження, що використано при розробленні математичної моделі системи маршрутизації та методу QoS-орієнтованої маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах.

Особистий внесок Кононова І.В. – визначено методологію дослідження, здійснено наукове керівництво та узагальнення отриманих результатів.

4. Міхненко Я.О. «Аналіз шляхів підвищення якості послуг для багатокористувацького середовища в когнітивній радіомережі». Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2025. С. 67-73. ISSN 2663-5941 (Print), ISSN 2663-595X (Online). DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/11>

Особистий внесок Міхненко Я.О. – досліджено застосування технології когнітивного радіо для оптимізації використання радіочастотного спектру та забезпечення QoS у багатокористувацькому середовищі, що стало основою для розроблення онтологічної моделі процесу маршрутизації та методу QoS-орієнтованої маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах.

5. І.В. Кононова, Я.О. Міхненко. «Аналіз якості обслуговування в бездротових сітчастих мережах», XIX Міжнародна наукова конференція ХНУПС ім. Івана Кожедуба, квітень, 2023, Харків. С. 331-332.

Особистий внесок Міхненко Я.О. – проведено аналіз показників якості обслуговування в бездротових сітчастих мережах, виконано дослідження основних параметрів QoS та їх впливу на ефективність функціонування мережі, підготовлено матеріали та сформульовано висновки дослідження.

Особистий внесок Кононова І.В. – сформовано методологію дослідження, здійснено наукове керівництво та редагування матеріалів публікації.

6. Я.О. Міхненко, І.В. Кононова. «Рішення для усунення синхронізації в безпроводових датчиках», Матеріали VII науково-практичної конференції курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених «Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем», червень, 2024, Київ. УДК 621. С. 223.

Особистий внесок Міхненко Я.О. – проведено аналіз проблем синхронізації в безпроводових сенсорних мережах та запропоновано підхід до їх усунення для підвищення ефективності функціонування мережі.

Особистий внесок Кононова І.В. – визначено методологію дослідження, здійснено наукове керівництво роботою.

7. Я.О. Міхненко, І.В. Кононова. «Оптимізація передачі даних у багатокористувацьких когнітивних мережах», Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів», листопад, 2025, Київ-Тернопіль-Краків. УДК 621. С.267.

Особистий внесок Міхненко Я.О. – проведено дослідження та запропоновано підхід до оптимізації передачі даних у багатокористувацьких когнітивних мережах.

Особистий внесок Кононова І.В. – здійснено наукове керівництво та узагальнення результатів дослідження.

8. Я.О. Міхненко, І.В. Кононова. «Оцінка ефективності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж», Матеріали VIII науково-практичної конференції курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених «Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем», червень, 2025, Київ. УДК 621. С. 360.

Особистий внесок Міхненко Я.О. – виконано оцінювання ефективності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж та аналіз відповідних показників.

Особистий внесок Кононова І.В. – здійснено наукове керівництво та узагальнення результатів дослідження.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	1
ABSTRACT	5
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	9
ЗМІСТ	12
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1.	24
АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
1.1 Технологія когнітивного радіо	25
1.2 Інтеграція CR-WMN із SDN	28
1.3 Якість обслуговування в SDN	31
1.3.1 Основні терміни та визначення	33
1.3.2 Потенційні проблеми SDN.....	35
1.3.3 Методи поліпшення QoS в SDN	37
1.3.4 Проблеми впровадження QoS в SDN.....	39
1.4 Класифікація бездротових сітчастих мереж	41
1.4.1 Класифікація за архітектурою	42
1.4.2 Класифікація за рівнем інтелектуальності мережі	42
1.5 Існуючі підходи до забезпечення QoS у WMN	43
1.6 Аналіз існуючих протоколів маршрутизації	46
1.6.1 Порівняльний аналіз протоколів AOMDV, DSR та AODV	46
1.6.2 Порівняльний аналіз протоколів AODV і WCETT	53
1.6.2.1 Характеристика протоколу AODV	53
1.6.2.2 Характеристика метрики WCETT	56
1.6.2.3 Порівняння архітектурних підходів	58
1.6.2.4 Придатність до когнітивного радіо	59

1.6.2.5 Порівняльний аналіз ефективності.....	60
Висновки за розділом 1	61
РОЗДІЛ 2.	62
ОНТОЛОГІЧНА І МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛІ МАРШРУТИЗАЦІЇ У КОГНІТИВНИХ БЕЗДРОТОВИХ СІТЧАСТИХ МЕРЕЖАХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	62
2.1 Постановка задачі маршрутизації з урахуванням QoS.....	62
2.2 Онтологічна модель метрики mWCETT у процесі маршрутизації CR- WMN66	
2.2.1 Формальна модель онтології	67
2.2.2 Структура онтологічної моделі	67
2.2.3 Відображення онтології на формулу mWCETT	73
2.2.4 Обмеження онтологічної моделі	74
2.2.5 Правила виводу та їх вплив на структуру метрики.....	75
2.2.6 Алгоритм процесу маршрутизації на основі онтології mWCETT ..	75
2.2.7 Граф-схема онтологічної моделі	76
2.3 Математична модель модифікованого протоколу маршрутизації	78
2.3.1 Вхідні параметри мережі.....	80
2.3.2 Математичне формулювання задачі	81
2.3.3 Модель мережі та позначення	82
2.3.4 Класична WCETT.....	83
2.3.5 Розширена метрика mWCETT	83
2.3.6 Узагальнення з QoS-обмеженнями	86
2.3.7 Представлення задачі як цілочисельної лінійної задачі (ILP).....	87
2.3.8 Алгоритм обчислення оптимального шляху для mWCETT	88
2.3.9 Формальні властивості mWCETT	89

2.3.10	Рекомендації щодо реалізації та налаштування ваг	90
2.4	Алгоритм роботи протоколу	90
2.4.1	Підготовка та локальні обчислення на кожному вузлі	90
2.4.2	Виявлення маршруту (RREQ/RREP – розширений AODV).....	91
2.4.3	Підтримка маршруту – обробка змін спектру.....	92
2.4.4	Візуалізація псевдокоду та алгоритму роботи протоколу	92
2.4.5	Блок схема алгоритму.....	93
	Висновки за розділом 2	101
	РОЗДІЛ 3.	103
	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	103
3.1.1	Опис середовища моделювання.....	103
3.1.1	Версія симулятора та необхідні розширення	103
3.1.2	Архітектура моделі мережі	104
3.1.3	Фізичний рівень, MAC та моделі поширення.....	105
3.1.4	Трафік, генерація навантаження та сценарії	106
3.1.5	Метрики продуктивності та збір результатів.....	106
3.1.6	Реалізаційні деталі для mWCETT у NS-2	107
3.1.7	Параметри симуляції (приклад конфігурації).....	108
3.1.8	Обмеження середовища моделювання та можливі похибки.....	108
3.2	Проведення серії експериментів	109
3.3	Аналіз отриманих результатів.....	111
3.4	Модель оцінки якості	128
3.4.1	Визначення метрик оцінки якості	128
3.4.2	Приклад обчислення оцінки якості обслуговування.....	131
3.5	Висновки моделювання та обчислення.....	134

Висновки за розділом 3	136
РОЗДІЛ 4.	138
ПРАКТИЧНІ ІНТЕГРАЦІЇ У РЕАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	138
4.1 Можливість інтеграції у реальні системи	138
4.1.1 Архітектурні підходи для реальної інтеграції	138
4.1.2 Інтерфейс вимірювань та частота оновлення метрик	141
4.1.3 Оцінка продуктивності й процедура вимірювань	143
4.2 Пропозиції щодо використання у 5G/6G, IoT мережах.....	145
4.3 Практичні рекомендації інтеграції в існуючу інфраструктуру	148
4.3.1 Аналіз апаратної підтримки.....	148
4.3.2 Розширення стеку програмного забезпечення.....	149
4.3.3 Призначення каналів та їх координація.....	150
4.3.4 QoS-політики та міжрівнева взаємодія.....	151
Висновки за розділом 4	153
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	158
ДОДАТКИ.....	171
Додаток А.....	171
Додаток Б.	175

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AODV Ad hoc On-Demand Distance Vector

CCC Common Control Channel

CR Cognitive Radio

CR-WMN Cognitive Radio Wireless Mesh Networks

ETT Expected Transmission Time

ETX Очікувана кількість передач

LAL Localizability Aided Localization)

PDR Коефіцієнт доставки пакетів

PU Primary Users

QoS Quality of Service (якість обслуговування)

RREQ Пакети запиту маршруту

RREP Відповіді на маршрут

SU Secondary Users

WCETT Weighted Cumulative Expected Transmission Time

WMN Wireless Mesh Networks

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток бездротових технологій зв'язку, поява великої кількості мобільних пристроїв та сервісів з жорсткими вимогами до якості обслуговування зумовили зростання складності сучасних телекомунікаційних мереж. Особливої актуальності набувають бездротові сітчасті мережі (Wireless Mesh Network, WMN), які завдяки своїй самоорганізованості, масштабованості та відмовостійкості широко застосовуються в міських інфраструктурах, промислових системах, системах екстреного зв'язку та мережах доступу нового покоління. Водночас обмеженість радіочастотного ресурсу та нерівномірне використання спектра стимулювали розвиток концепції когнітивного радіо, що дозволяє вторинним користувачам динамічно отримувати доступ до вільних спектральних ділянок без порушення роботи первинних користувачів.

Поєднання сітчастої архітектури з когнітивними радіотехнологіями формує клас когнітивних бездротових сітчастих мереж (Cognitive Radio Wireless Mesh Networks, CR-WMN), які характеризуються високою динамікою спектрального середовища, складними інтерференційними взаємодіями та необхідністю забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS). У таких умовах традиційні протоколи маршрутизації та класичні метрики вибору маршрутів (hop-count, ETX, ETT, WCETT) виявляються недостатньо ефективними, оскільки не враховують доступність спектра, ризик витіснення первинними користувачами, міжканальну та міжпотоківу інтерференцію, а також диференційовані вимоги різних класів трафіку. Це зумовлює актуальність наукових досліджень, спрямованих на розробку нових або модифікованих методів маршрутизації, адаптованих до когнітивних і багатоканальних бездротових середовищ. Таким чином, виникає науково-практична проблема забезпечення ефективної QoS-орієнтованої маршрутизації в CR-WMN в умовах динамічної зміни спектрального середовища, інтерференційних впливів та обмеженого радіочастотного

ресурсу, розв'язання якої потребує розробки нових моделей і методів маршрутизації з урахуванням когнітивних параметрів мережі.

Актуальність теми також підсилюється еволюцією мереж 5G/6G та масовими впровадженнями Інтернету речей (IoT), де одночасно висуваються вимоги до ультранизької затримки, високої пропускної здатності, енергоефективності та надійності передачі даних. У таких гетерогенних мережах маршрутизаційні рішення мають бути контекстно-чутливими, багатовимірними та тісно інтегрованими з механізмами керування спектром і QoS, що додатково підтверджує доцільність обраного напрямку досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом наукових досліджень кафедри Інформаційних технологій в телекомунікаціях Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем:

- в рамках ініціативної теми НДР 0124U001559 «Технології Інтернету речей для розумного будинку та розумного міста».
- в рамках держбюджетної теми ПТАХА (державний реєстраційний номер 0126U000022g).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості обслуговування в когнітивних бездротових сітчастих мережах шляхом розробки та дослідження модифікованого методу маршрутизації, здатного враховувати динамічну доступність спектра, інтерференційні впливи та вимоги QoS різних типів трафіку.

Для досягнення поставленої мети в роботі було поставлено та вирішено такі задачі:

1. Проведення комплексного аналізу сучасних підходів до маршрутизації в бездротових сітчастих та когнітивних мережах, включаючи протоколи маршрутизації, метрики вибору маршрутів та механізми забезпечення якості обслуговування, з метою виявлення їх обмежень за умов динамічної доступності спектра та інтерференційних впливів.

2. Побудова онтологічної моделі процесу маршрутизації, що формалізує взаємозв'язки між параметрами різних рівнів мережевої архітектури та забезпечує інтеграцію знань про стан мережі для прийняття ефективних маршрутних рішень.

3. Розробка математичної моделі маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах як багатокритеріальної оптимізаційної задачі з QoS-обмеженнями та на її основі сформулювати узагальнену метрику маршрутизації mWCETT, яка враховує затримку передачі, інтерференцію, доступність та надійність спектральних ресурсів.

4. Розробка методу QoS-орієнтованої маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах на основі модифікованого протоколу AODV із використанням метрики mWCETT, що забезпечує адаптивний вибір маршрутів в умовах динамічного спектрального середовища.

5. Апробація запропонованих рішень шляхом імітаційного моделювання, оцінювання їх ефективності за ключовими показниками якості обслуговування та розробка практичних рекомендацій щодо застосування запропонованого методу в когнітивних, багатоканальних та гетерогенних мережах, зокрема в системах 5G/6G та Інтернету речей.

Об'єкт дослідження – Процеси маршрутизації та забезпечення якості обслуговування в когнітивних бездротових сітчастих мережах телекомунікаційних систем.

Предмет дослідження – Моделі та метод маршрутизації у когнітивних бездротових сітчастих мережах телекомунікаційних систем і алгоритми та метрики маршрутизації в CR-WMN з урахуванням динамічної доступності спектра, інтерференційних впливів і QoS-вимог.

Методи дослідження, застосовані для вирішення поставлених задач:

1. Методи теорії графів і оптимізації для формалізації задач маршрутизації.

2. Ймовірносні та статистичні методи для оцінювання надійності каналів і доступності спектра.

3. Моделі теорії масового обслуговування для аналізу затримок.
4. Методи імітаційного моделювання для дослідження поведінки мережі в різних сценаріях з використанням симулятора Python з когнітивним розширенням CRCN.
5. Порівняльний аналіз та статичну обробку результатів для оцінювання ефективності запропонованого методу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Запропоновано онтологічну модель процесу маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах телекомунікаційних систем, яка, на відміну від відомих, базується на використанні міжрівневої взаємодії шляхом формалізації взаємозв'язків між параметрами фізичного, каналного та мережевого рівнів включаючи показники якості каналу, рівень інтерференції та доступність спектра. Це забезпечує інтеграцію знань про стан мережі та створює передумови для адаптивного прийняття маршрутних рішень з підвищеною ефективністю використання радіоресурсів. Набули подальшого розвитку підходи щодо формалізації процесу маршрутизації, які, на відміну від існуючих, враховують когнітивні параметри спектрального середовища та забезпечують узгодження рішень між рівнями мережевої архітектури.

2. Розроблено математичну модель системи маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах телекомунікаційних систем, що ґрунтується на представленні процесу вибору маршруту як задачі багатокритеріальної оптимізації з QoS-обмеженнями та інтегрованим урахуванням затримки передачі, інтерференційних впливів і доступності спектральних ресурсів. Це дозволяє підвищити ефективність прийняття маршрутних рішень в умовах динамічного радіосередовища та забезпечити отримання оптимальних або квазіоптимальних маршрутів у реальному часі. Набули подальшого розвитку підходи щодо формалізації процесу вибору маршруту, які, на відміну від класичних моделей, враховують динамічну змінність спектра та багатокритеріальний характер оцінювання.

3. Розроблений метод QoS-орієнтованої маршрутизації в когнітивних бездротових сітчастих мережах, що відрізняється від відомих урахуванням когнітивних факторів у процесі формування та підтримки маршрутів, який за рахунок інтеграції багатокритеріальної метрики в модифікований протокол AODV та врахування динамічної доступності спектра, інтерференційних впливів і витрат на перемикання каналів дозволяє забезпечити підвищення пропускної здатності, зменшення затримок і підвищення надійності передачі даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

1. Розроблений метод маршрутизації на основі модифікованого протоколу AODV та метрики mWCETT може бути використаний при проектуванні та модернізації когнітивних бездротових сітчастих мереж, а також у гетерогенних мережах 5G/6G та Інтернету речей, що дозволяє підвищити середню продуктивність мережі на 34%, збільшити наскрізну пропускну здатність на 10,5% та підвищити коефіцієнт доставки пакетів на 11,5% порівняно з базовими підходами, що підтверджено результатами імітаційного моделювання в динамічному когнітивному радіосередовищі.

2. Запропоновано моделі, алгоритми та рекомендації можуть бути використані для підвищення ефективності використання спектральних ресурсів, зменшення затримок передачі даних та підвищення стабільності маршрутів у динамічному радіосередовищі, а також у навчальному процесі та подальших наукових дослідженнях у галузі когнітивних бездротових мереж.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок полягає в такому:

1. Проаналізовано сучасні методи маршрутизації в бездротових сітчастих і когнітивних мережах та визначено їх обмеження щодо забезпечення QoS[13].

2. Сформульовано задачу маршрутизації в CR-WMN як багатокритеріальну оптимізаційну задачу з QoS-обмеженнями.

3. Розроблено модифіковану метрику маршрутизації mWCETT, що враховує інтерференцію, доступність і надійність спектра.

4. Побудовано математичну та онтологічну моделі метрики mWCETT і алгоритми її застосування в протоколах маршрутизації.

5. Проведено експериментальні дослідження з порівняльною оцінкою QoS-показників на базі модифікованого методу маршрутизації[13].

6. Обґрунтовано практичні рекомендації щодо інтеграції mWCETT у когнітивні мережі, а також її застосування в 5G/6G та IoT[47].

Здобуті результати формують науково обґрунтовану основу для підвищення якості обслуговування в когнітивних бездротових сітчастих мережах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені й одержали схвалення на:

- XIX Міжнародна наукова конференція ХНУПС ім. Івана Кожедуба (м. Харків, Україна, 2023);
- VII науково-практичної конференції курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених «Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем» (м. Київ, Україна, 2024);
- IV Міжнародної науково-практичної конференції «Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів» (Київ-Тернопіль-Краків, 2025);
- VIII науково-практичної конференції курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених «Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем» (м. Київ, Україна, 2025);

За результатами досліджень опубліковано 8 наукових публікацій, у тому числі чотири статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка в кількості двох співавторів, чотири тези виступів на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 103

найменувань. Загальний обсяг роботи 182 сторінки, з яких 156 сторінок основного тексту, 13 сторінок використаних джерел та 13 сторінок додатків. Робота містить 32 рисунків та 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Протягом останнього десятиліття бездротові сітчасті мережі (Wireless Mesh Networks, WMN) розглядалися як перспективна та економічно доцільна технологія, здатна забезпечити розширення бездротового зв'язку та надання широкосмугових послуг віддалених регіонах. Зростання популярності WMN зумовлене їхньою гнучкою архітектурою та можливістю надання інтегрованих послуг без необхідності використання дротової інфраструктури.

WMN являє собою самоорганізовану, самовідновлювальну та самоконфігуровану мережу, в якій вузли з'єднані між собою бездротовими каналами, утворюючи багатоступеневу (multi-hop) топологію сітки. Серед основних переваг цієї технології слід відзначити низькі витрати на розгортання, простоту обслуговування, високу надійність мережі та розширене покриття. Крім того, WMN здатні безперешкодно інтегруватися з різними бездротовими топологіями, зокрема IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, стільниковими мережами та бездротовими сенсорними мережами.

Разом з тим, WMN зазвичай функціонують у промислово-медичному (ISM) діапазоні радіочастотного спектру, який є загальнодоступним і не потребує ліцензування. Важливо зазначити, що цей спектральний діапазон інтенсивно використовується, особливо в густонаселених міських районах, що спричиняє перевантаження каналів, підвищений рівень шуму та перешкод, а також обмежену доступність пропускної здатності[16,91].

Обмеження радіочастотного спектра та пропускної здатності, характерні для традиційних бездротових сітчастих мереж (WMN) та інших технологій, що функціонують у неліцензованих діапазонах спектра ISM, суттєво впливають на загальну продуктивність мережі. Ці обмеження становлять серйозну проблему для задоволення вимог чутливих до затримок застосунків у режимі реального часу, які потребують високих показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS). До таких застосунків належать

онлайн-ігри, голосова передача через Інтернет-протокол (VoIP), мультимедійні конференції та Інтернет-телебачення (IPTV).

1.1 Технологія когнітивного радіо

Для забезпечення стабільної підтримки подібних сервісів необхідне впровадження нових технологічних рішень, здатних задовольняти як наявні, так і майбутні потреби у додатковому радіочастотному ресурсі, з урахуванням постійного розвитку новітніх бездротових технологій та прикладних сервісів. Радіочастотний спектр, як обмежений і вартісний ресурс, вимагає раціонального та ефективного використання.

У цьому контексті когнітивне радіо (Cognitive Radio, CR) постає як перспективна технологія для формування нового покоління бездротових систем зв'язку [16], [52]. Технологія CR – це інтелектуальна система бездротового зв'язку, що передбачає повністю програмовану архітектуру бездротових пристроїв, які здатні самостійно здійснювати моніторинг середовища на вільні канали, аналізувати його параметри та самостійно адаптувати свої характеристики передачі з метою забезпечення високої якості з'єднання та ефективної комунікації.

Технологія когнітивного радіо спрямована на оптимізацію використання радіочастотного спектру шляхом надання можливості неліцензованим вторинним користувачам (Secondary Users, SU) здійснювати моніторинг спектра та динамічно отримувати доступ до ліцензованих діапазонів за умови відсутності перешкод для ліцензованих первинних користувачів (Primary Users, PU) [17,85]. Такий підхід дає змогу підвищити ефективність використання спектра, уникаючи як його недозавантаженості, так і перевантаження.

Інтеграція традиційних бездротових сітчастих мереж (WMN) з технологією CR відкриває нові можливості для покращення продуктивності мереж[103]. Така інтеграція дозволяє ефективніше використовувати пропускну здатність, підвищувати загальну пропускну спроможність мережі

та оптимізувати розподіл мережевих ресурсів. Технологія CR, таким чином, розглядається як ключовий інструмент подолання проблеми недовикористання дорогих ліцензованих частотних ресурсів, одночасно сприяючи зменшенню перевантаженості в неліцензованих спектральних діапазонах.

З іншого боку, інтеграція технологій когнітивного радіо із традиційними бездротовими сітчастими мережами забезпечує низку додаткових переваг, особливо у високонавантажених урбанізованих середовищах, де системи, що працюють в неліцензованих діапазонах спектра [57], часто зазнають перенасичення. Властивий WMN принцип багатострибкової передачі також сприяє ефективнішому охопленню території за рахунок використання коротших стрибків[102], що, у свою чергу, дозволяє зменшити потужність передачі без шкоди для якості з'єднання [53].

Інтеграція цих двох технологій формує нову архітектуру, відому як інтелектуальна, автономна, когнітивна сітчаста мережа наступного покоління (CR-WMN), яка передбачає динамічну зміну частотного діапазону відповідно до поточних умов спектрального середовища [18,80]. Архітектуру та принципи побудови CR-WMN приведено на рисунку 1.1.

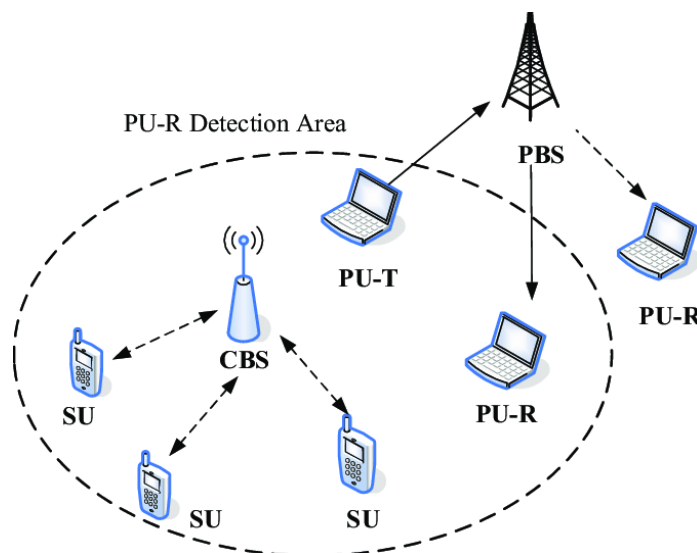


Рисунок 1.1. Архітектура мережі CR-WMN.

Як зображено на рис. 1.1, архітектура когнітивної сітчастої мережі (CR-WMN) включає дві основні підсистеми: мережу первинних користувачів (Primary Users, PU) та мережу вторинних користувачів (Secondary Users, SU)[51]. У CR-WMN використовується мультидіапазонний підхід до передачі даних, що забезпечує можливість одночасного функціонування різних гетерогенних мережевих технологій [55, 58] у межах одного спектрального простору – у часі, частоті та просторі.

Мережа PU складається з фіксованої базової станції та мобільних вузлів, які обмінюються інформацією виключно в межах виділених ліцензованих частотних діапазонів. У межах цих діапазонів первинні користувачі мають абсолютний пріоритет доступу до каналів.

Мережа SU, у свою чергу, включає як фіксовані, так і мобільні вузли, що можуть здійснювати передачу даних у неліцензованих та в ліцензованих частотних діапазонах, за умови, що відповідні спектральні ресурси не використовуються первинними користувачами. Це дозволяє вторинним користувачам здійснювати опортуністичний доступ до спектра, не порушуючи роботи основних користувачів.

Традиційні WMN демонструють як статичну, так і динамічну топологію, що зумовлено наявністю мобільних вузлів SU. Натомість когнітивні радіомережі (CRN)[54] характеризуються низкою відмінних рис, серед яких: гнучке використання спектра, здатність до спектрального сприйняття, неоднорідність, інтероперабельність та здатність до навчання й адаптації [19,97].

Попри значний потенціал когнітивних сітчастих мереж щодо розширення покриття, підвищення ефективності використання спектральних ресурсів, збільшення пропускної здатності та загального покращення продуктивності[103] мережі, ці системи стикаються з рядом суттєвих викликів [19]. Зокрема, складність функціонування CR-WMN зумовлена такими чинниками, як:

- динамічна топологія[67,86], що виникає через мобільність[70] і непостійність вузлів;
- змінність спектральних смуг, доступних для використання SU;
- неоднорідність стандартів та технологій, які можуть співіснувати в межах однієї мережі;
- непередбачувана активність первинних користувачів (PU), що вимагає негайного вивільнення спектра SU.

Ці динамічні характеристики ускладнюють процес маршрутизації оскільки потребують врахування значно глибшого набору змінних під час встановлення та підтримання маршрутів. У бездротових багатострибкових мережах надійність зв'язку значною мірою належить від стабільного з'єднання між вузлами, яке, в свою чергу, визначається ефективністю реалізованої маршрутизуючої стратегії.

Таким чином, розробка, впровадження та оптимізація ефективного маршрутизуючого протоколу є ключовим елементом забезпечення стабільної, стійкої та масштабованої роботи CR-WMN.

1.2 Інтеграція CR-WMN із SDN

Когнітивні бездротові сітчасті мережі (Cognitive Radio Wireless Mesh Networks, CR-WMN) виникли як продовження концепції когнітивного радіо (CR) та бездротових mesh-мереж (WMN). Основоположні дослідження в галузі когнітивних радіомереж [60] визначили ключові механізми динамічного доступу до спектра, спектрального зондування та управління ресурсами, що є невід'ємною частиною сучасних CR-WMN, що надалі розвивались в контексті mesh-топологій.

CR-WMN поєднуються класичні властивості mesh-мереж – багатохопову маршрутизацію з гетерогенними вузлами, що взаємодіють між собою без централізованої інфраструктури – з когнітивними функціями, які дозволяються вузлам динамічно оцінювати стан радіосередовища та вибирати спектральні ресурси відповідно до вимог QoS та обмежень щодо завад PU. Такі

можливості є ключовими у сценаріях, де спектр обмежений або нерівномірно завантажений (наприклад, у сільських місцевостях, тактичних або надзвичайних операціях), а традиційні протоколи маршрутизації та доступу не забезпечуються бажаного рівня продуктивності.

Одночасно з розвитком когнітивних мереж у телекомунікаціях зросли вимоги до гнучкого, централізованого управління мережею. У класичній WMN контроль над маршрутизацією та ресурсами здійснюється розподілено, що обмежує можливість глобальної оптимізації. У цьому контексті парадигма Software-Defined Networking (SDN) пропонує фундаментальний підхід, у якому функції контролю і передачі даних логічно розподілені та централізовані через програмний контролер. SDN дозволяє реалізувати перспективні механізми управління мережею за допомогою відкритих API, стандартизованих протоколів (наприклад, OpenFlow), а також глобального уявлення про стан мережі, що суттєво полегшує прийняття рішень щодо ресурсів, маршрутизації та QoS [61].

Інтеграція SDN у CR-WMN відкриває нові горизонти для оптимізації мереж. Центральний SDN-контролер може агрегувати дані про спектральну ситуацію, топологію мережі, QoS-метрики[87] та вимоги трафіку, що дозволяє приймати узгоджені глобальні рішення щодо вибору каналів, маршрутизації та розподілу ресурсів, значно перевищуючи потенціал розподілених підходів. Такі підходи розглядаються в літературі під загальними назвами Software-Defined Wireless Networking (SDWN) і включають механізми централізованого відкритого контролю на трафіком, QoS-моніторингу, глобального виявлення топології та управління спектром у багатохоповому середовищі [62].

Застосування SDN у CR-WMN призводить до суттєвих змін у функціональній архітектурі мережі. Замість суто розподіленого управління кожним вузлом, SDN-контролер виступає як єдина логічна точка, що збирає сигнали від вузлів щодо спектрального стану, метрик каналів і локальної топології, а потім формує оптимізовану політику для всього домену. Це сприяє зменшенню сигналізаційного навантаження, покращенню видимості мережі та

зниженню часових затримок при адаптації до змінного радіосередовища. При цьому контролер може реалізовувати складні алгоритми, враховуючи глобальні метрики QoS, умови спектру та політики доступу.

У межах цієї інтегрованої архітектури можна виділити декілька ключових функціональних блоків, (див. рис. 1.2):

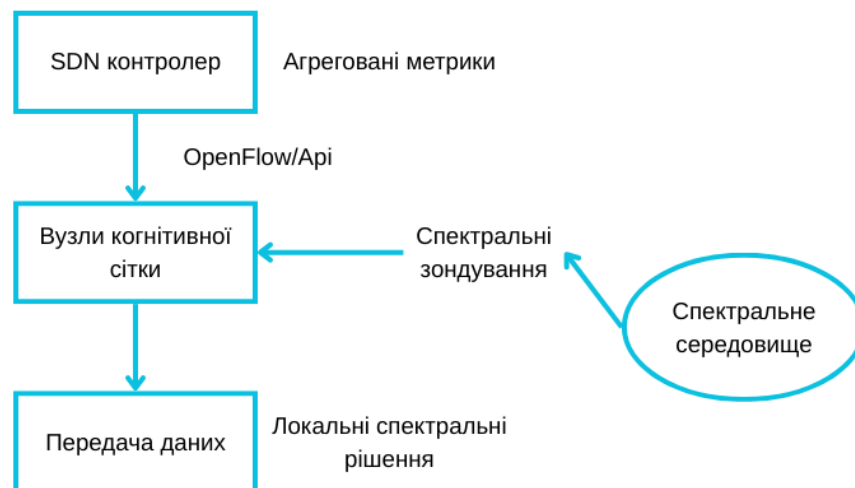


Рисунок 1.2. Спрощена блок-схема відображення основних рівнів інтеграції CR-WMN та SDN: центральний контролер, когнітивні вузли та їх взаємодія з даними спектра.

Зокрема, SDN-контролер може виконувати динамічний розподіл спектра, координуючи вторинних користувачів у mesh-середовищі та мінімізуючи інтерференцію як між ними, так і з первинними користувачами. Цей підхід дозволяє централізовано оптимізувати маршрути та враховувати глобальні обмеження спектрального середовища та політики доступу. У той же час вузли на боці передачі даних виконують локальне сканування спектра, збір вимірювань та передають ці дані контролеру, що забезпечує глобальне бачення та адаптацію.

Централізовані рішення SDN також відкривають шлях до реалізації QoS-орієнтованих стратегій маршрутизації, крос-рівневих оптимізацій та

адаптації до вимог додатків у реальному часі. Наприклад, контролер може обирати маршрути з урахуванням як глобальних показників якості ліній (через зібрані спектральні дані), так і поточних вимог до затримки або пропускну здатності. Це суттєво розширює можливості CR-WMN у порівнянні з класичними самостійними підходами до адаптації каналів та маршрутів.

Крім того, інтеграція SDN із CR-WMN створює основу для розгортання програмно-визначених ресурсів на мережевому рівні, гнучкої віртуалізації функцій мережі (NFV), спектра чи оптимізації рішення контролера на основі історичних даних.

Підсумовуючи, поєднання CR-WMN із SDN формує потужну архітектуру, здатну забезпечити глобальну адаптивність, ефективне використання спектра та централізоване QoS-управління, що особливо важливо для сучасних сценаріїв застосування – від розумних міст до критичних служб зв'язку. Завдяки централізованому контролю, мережі стають не лише адаптивними щодо спектра, а й гнучкими щодо політик управління, що відкриває нові можливості для ефективно оптимізації та автоматизації в умовах динамічного та складного радіосередовища.

1.3 Якість обслуговування в SDN

Програмно-визначені мережі (Software-Defined Networking, SDN) становлять сучасну парадигму мережевого управління, яка суттєво трансформує підходи до проєктування, конфігурації та експлуатації мережевих інфраструктур. На відміну від класичних мережевих архітектур, де функції контролю та обробки даних жорстко інтегровані безпосередньо у маршрутизатори й комутатори, SDN передбачає логічне розділення цих рівнів. У такій моделі контрольний рівень виноситься у централізований програмний контролер, тоді як мережеві пристрої виконують переважно функції пересилання пакетів.

Централізація управління забезпечує мережевим адміністраторам можливість здійснювати конфігурацію та оптимізацію параметрів мережі

програмно, у режимі реального часу. Це підвищує адаптивність інфраструктури[101], полегшує автоматизацію завдань та сприяє швидшому реагуванню на зміни навантаження чи політик. Крім того, SDN значно підсилює масштабованість мереж, оскільки дозволяє динамічно розподіляти ресурси відповідно до актуальних потреб. Завдяки відкритості та гнучкості програмно-визначена архітектура створює сприятливе середовище для розроблення інноваційних мережевих сервісів, механізмів маршрутизації та систем безпеки, тим самим стимулюючи подальшу еволюцію мережевих технологій [47].

У сучасних програмно-визначених мережах одним із ключових викликів залишається забезпечення гарантованої якості обслуговування (Quality of Service, QoS). Оскільки мережеве середовище є динамічним, параметри трафіку та стан каналів можуть змінюватися в реальному часі, що безпосередньо впливає на такі критично важливі показники, як доступна пропускна здатність, затримка[92], джиттер та надійність доставки пакетів. Як зазначають дослідники, динамічність мережі ускладнює формування оптимальних рішень з маршрутизації та керування трафіком, особливо за умов неоднорідних потоків та флуктацій навантаження [40].

Забезпечення стабільного та передбачуваного QoS за високої мінливості трафіку є суттєвим викликом для адміністраторів мереж, оскільки традиційні механізми не завжди здатні оперативно реагувати на зміни в умовах реального часу [41,68]. Зокрема, зростання кількості одночасних з'єднань або поява пікових навантажень можуть призводити до перевантаження контролера, деградації маршрутів або зниження ефективності балансування ресурсів.

У контексті SDN додатковою проблемою є масштабованість: мережі повинні безперешкодно розширюватися для підтримки постійно зростаючої кількості підключених пристроїв, сервісів і додатків, не погіршуючи при цьому параметри якості обслуговування. Оскільки контролер SDN виконує значну частину обчислювальних функцій, його навантаження пропорційно

зростає зі збільшенням розміру мережі, що може призводити до затримок прийняття рішень або непередбачуваних затримок сигналізації [42].

Таким чином, підтримання стабільного рівня QoS у масштабованих SDN-архітектурах вимагає ефективних методів управління ресурсами, проактивної маршрутизації, оптимального розподілу навантаження та механізмів, здатних адаптуватися до змін мережевого стану з мінімальними затримками. Дослідження й удосконалення таких методів є ключовим напрямком розвитку програмно-визначених мереж нового покоління.

SDN передбачає поєднання різноманітних пристроїв та технологій, які повинні безперебійно працювати разом. Досягнення послідовного досвіду QoS на різних елементах мережі вимагає встановлення стандартизованих протоколів і інтерфейсів для забезпечення плавної взаємодії. А встановлення та забезпечення єдиної політики QoS на всій мережевій інфраструктурі є складним завданням, яке передбачає узгодження налаштувань QoS з різними вимогами різних додатків та задоволення очікувань користувачів, що вимагає реального управління політикою.

В традиційних мережах, пристрої, такі як маршрутизатори та комутатори, виконують роль управління трафіком, забезпечуючи необхідний напрямок передачі даних між різними сегментами мережі, а також здійснюють контроль за маршрутизацією, фільтрацією і передачею інформації між пристроями та користувачами. Основним принципом SDN є розділення ролей: централізована платформа керування (контролер) приймає рішення, а пристрої (комутатори, маршрутизатори) просто роблять виконання цих рішень, передаючи та обробляючи трафік згідно з вказівками, отриманими від контролера, що дозволяє гнучко налаштовувати і оптимізувати мережу в реальному час [47].

1.3.1 Основні терміни та визначення

Якість обслуговування полягає в тому, щоб переконатися, що процеси в мережі, які повинні відбуватися швидко і надійно [47].

Пропускна здатність це показник кількості одиниць інформації, яку система може обробляти за певний проміжок часу. Цей термін широко застосовується до різного роду систем, починаючи від різних аспектів комп'ютерних та мережевих систем до організацій. Споріднені заходи щодо продуктивності системи включають швидкість, з якою може бути завершено певне робоче навантаження, та час відгуку, кількість часу між одним інтерактивним запитом користувача та отримання відповіді. Затримка – це час, необхідний для передачі даних з однієї точки в іншу. Низька затримка означає, що дані надходять швидко.

Джиттер – небажані фазові та/або частотні випадкові спотворення під час передачі сигналу. Виникають внаслідок нестабільності тактового генератора, змін параметрів лінії передачі в часі та різної швидкості поширення частотних складових одного і того ж сигналу. У цифрових системах проявляється у вигляді випадкових швидких змін цифрового сигналу в часі, що призводить до розсинхронізації та, як наслідок, спотворення переданої інформації.

Надійність – це характеристика, що визначає можливість абонентів обмінюватися інформацією по мережах зв'язку в умовах виникнення технічних відмов і експлуатаційних помилок на її елементах без помітного погіршення імовірісно-часових показників обслуговування заявок.

Далі розглянемо архітектуру SDN та існуючі ефективні механізми QoS (рис. 1.3). У традиційній мережі самі пристрої вирішують, як обробляти трафік. Це може призвести до перевантаження, оскільки кожен пристрій приймає власні рішення. В SDN центральний контролер [43] має карту і планує найкращі маршрути для кожного типу трафіку. Це планування включає найшвидші та надійні маршрути.

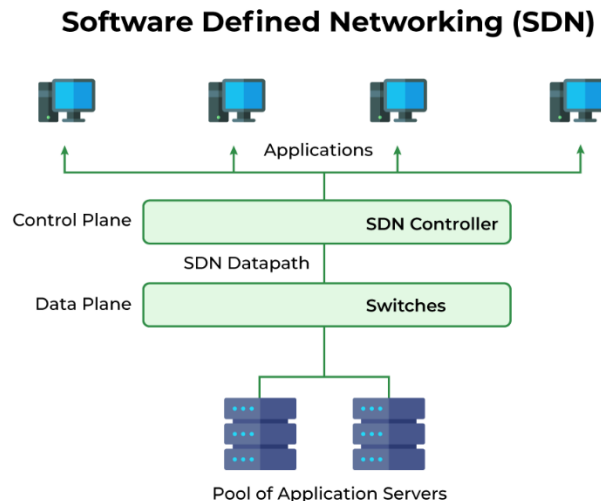


Рисунок 1.3 – Архітектура SDN

Парадигма програмно-визначених мереж [44] виникла у відповідь на обмеження традиційних мережевих архітектур. Систематичний огляд QoS на основі проблем контролера, аналізує поточний стан досліджень і узагальнюються результати роботи різних контролерів на основі параметрів QoS, таких як надійність, масштабованість, узгодженість і балансування навантаження.

1.3.2 Потенційні проблеми SDN

Розглянемо потенційні проблеми які виникають у мережах SDN/OpenFlow [47]:

1. Рівень передачі даних (Data Plane): рівень передачі даних у мережі SDN виконує інструкції, отримані від контролера SDN. Він відповідає за виконання правил маршрутизації [45], визначених контролером, і забезпечує направлення пакетів відповідно до заданих програм.

2. Контролер SDN (SDN Controller): Контролер SDN є централізованою платформою керування архітектури SDN, що забезпечує централізовану точку для керування та управління мережею. Він спілкується з рівнем передачі даних SDN, щоб приймати рішення щодо маршрутизації пакетів.

3. Рівень управління операціями (Operation Plane): включає різноманітні мережеві служби та операції, які керують поведінкою мережі, такі як балансування навантаження, брандмауери тощо. Рівень управління операціями конфігурує та моніторить рівень передачі даних мережі.

4. Рівень управління (Control Plane): діє як контролер і є програмно-керованою мережевою системою. Рівень управління приймає всі рішення щодо маршрутизації [45] на основі топології мережі, а також керує різними контролерами та іншими компонентами.

У випадку таких сервісів, як відеоконференції чи потокова передача мультимедіа, збільшена пропускна здатність є критично важливою, оскільки вона безпосередньо впливає на плавність відтворення та відсутність буферизації. У перевантажених мережах особливого значення набуває ефективне управління смугою пропускання, яке гарантує справедливий розподіл ресурсів між користувачами та запобігає виникненню затримок і деградації якості сервісів. У SDN механізми керування смугою пропускання функціонують аналогічно централізованим транспортним системам, де інтелектуальний контролер визначає оптимальні маршрути руху, мінімізуючи «затори» та забезпечуючи оптимальний розподіл потоку [40,71].

SDN надає можливість централізовано контролювати потоки даних, приймаючи рішення щодо їх пріоритезації та розподілу пропускної здатності відповідно до актуального стану мережі та політик QoS. Завдяки логічному відокремленню контрольного та транспортного рівнів у мережевих пристроях адміністратори можуть динамічно змінювати параметри маршрутизації, пріоритети трафіку та правила обробки пакетів, що значно підвищує гнучкість і реактивність мережі [41].

Зменшення втрат пакетів у SDN досягається завдяки використанню централізованих алгоритмів керування мережею, інтелектуального моніторингу та автоматичного перенаправлення потоків у випадку виявлення перевантажених або несправних ділянок. Контролер може швидко застосувати нові маршрути, балансувати навантаження та реалізовувати політики QoS на

основі реальних показників роботи мережі, що значно підвищує стабільність доставки даних [42].

1.3.3 Методи поліпшення QoS в SDN

Проведемо аналіз методів поліпшення QoS в SDN які охоплюють широкий спектр підходів і технологій та забезпечують ефективну передачу даних, зменшення затримок, мінімізацію втрат пакетів і підтримку необхідної пропускної здатності для критично важливих застосувань. SDN, завдяки централізованому управлінню мережею, надає розширені можливості для оптимізації QoS [47].

Віртуальні сегменти мережі для індивідуального QoS є методологією, що дозволяє поділити фізичну мережу на кілька віртуальних сегментів, кожен із яких налаштовується під конкретні вимоги до якості обслуговування. У контексті SDN цей процес реалізується завдяки централізованому управлінню мережею, що забезпечує гнучкість і ефективність налаштування (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Приклади віртуальних сегментів і QoS-параметрів

Тип віртуальних сегментів	Призначення	QoS-параметри
eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – розширений мобільний широкосмуговий доступ	Стрімінгові сервіси, AR/VR	Висока пропускна здатність, помірна затримка
URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) – наднадійний зв'язок із низькою затримкою	Телемедицина, автономні авто	Низька затримка, висока надійність
mMTC (Massive Machine-Type Communications) – масивні комунікації машинного типу	ІоТ, розумні міста	Масштабованість, оптимізація енергоспоживання
Користувацький віртуальний сегмент	Специфічний сервіс (наприклад, корпоративний VPN)	Пропускна здатність та безпека

Підходи на основі машинного навчання (ML) у SDN стають все більш популярними завдяки можливостям аналізу складних мережеских умов, автоматизації управління та оптимізації роботи мережі. Використання ML [46, 65, 69] у SDN допомагає вирішувати завдання, пов'язані з передбаченням трафіку, виявленням аномалій, покращенням QoS та управлінням ресурсами (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Підходи ML, які використовуються у SDN

Категорія ML	Приклади задач у SDN	Методи
Класифікація	Виявлення DDoS-атак, класифікація трафіку	Support Vector Machines, Decision Trees

Регресія	Прогнозування пропускної здатності	Лінійна регресія, LSTM
Кластеризація	Групування схожих потоків трафіку	K-Means, DBSCAN
Аномалійний аналіз	Виявлення аномалій у трафіку	Autoencoders, Isolation Forest
Reinforcement Learning (RL)	Оптимізація маршрутизації, балансування навантаження	Q-Learning, Deep Q-Networks
Deep Learning (DL)	Складний аналіз QoS, передбачення мережевого стану	CNN, RNN, LSTM

Досягається це основними напрямками машинного навчання як передбачення трафіку, виявлення аномалій та безпека, оптимізація QoS, балансування навантаження, енергозбереження та інші.

Динамічні механізми регулювання QoS забезпечують адаптивне управління мережею для підтримки стабільної якості обслуговування, навіть у разі змін у трафіку, навантаженні або мережевих умовах. У контексті сучасних мереж, особливо SDN, ці механізми дозволяють гнучко реагувати на зміни в реальному часі та підвищувати ефективність роботи мережі.

До таких механізмів відносять системи та алгоритми, які: аналізують поточні умови мережі; динамічно змінюють параметри QoS (пропускну здатність, пріоритети трафіку, затримку, джиттер) для різних потоків трафіку; адаптують мережеву поведінку до змін у реальному часі.

1.3.4 Проблеми впровадження QoS в SDN

Хоча SDN пропонує значні переваги, реалізація QoS в середовищах SDN має наступні проблеми [47]:

1. Навантаження на контролер: масштабованість: зі зростанням мереж контролер може стати єдиною точкою відмови та вузьким місцем; складність

– управління великою кількістю потоків і політик може бути складним і ресурсоємним.

2. Управління таблицями потоків: записи в таблиці потоків – ефективне управління записами в таблиці потоків є критичним для оптимальної продуктивності; динамічні шаблони трафіку – адаптація до динамічних шаблонів трафіку та оновлення таблиць потоків в реальному часі може бути складним завданням.

3. Проблеми безпеки: централізована точка керування – централізований контролер може стати мішенню для атак, що може призвести до компрометації всієї мережі; безпечне спілкування – забезпечення безпечного зв'язку між контролером і мережевими пристроями є важливим.

4. Проблеми взаємодії: впровадження специфік для постачальників – різні постачальники можуть мати різні реалізації SDN, що призводить до проблем взаємодії; стандартизація – необхідність стандартизованих протоколів і API для забезпечення безперебійної інтеграції різних компонентів SDN.

5. Виконання політик QoS: моніторинг і контроль в реальному часі – забезпечення виконання політик QoS в реальному часі, особливо під час пікових навантажень або мережових збоїв; динамічне налаштування – адаптація політик QoS до змін умов мережі та вимог додатків.

6. Відмова контролера та відновлення: толерантність до помилок – реалізація механізмів для обробки відмов контролера та забезпечення стійкості мережі; швидке відновлення – мінімізація простою та відновлення функціональності мережі після відмови контролера.

7. Складність мережі: великомасштабні мережі – управління QoS у великомасштабних мережах зі складною топологією може бути складним; різноманітні потоки трафіку – обробка різних типів трафіку (наприклад, голос, відео, дані) з різними вимогами до QoS.

Для вирішення вище викладених проблем потрібне ретельне планування, надійна реалізація та постійний моніторинг і оптимізація. Ефективне управління цими проблемами дозволить SDN забезпечити значні переваги з точки зору продуктивності мережі, гнучкості та масштабованості.

SDN змінює мережеву архітектуру, пропонуючи централізований контроль та програмованість і цей концептуальний зсув відкриває нові можливості для поліпшення показників QoS. Динамічні можливості інженерії трафіку SDN виділяються як ключовий фактор оптимізації продуктивності мережі, а здатність адаптувати та керувати потоками трафіку в реальному часі значно сприяє мінімізації затримки, джиттера та втрати пакетів. Визначним аспектом покращення QoS є інтеграція SDN із середовищами хмарних обчислень яка сприяє ефективному розподілу ресурсів на основі вимог додатків, підвищуючи загальну якість обслуговування в мережі. А інтеграція SDN із середовищами хмарних обчислень створює можливості для підвищення якості обслуговування шляхом ефективного розподілу ресурсів на основі вимог додатків [47].

1.4 Класифікація бездротових сітчастих мереж

Бездротові сітчасті мережі (Wireless Mesh Networks, WMN) залишаються однією з ключових технологій для побудови масштабованих бездротових інфраструктур, здатних забезпечувати високу надійність, покриття та адаптивність у динамічних середовищах. З 2020 року відзначається значне зростання інтересу до WMN у контексті інтелектуального керування спектром, оптимізації багатоканальних протоколів, інтеграції 5G/6G та IoT-системами[93], а також забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS). У даному розділі наведено сучасну класифікацію WMN, а також виконано критичний огляд наукових публікацій останніх років, що формують наукові передумови для розвитку QoS-орієнтованих методів маршрутизації.

1.4.1 Класифікація за архітектурою

Відповідно до сучасних досліджень, WMN класифікують на інфраструктурні, клієнтські та гібридні мережі. Інфраструктурні WMN базуються на стаціонарних вузлах-маршрутизаторах, які створюють магістральну топологію та забезпечують найвищу стабільність і пропускну здатність. Такі WMN використовують у розгортанні міських бездротових мереж, транспортних хабів, розподіленого відеоспостереження та інфраструктури безпечних комунікацій. Клієнтські WMN – кінцеві пристрої одночасно виконують роль маршрутизаторів, що є корисним у мобільних або тимчасових сценаріях. В даному випадку, клієнтські пристрої формують сітку самостійно (наприклад, MANET-подібна топологія). Незважаючи на існуючі проблеми – нестабільність маршрутів через мобільність, підвищене енергоспоживання клієнтів[95] та непередбачуваність затримок – саме Client WMN демонструє найвищу гнучкість і придатні до мереж без фіксованої інфраструктури. Гібридні мережі поєднують переваги обох підходів для гнучкості й підвищеної надійності маючи наступні переваги: використання інфраструктури у центральних сегментах, адаптація під міські та польові сценарії та можливість мобільних клієнтів підтримувати шляхи, якщо інфраструктура недоступна.

1.4.2 Класифікація за рівнем інтелектуальності мережі

У зв'язку з активним розвитком когнітивного зв'язку та штучного інтелекту останніми роками виділяють додаткові типи WMN: когнітивні WMN (Cognitive WMN, CR-WMN), програмно-конфігуровані WMN (Software-Defined Networking WMN, SDN-based WMN) та бездротові mesh-мережі, що доповнені штучним інтелектом (AI-Enhances WMN).

Когнітивні WMN поєднують сітчасту топологію з функціоналом когнітивного радіо – динамічний доступ до спектра, можливість уникнення перешкод шляхом зміни частоти[98] та підтримка QoS [59] для різномірних процесів. Поява CR-WMN обумовлена необхідністю раціонального

використання спектра та підвищення пропускнуєї здатності в умовах спектральної фрагментації[89].

Архітектури основані на програмно-конфігурованих мережах WMN спрощують централізоване керування, дозволяють оновлювати політики маршрутизації без переривання трафіку та підвищують керованість QoS.

AI-Enhances WMN – це бездротові мережі, кожен мережевий вузол (пристрій) яких має вбудовані можливості штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) для оптимізації роботи, підвищення ефективності та управління всієї мережі.

1.5 Існуючі підходи до забезпечення QoS у WMN

У цьому підрозділі представлено огляд ключових наукових статей, що демонструють поточні напрямки в дослідженнях WMN, особливо в контексті QoS, когнітивних технологій та ML-маршрутизації.

Робота [1] досліджує інтеграцію когнітивного радіо в 5G і майбутніх WMN. Автори підкреслюють необхідність динамічного спектрального доступу (DSA), незалежного вибору каналів, а також спектральної передбачуваності як основних умов QoS. Актуальність роботи полягає в допомозі інтегрувати CR як основу для QoS-маршрутизації. Розглядається глибокий аналіз DSA та проблем завад у щільних мережах та формулювання вимог до когнітивних WMN. Недостатньо уваги приділено до питання побудови багато-стрибкових маршрутів.

В роботі [2] надано систематичний огляд методів забезпечення QoS у WMN. Розглядаються класифікації QoS-метрик, виклики в MR-MC (multi-radio multi-channel) середовищі, а також огляд протоколів маршрутизації й MAC-рішень. Підсумовується, що класичні протоколи (OLSR, AODV, HWMP) потребують модифікацій для MR-MC і когнітивних сценаріїв; рекомендуються крос-шарові підходи й адаптивні механізми планування ресурсів.

В дослідженні [3] запропоновано адаптивний MAC (ММАС-подібний) протокол для динамічних багатоканальних мереж. Описано механізм каналного сканування, швидкої ре-параметризації та зниження накладних витрат на перемикання каналів. Практично показано зростання агрегованої пропускної здатності та зниження латентності для навантажених сценаріїв, що є важливо для QoS чутливих застосунків.

Праця [4] надає метод кластеризації та адаптивного призначення каналів (алгоритм CNaCha) спеціально для 802.11s mesh. Пропонується розділення мережі на кластери з локальною оптимізацією каналів. Підвищується масштабованість і знижується внутрішньокластерна інтерференція, що є корисним для мереж з багатьма вузлами, де необхідно гарантувати QoS.

Робота [5] досліджує крос-шаровий підхід до побудови енергоефективних мультикаст-дерев у CR-WMN з урахуванням доступності каналів і енергетичних обмежень вузлів. Показано, що врахування спектральної гетерогенності (DSA) та енергетичних обмежень одночасно дозволяє значно зменшити енергоспоживання при збереженні QoS для мультикасту.

Робота [6] пропонує застосування deep-RL для інтервального прогнозування використання каналів (time & correlation awareness) та прийняття рішень DSA у когнітивних мережах. Використання історичних паттернів PU (primary user) дозволяє знизити частоту колізій і підвищити опортуністичну пропускну здатність SU (secondary users).

Дослідження [7] пропонує підхід до прогнозування трафіку у SDN-мережах з метою пояснювального QoS-менеджменту; моделі глибинного навчання використовуються для виявлення 'elephant flows' і попередньої оптимізації маршрутів. Показується, що поєднання прогнозів трафіку та контролю SDN може істотно зменшити затримки та джиттер, що релевантно при інтеграції SDN у WMN.

У роботі [8] пропонується крос-шарова стратегія маршрутизації, яка одночасно враховує QoS (затримка, пропускну здатність) і енергоспоживання.

Праця демонструє що маршрутизація, DSA та енергетика є критичними для CR-WMN. Не розглядається масштабування на мережі великих розмірів.

Робота [9] вводить адаптивну модель кооперативного спектрального сенсингу, що суттєво підвищує точність виявлення активності PU (первинних користувачів). Проводиться взаємозалежність великого приросту точності виявлення активності до зменшення кількості конфліктів і, як наслідок, покращення QoS. Не наводиться інтеграція з маршрутизацією.

У статті [10] вводиться роутинг із динамічною перебудовою маршрутів при зміні спектральної доступності. Покращено надійність, пришвидшена реакція на PU-активність, проте наводиться тільки алгоритмічний підхід.

У роботі [11] досліджено різні стратегії вибору спектра для когнітивної радіомережі (CRN). У статті запропоновано підхід до порівняння алгоритмів вибору каналів на основі основних експлуатаційних параметрів з метою зменшення загального часу прийняття рішень. Основна мета — мінімізувати загальний час роботи системи при збереженні ефективної продуктивності.

Робота [12] досліджує розподілену схему розподілу потужності, що ґрунтується на підході Н-альфа керування. Їхнє дослідження враховує затримку та мінливість коефіцієнта підсилення каналу в когнітивній радіомережі (CRN). Автори стверджують, що підвищення ефективності зв'язку досягається завдяки запропонованому алгоритму розподілу потужності. Крім того, вони зазначають, що такі вдосконалені рішення є перспективними для застосування в технології 5G.

У праці [48] Сатьянараян К. Падаганур і Джаяшрі Д. досліджують механізм спільного використання ресурсів кількома мережевими вузлами. Ці вузли розташовані на оптимальній відстані від джерела постачання та працюють з мінімальною затримкою. Автори порівняли динамічну та статичну схеми, застосували динамічний підхід для оптимізації затримки. Завдяки такому рішенню вдалося досягти зменшення рівня відмов на 20%, що сприяло підвищенню якості обслуговування (QoS). Водночас у роботі не було

проаналізовано джитер, який є одним із важливих показників для оцінки продуктивності мережевих систем.

У статті [49] Самода Ґамадже, Дуй Т. Нґо та Джаміль Я. Хан досліджують оптимальний розподіл потужності у багатокористувацькій когнітивній радіомережі (CRN). Їхня мета — максимізувати загальну ефективну пропускну здатність мережі з урахуванням обмежень на потужність та вимог щодо захисту первинних користувачів (PU). Автори запропонували два ітераційні алгоритми, які, однак, є обчислювально складними. На противагу цьому, у даній роботі представлено простий та ефективний підхід.

У роботі [50] Мара Буквіч, Богдана Станоєвіч і Міла Станоєвіч зосереджуються на проблемах розподілу каналів і вибору мережі в гетерогенних мережах 5G. Автори запропонували дві двоцільові моделі. Перша модель передбачала розподіл вторинних користувачів (SU) між мережами з урахуванням таких параметрів, як вартість, доступна швидкість передавання даних та допустимий рівень інтерференції. У другій моделі первинні вузли (PN) були розподілені за каналами, а вторинні користувачі — призначені до каналів, виходячи з їхніх додаткових вимог щодо низької затримки.

1.6 Аналіз існуючих протоколів маршрутизації

1.6.1 Порівняльний аналіз протоколів AOMDV, DSR та AODV

З метою підвищення якості обслуговування (QoS) користувачів, у роботі [13] запропоновано застосувати два методи: локалізації з урахуванням локалізованості (LAL) та Water Filling. Для їх реалізації було обрано протоколи маршрутизації AOMDV та DSR відповідно. Крім того, в роботі розглядається техніка балансування навантаження, в основі якої лежить базовий протокол маршрутизації AODV. Важливо зазначити, що протокол AOMDV забезпечує встановлення нових маршрутів за запитом, створює петльонезалежні вузли, підтримує стабільне з'єднання та вирізняється високою ефективністю під час відновлення після збоїв[14],[15].

Метод локалізації є поширеною технікою у багатьох мережевих системах. Запропонований у даній роботі підхід ґрунтується на використанні протоколу маршрутизації AOMDV. Однак, цей метод має певне обмеження, яке полягає у необхідності побудови карти вершин. У реальних системах, мережі не завжди є повністю локалізованими, що призводить до наявності теоретично нелокалізованих вузлів.

Метод LAL (Localizability Aided Localization) складається з трьох ключових етапів:

- перевірка локалізованості вузлів;
- корекція мережі;
- побудова дерева сегментів.

З огляду на локалізованість вузлів, усі модифікації, що вносяться методом LAL, є обґрунтованими та доцільними.

Алгоритм Water Filling є оптимальним рішенням для максимізації енергії каналу з динамічними частотними характеристиками, оскільки він адаптивно регулює передану потужність відповідно до коефіцієнта підсилення каналу. У цій роботі запропоновано інтеграцію керування потужністю за допомогою алгоритму Water Filling з протоколом маршрутизації DSR (Dynamic Source Routing) для підвищення пропускної здатності когнітивної радіосистеми.

Традиційна реалізація алгоритму Water Filling не може бути безпосередньо застосована в когнітивних системах через наявність додаткових обмежень щодо потужності. З огляду на це, в даній роботі алгоритм реалізується ітераційно для досягнення оптимального керування передачею. Застосування ітераційного підходу дозволяє ефективно вирішити задачу розподілу потужності, одночасно знижуючи обчислювальну складність.

Розглянуто зразкову когнітивну радіомережу (CRN), яка включає первинних (Primary Users) та вторинних (Secondary Users) користувачів. У ній вузли з позначеннями P1–P8 виконують роль первинних, а вузли S1–S4 — вторинних користувачів. На прикладі цієї мережі демонструється передавання

даних від вузла P5 до вузла S2, де вузол P5 є ініціатором передачі, а S2 — приймачем. У процесі передавання застосовуються запропоновані методи, які визначають критерії вибору наступного вузла для подальшої маршрутизації до кінцевого пункту призначення.

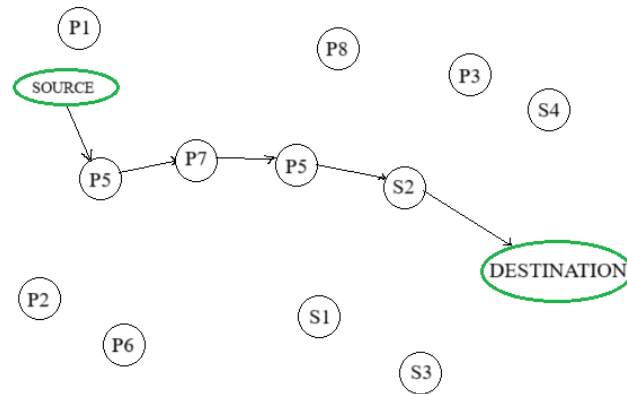


Рисунок 1.4 – Процес обміну інформацією між вузлами

На рис. 1.4 візуалізовано процес обміну інформацією між вузлами, що ілюструє передачу даних від джерела до пункту призначення. Вибір наступного вузла для подальшої маршрутизації здійснюється відповідно до застосованого алгоритму.

Результати моделювання отримані на основі цієї схеми передачі з використанням різних алгоритмів для кожного окремого сценарію. Порівняльний аналіз, проведений для кожного з алгоритмів, базується на трьох ключових показниках: пропускній здатності (throughput), затримці (delay) та коефіцієнті доставки пакетів (PDR — packet delivery ratio).

Зразкову мережу, представлену на 1.5a та 1.5б, було змодельовано за допомогою інструменту Network Simulator 2 (NS-2)[78]. Програмний код симуляції реалізовано мовою TCL (Tool Command Language).

Симуляція проводилася відповідно до послідовності, зображеної на рисунку 3. Було змодельовано та порівняно три методики:

1. Локалізація з урахуванням локалізованості (LAL), що базується на протоколі маршрутизації AOMDV.

2. Метод Water Filling, який використовує протокол маршрутизації DSR (Dynamic Source Routing).

3. Існуючий підхід, а саме — алгоритм згладжування навантаження (Load-based Smoothing Algorithm), реалізований на основі протоколу AODV.

Результати моделювання цих трьох методик наведено нижче для порівняльного аналізу.

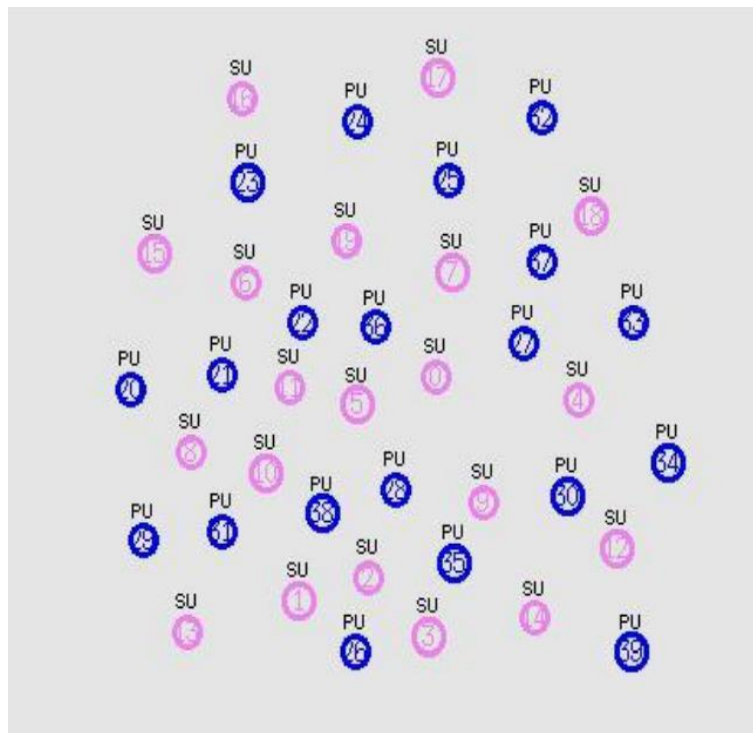


Рисунок 1.5а – Мережа когнітивного радіо змодельована в NS-2

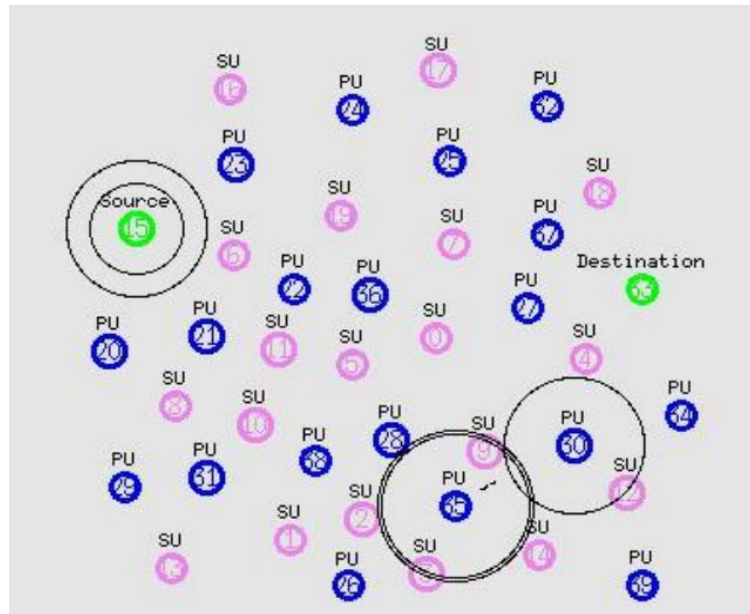


Рисунок 1.56 – мережа когнітивного радіо змодельована в NS-2

Коефіцієнт пропускної здатності, представлений на рис. 1.7, визначається як обсяг даних, що успішно передано з однієї точки в іншу за певний проміжок часу.

Згідно з результатами моделювання, наведеними на рис. 1.7, видно, що пропускна здатність є вищою для протоколу AOMDV у порівнянні з DSR та AODV. Протокол AOMDV демонструє високу ефективність у передаванні даних між вузлами за короткий проміжок часу.

Отже, виходячи з результатів моделювання [13], наведених на рис. 1.6 і 1.7, можна зробити наступні висновки:

У разі, коли ключовим критерієм є досягнення підвищеного коефіцієнта доставки пакетів (PDR), навіть за наявності допустимих втрат, доцільним є використання алгоритму DSR. Водночас, якщо основний акцент робиться на забезпеченні високої пропускної здатності – тобто ефективному передаванні значних обсягів даних у стислі проміжки часу, навіть за умови певних втрат пакетів, найбільш обґрунтованим вибором є алгоритм AOMDV.

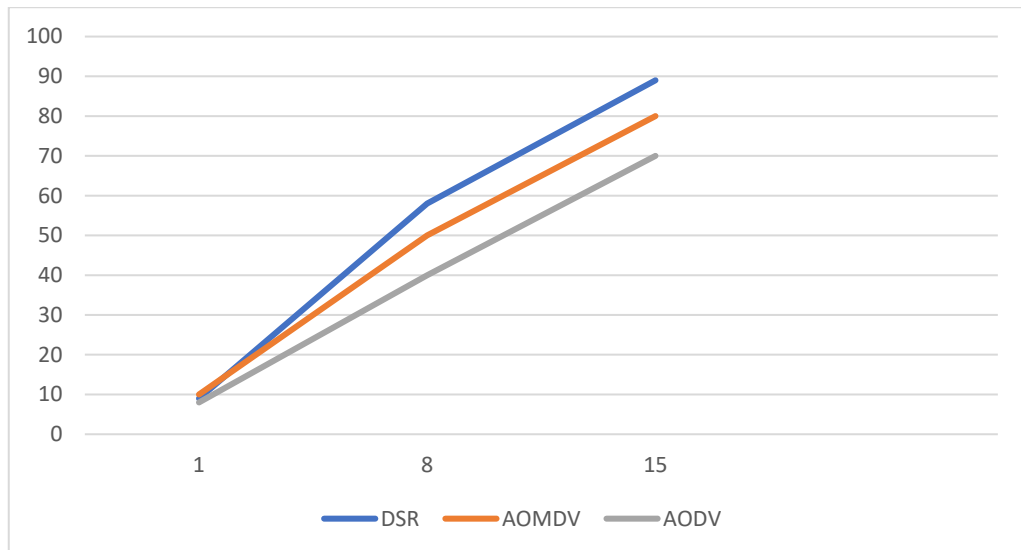


Рисунок 1.6 – Відношення часу до коефіцієнту доставки пакетів

Згідно з результатами моделювання, наведеними на рис. 1.6, найвищий коефіцієнт доставки пакетів характерний для протоколу DSR. Це зумовлено його специфічними механізмами роботи та підвищеною ефективністю. Водночас протокол AOMDV демонструє покращені показники порівняно з класичним AODV.

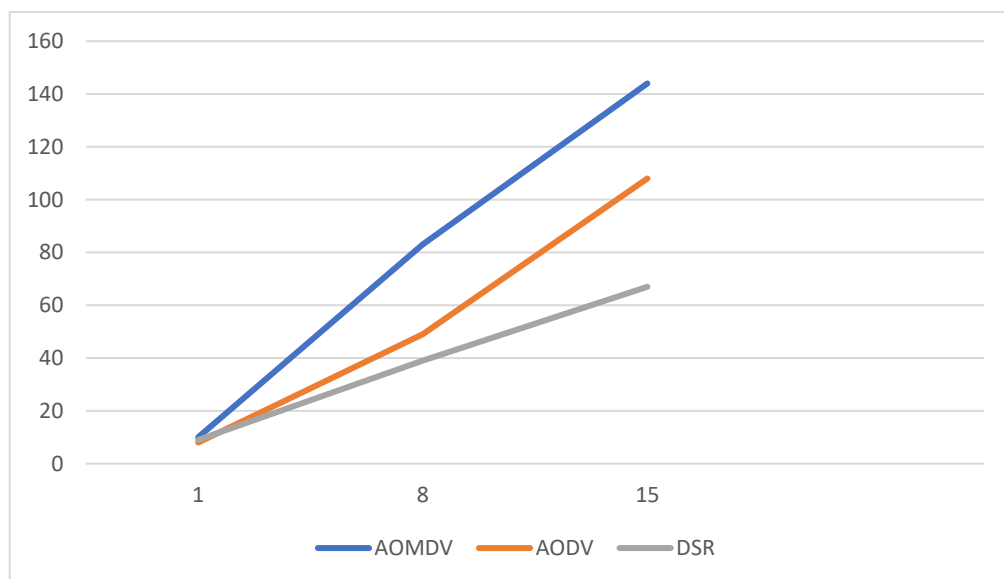


Рисунок 1.7 – Відношення часу до коефіцієнту пропускної здатності

Результати моделювання наскрізної затримки (end-to-end delay) представлено на рис. 1.8. Відповідно до отриманих результатів, AOMDV забезпечує найменші значення затримки порівняно з AODV та DSR. Друге

місце за ефективністю посідає DSR, який також демонструє кращі показники, ніж традиційний алгоритм AODV. Отже, результати моделювання підтверджують, що алгоритм AOMDV та DSR є більш ефективними за AODV з погляду мінімізації часу затримки.

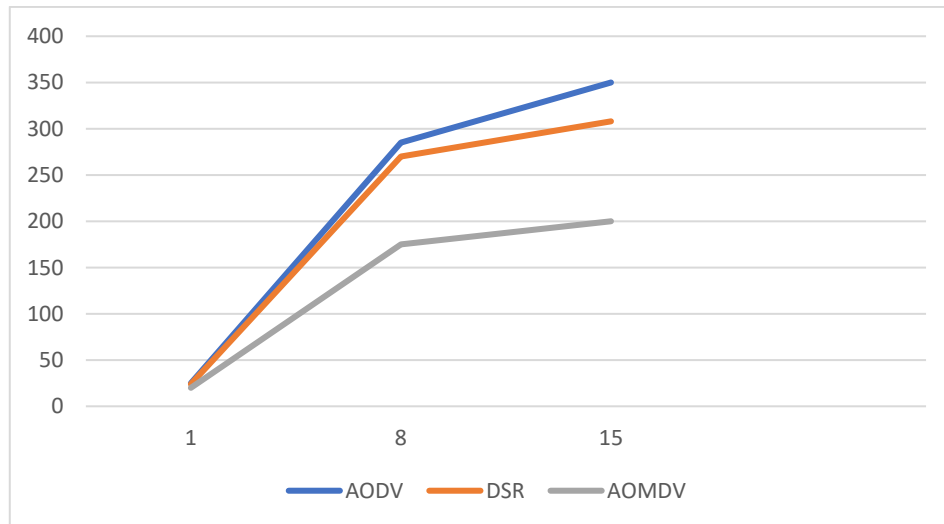


Рисунок 1.8 – Відношення часу до передачі пакетів

У даній роботі здійснено моделювання процесу передавання даних від вузла-джерела до вузла-приймача в когнітивній радімережі. У межах дослідження були застосовані та порівняні протоколи маршрутизації AOMDV, DSR і AODV.

З метою підвищення ефективності мережевої взаємодії запропоновано два підходи: метод локалізації з урахуванням локалізованості (LAL), реалізований на основі протоколу AOMDV, а також метод Water Filling, що базується на використанні протоколу DSR. Окрім цього, як наявний підхід було проаналізовано алгоритм балансування навантаження (Load-based Smoothing Algorithm), який функціонує в межах протоколу DSR.

Дослідження охоплює аналіз трьох ключових показників якості обслуговування: пропускної здатності, часу затримки та коефіцієнта доставки пакетів. Отримані результати моделювання для запропонованих та існуючих методів було зіставлено та подано у вигляді графічних залежностей.

1.6.2 Порівняльний аналіз протоколів AODV і WCETT

У бездротових mesh-мережах (WMN) від ефективності механізмів маршрутизації залежить пропускна здатність, затримка[92], надійність доставки та стійкість до інтерференції. Вибір протоколу маршрутизації визначає рівень використання канального середовища, чутливість до змін у топології та здатність мережі забезпечувати QoS. У цьому підрозділі наведено порівняльний аналіз двох принципово різних підходів – реактивного протоколу AODV, який історично застосовувався у мобільних ad hoc мережах[90], та метрики WCETT, що стала базою для побудови ефективних багатоканальних WMN та їх когнітивних модифікацій.

1.6.2.1 Характеристика протоколу AODV

AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) – протокол динамічної маршрутизації для мобільних ad-hoc мереж – належить до реактивних протоколів маршрутизації[88,99]. Його ключова особистість полягає у встановленні маршруту лише за потреби, тобто при появі трафіку від джерела до призначення. Протокол використовує три типи службових повідомлень:

- RREQ (Route Request) – запит маршруту;
- RREP (Route Replay) – відповідь про знайдений шлях;
- RERR (Route Error) – повідомлення про помилку маршруту.

Маршрут зберігається лише протягом часу активної передачі. Перевагою є низький службовий трафік, однак недоліком – затримка, пов'язана з пошуком маршруту, та неспроможність враховувати інтерференцію чи якість каналу.

Схематично роботу AODV можна візуалізувати наступним чином, (рис. 1.9):

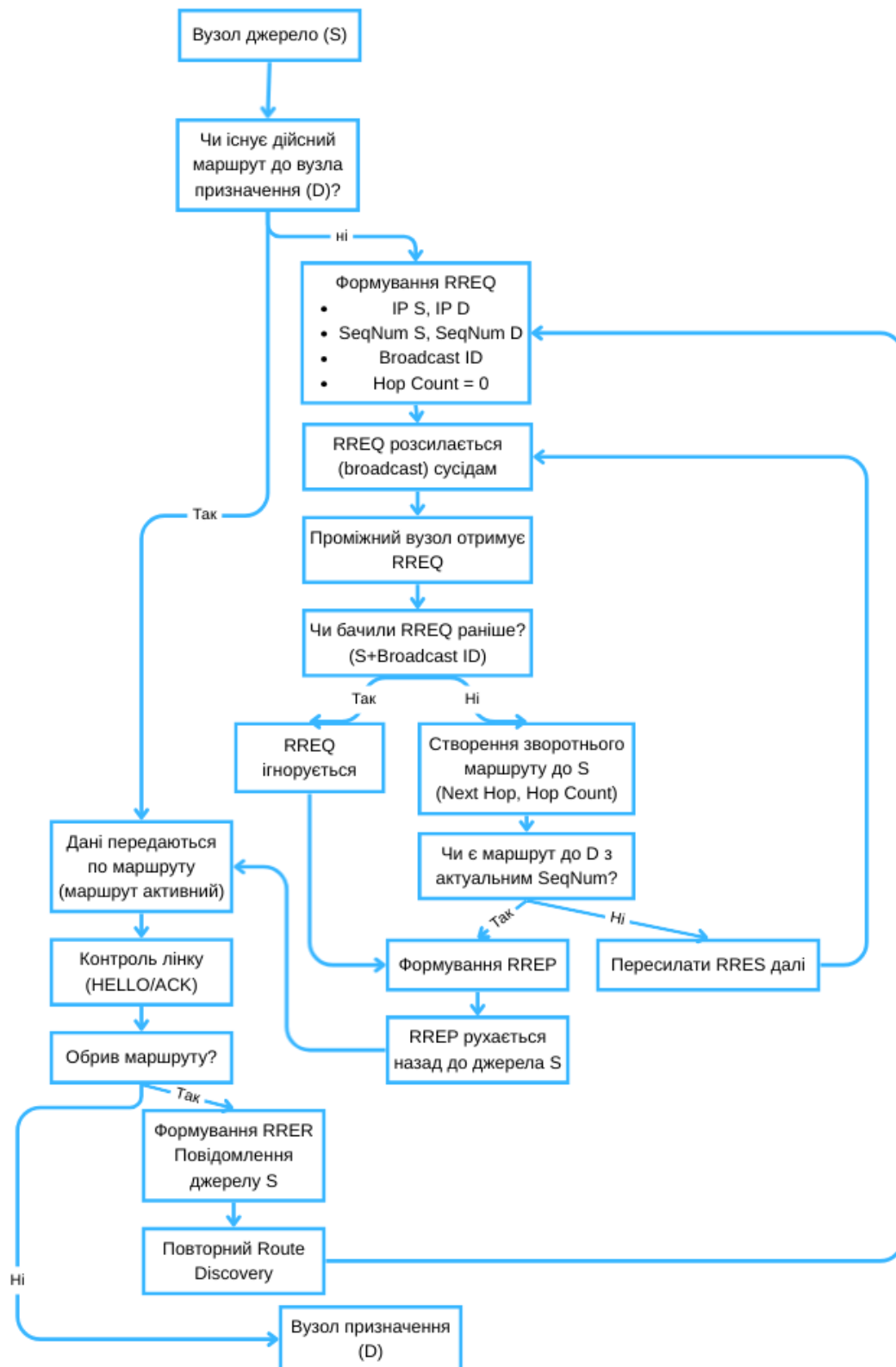


Рисунок 1.9 – Демонстрація реактивної природи протоколу AODV, коли маршрути формуються лише за потреби та підтримуються доти, доки зберігається їх працездатність.

Пояснення роботи блок-схеми:

1. Ініціатором пошуку завжди є вузол-джерело (S, Source) – як тільки S має пакет для D і не має активного маршруту, він запускає процедуру Route Discovery.

2. Вузол S формує RREQ (Route Request), що розсилається широкомовно (broadcast). Кожен вузол перевіряє, чи не отримувал цей RREQ раніше та створює зворотній маршрут до S. Кожен RREQ є унікальним і складається з Source Address + Broadcast ID.

3. У кожному вузлі зберігається таблиця маршрутів, яка містить: Кінцевий вузол (Destination IP); Наступний вузол (Next Hop); Кількість переходів (Hop Count); Актуальність маршруту (Destination SeqNum); Час життя маршруту (Lifetime); Стан (Active Flag). Оскільки маршрути створюються на вимогу, то автоматично видаляються після закінчення часу життя маршруту.

4. Формування відповіді (RREP) за умови що RREQ досяг вузла призначення D, або проміжний вузол має активний маршрут до D, та передається назад по зворотному маршруту.

5. Після отримання RREP маршрут вважається активним та починається передача даних.

6. Підтримка маршруту (Route Maintenance) відбувається за рахунок HELLO-повідомлень або підтвердженні передач. При втраті лінку формується новий RREQ і джерело запускає новий пошук маршруту.

Математична модель маршруту в AODV

AODV мінімізує кількість стрибків (hop-count), тобто довжину маршруту:

$$R_{AODN} = \arg \min_{r \in R} \sum_{i=1}^{n_r} 1 \quad (1.1)$$

де R – множина можливих маршрутів; n_r – кількість стрибків у маршруті r .

Таким чином, AODV орієнтується на топологічну мінімальність, проте не враховує пропускну здатність з'єднання, якість каналу, інтерференцію, спектральну доступність або затримку на каналі[81].

1.6.2.2 Характеристика метрики WCETT

WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time) – спеціалізований мережевий показник, який використовується алгоритмами маршрутизації в бездротових mesh-мережах – була створена спеціально для багатоканальних WMN. На відміну від AODV, схема роботи WCETT не зосереджується на процесі пошуку маршруту, а відображає механізм його оцінювання та вибору на основі показників якості. Початково для кожного лінку маршруту визначається очікуваний час передачі пакета (ETT), після чого здійснюється агрегація цих значень уздовж всього маршруту. Паралельно проводиться аналіз розподілу лінків за радіоканалами з метою виявлення найбільш навантаженого каналу, що визначає рівень внутрішньопотокової інтерференції. Остаточне значення WCETT формує шляхом зваженого поєднання сумарної затримки та максимального каналного навантаження.

Схематичне подання метрики WCETT має вигляд, наведений на рис. 1.10:



Рисунок 1.10 – Схема роботи метрики WCETT

Дана схема ілюструє, що WCETT орієнтована не на мінімізацію кількості стрибків, а на комплексну оптимізацію часових і спектральних характеристик маршруту. В її основі лежить показник очікуваного часу передачі пакета через окремий лінк (ЕТТ), який враховує пропускну здатність каналу та ймовірність повторних передач. Для всього маршруту WCETT поєднує сумарну затримку з показником максимальної завантаженості одного каналу, що дозволяє оцінити рівень внутрішньопотокової інтерференції. Баланс між цими складовими визначається ваговим коефіцієнтом β . У результаті перевага надається маршрутам, які не лише є короткими за часом передачі, але й забезпечують більшу різноманітність каналів уздовж шляху.

Таким чином, WCETT орієнтована на оптимізацію пропускну здатності та затримок у стаціонарних або квазістаціонарних сітчастих мережах, де доступна інформація про параметри каналів.

Базова метрика ETT

В основі WCETT лежить метрика ETT (Expected Transmission Time), яка оцінює час необхідний для доставки пакету по каналу:

$$ETT_i = \frac{S}{B_i(1-p_i)}, \quad (1.2)$$

де S – розмір пакета, B_i – пропускна здатність каналу на з'єднанні i , p_i – ймовірність втрати пакета.

ETT дозволяє врахувати реальний час передачі з'єднання, тоді як прості метрики (hop-count) цього не роблять.

Метрика WCETT

WCETT об'єднує значення ETT для всіх стрибків маршруту з урахуванням використання каналів:

$$WCETT = (1 - \beta) \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta \max_{1 \leq k \leq K} X_k, \quad (1.3)$$

де n – кількість стрибків у маршруті, K – кількість доступних каналів, X_k – сума всіх ETT для стрибків, що використовують канал k , β – ваговий коефіцієнт ($0 \leq \beta \leq 1$), який визначає баланс між пропускною здатністю та зменшенням інтерференції.

- Перша частина $(1 - \beta) \sum ETT_i$ мінімізує загальний час передачі.
- Друга частина $\beta \max X_k$ мінімізує інтерференцію шляхом розподілу стрибків між каналами (channel diversity).
- β дозволяє обрати різні стратегії:
 - при $\beta \rightarrow 0$ – мінімізація затримки;
 - при $\beta \rightarrow 1$ – мінімізація інтерферентності.

Таким чином, WCETT є метрикою, орієнтованою на QoS, із вбудованим механізмом оптимізації багатоканальності.

1.6.2.3 Порівняння архітектурних підходів

Таблиця 1.3 – Тип протоколу

Характеристика	AODV	WCETT
Тип	Реактивний протокол	Метрика для протоколів багатоканальної маршрутизації
Спосіб роботи	Пошук маршруту «за потреби»	Постійна оцінка якості шляхів
Призначення	Мобільні ad hoc мережі	Стаціонарні та когнітивні WMN

Таблиця 1.4 – Підтримка QoS

Параметр	AODV	WCETT
Затримка	Не оптимізується	Враховується через ETT
Інтерференція	Не враховується	Враховується через X_k
Пропускна здатність	Не враховується	Математично інтегрована у метрику
Надійність	Залежить від RERR	Підсилена оцінкою витрат p_i
QoS	Низька	Висока

Таблиця 1.5 – Вплив багатоканальності

Характеристика	AODV	WCETT
Підтримка кількох каналів	Відсутня	Повна
Мінімізація інтерференції	Немає механізму	$\beta \max X_k$
Channel diversity	Немає	Є

WCETT фактично створений для багатоканальних mesh-систем, що дозволяє значно зменшити колізії.

1.6.2.4 Придатність до когнітивного радіо

WCETT може бути розширена до CR-WCETT, додавши вагові коефіцієнти доступності спектра чи активності первинних користувачів:

$$WCETT_{CR} = WCETT + \gamma PU_activity \quad (1.4)$$

AODV також може бути модифікований, однак він не має вбудованого механізму адаптації до спектру.

1.6.2.5 Порівняльний аналіз ефективності

- Затримка передачі – AODV має додаткову затримку на етапі пошуку маршруту; WCETT мінімізує затримку через оптимізацію ETT на кожному стрибку.
- Пропускна здатність – у багатоканальних системах: $Throughput_{WCETT} > Throughput_{AODV}$, що обумовлено використанням каналів із нижчою інтерференцією.
- Надійність маршруту – AODV залежний від мобільності та частоти RERR; WCETT використовує статистичні параметри (втрати, швидкість каналу), тому його маршрути стабільніші.

Порівняльний аналіз показує, що протокол AODV та метрика WCETT належать до різних парадигм маршрутизації. AODV є мінімалістичним, використовує просту топологічну модель та підходить для мобільних мереж, де критичною є швидкість адаптації маршруту та низький службовий трафік. Натомість WCETT орієнтована на продуктивність, оптимізує пропускну здатність та мінімізує інтерференцію, що робить її однією з найбільш ефективних основ для маршрутизації у WMN та когнітивних мережах.

WCETT та її модифікації дозволяють досягати значно вищого рівня QoS, особливо в умовах багатоканального доступу або динамічно змінного спектра. У мережах, де велике значення мають пропускна здатність, джиттер та різноманітність каналів, WCETT суттєво перевершує AODV за всіма ключовими характеристиками.

Висновки за розділом 1

1. Проведений аналіз сучасного стану бездротових mesh-мереж свідчить, що їх ефективність обмежується дефіцитом радіочастотного спектра, що ускладнює забезпечення QoS для застосування в умовах реального часу.
2. Використання технології когнітивного радіо дозволяє підвищити ефективність використання спектра, однак інтеграція WMN і CR у CR-WMN ускладнює задачі маршрутизації через динамічну доступність спектра та активність первинних користувачів.
3. Сучасні підходи до забезпечення QoS у програмно-визначених мережах та їх основні обмеження, пов'язані з масштабованістю, навантаженням на контролер і суттєво ускладнюють керування в гетерогенних середовищах.
4. Існуючі підходи до маршрутизації CR-WMN переважно враховують лише окремі аспекти функціонування мережі, тоді як комплексні QoS-орієнтовані рішення з урахуванням динаміки спектра залишаються недостатньо розробленими.
5. Проведений порівняльний аналіз протоколів маршрутизації AOMDV, DSR та AODV показав залежність їх ефективності від QoS-вимог, при цьому AOMDV забезпечує вищу пропускну здатність і менші затримки, тоді як DSR – вищий коефіцієнт доставки пакетів.

РОЗДІЛ 2.

ОНТОЛОГІЧНА І МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛІ МАРШРУТИЗАЦІЇ У КОГНІТИВНИХ БЕЗДРотовИХ СІТЧАСТИХ МЕРЕЖАХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

2.1 Постановка задачі маршрутизації з урахуванням QoS

Сучасні бездротові сітчасті мережі (Wireless Mesh Networks, WMN) відіграють ключову роль у забезпеченні високодоступних комунікацій у гнучких розподілених інфраструктурах. Зростання обсягів трафіку та поширення сервісів із жорсткими вимогами до якості обслуговування (Quality of Service, QoS) істотно підвищують вимоги до ефективності та надійності механізмів маршрутизації. Традиційні протоколи маршрутизації, розроблені для мереж загального призначення, не здатні забезпечити гарантовані QoS-показники в умовах високої конкуренції за ресурси та змінного радіосередовища. Одночасно з цим, упровадження технологій когнітивного радіо (Cognitive Radio, CR), що забезпечують динамічний доступ до спектра (Dynamic Spectrum Access, DSA)[63,72,73], створює додаткові можливості для підвищення ефективності використання спектральних ресурсів, але також зумовлює нові виклики для забезпечення стабільної передачі даних.

У когнітивних WMN доступність радіоканалів визначається активністю первинних користувачів (Primary Users, PU)[66], що у будь-який момент часу можуть зайняти канал, спричиняючи вимушені зміни маршруту, переналаштування радіопараметрів або зупинку передачі. Це призводить до зростання затримок, втрат і нестабільності потоків, що особливо критично для сервісів реального часу. Таким чином, інтеграція механізмів QoS та когнітивного доступу до спектра в єдину оптимізаційну модель маршрутизації є необхідною умовою для збереження надійності та ефективності функціонування CR-WMN.

На основі аналізу наявних протоколів маршрутизації у середовищах WMN та CR-WMN, таких як AOMDV, DSR, AODV і WCETT, було виявлено

їхні ключові переваги та обмеження в контексті багатоканального доступу та динамічної активності PU. Як результат, у даній роботі запропоновано новий протокол маршрутизації — mWCETT, який поєднує реактивний механізм AODV з багатоканальною метрикою WCETT. Протокол mWCETT використовує масив мережевих характеристик, таких як пропускна здатність, наскрізна затримка, стабільність і шаблони використання каналів, а також враховує активність первинних користувачів (PU). Такий підхід забезпечує ефективне прийняття рішень щодо маршруту на основі обізнаності про спектр і динамічних умов середовища, сприяючи підвищенню якості обслуговування в когнітивних бездротових mesh-мережах.

Запропонований протокол маршрутизації mWCETT ґрунтується на використанні розподілених локальних знань про спектр, що дозволяє кожному вузлу в мережі генерувати інформацію про своїх безпосередніх сусідів. Інформація про ці локальні знання розповсюджується між сусідніми вузлами через спільний канал керування (Common Control Channel, CCC). Для мінімізації накладних витрат на маршрутизацію припускається, що всі вузли налаштовані на цей канал керування, що дозволяє уникнути необхідності трансляції контрольних пакетів через усі канали мережі.

Пакети запиту маршруту (RREQ) і відповіді на маршрут (RREP) передаються через CCC. Вихідний вузол генерує пакет RREQ і надсилає його до сусідніх вузлів через цей канал. Вузли, що отримують пакет RREQ, перевіряють, чи збігається IP-адреса призначення з їх власною. Якщо вузол, що отримав пакет RREQ, не є вузлом призначення, він повторно транслює пакет. У випадку, коли IP-адреса збігається, вузол-одержувач генерує пакет RREP і надсилає його назад до вихідного вузла через шлях, пройдений пакетом RREQ.

Отримавши пакет RREP, вихідний вузол вибирає найкращий доступний канал для передачі даних. Записи в таблиці доступності каналів сортуються або ранжуються відповідно до моделей використання, при цьому канали з найкращими характеристиками розміщуються на верхніх позиціях таблиці.

Для передачі даних вибирається перший канал, що знаходиться в таблиці. Всі проміжні вузли дотримуються цього самого процесу вибору найкращого каналу в таблиці доступності каналів для пересилання пакетів даних.

Для визначення оптимального маршруту між джерелом і вузлом призначення в запропонованому протоколі маршрутизації *mWCETT* реалізовано три ключові метрики: очікувану кількість передач (ETX), очікуваний час передачі (ETT) і зважену сукупну очікувану затримку передачі (WCETT).

Метрика ETX (Expected Transmission Count) дозволяє оцінити надійність каналу, визначаючи середню кількість передач на рівні MAC, необхідних для успішної доставки пакета до пункту призначення. Вона слугує індикатором втрат пакетів у каналі.

Метрика ETT (Expected Transmission Time) розширює ETX, враховуючи швидкість передачі даних через канал, що дозволяє точніше оцінити вартість шляху з погляду затримки, пов'язаної з передачею.

Третьою складовою є метрика WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time), яка поєднує затримку та пропускну здатність, пропонуючи збалансований підхід до вибору маршруту. Вона враховує не лише загальний час передачі, але й розподіл трафіку між каналами, що дозволяє зменшити вплив вузьких місць у спектрі.

Крім того, у запропонованому протоколі запроваджено ймовірнісну змінну P_c , яка характеризує ймовірність зайнятості каналу через активність основного користувача (PU). Ця змінна забезпечує додаткову інформацію про доступність кожного каналу для вторинного користувача (SU), дозволяючи обирати маршрути з мінімальним ризиком перешкод.

Відповідно, сформульована метрика маршрутизації, яка враховує всі зазначені параметри, представлена у рівнянні (2.1):

$$mWCETT_{metric} = (1 - \alpha) \sum ETT_i + [(1 - P_c) \alpha \max X_c] \quad (2.1)$$

Змінна P_c визначає ймовірність того, що канал c із загального набору доступних каналів C буде недоступним для використання. У рамках

запропонованого підходу передбачається, що кожен вузол вторинного користувача (SU) здатен локально здійснювати моніторинг та обчислювати ймовірнісну характеристику доступності каналу на основі статистичних даних про використання спектру первинними користувачами (PU). У практичному контексті це означає, що вузли SU обмінюються локальними знаннями про спектральне середовище зі своїми безпосередніми сусідами.

Такий обмін інформацією забезпечує можливість формування узагальненого уявлення про спектральну доступність у межах усієї мережі. Застосовуючи зібрану статистику активності PU з таблиць доступності каналів, запропонована метрика маршрутизації дозволяє визначати маршрути з більшою стабільністю, віддаючи перевагу каналам із нижчою ймовірністю втручання з боку PU. Відповідно, це сприяє формуванню більш надійних маршрутів між джерелом та вузлом призначення, що особливо важливо в умовах динамічного середовища CR-WMN.

Протокол маршрутизації mWCETT реалізує `mwcett_metric` (визначену у 2.1) для вибору найкращих маршрутів. Дана модель системи використовує дві радіостанції, де одна радіостанція контролює доступність каналів, а друга радіостанція використовується для передачі даних. У будь-який момент часу кожен вузол SU відстежує діяльність PU на наборі виділених каналів і пов'язує відповідні значення ймовірності для кожного каналу на основі активності PU. У кожному випадку під час процесу встановлення маршруту пакет RREP генерується на основі метрики маршрутизації в рівнянні (2.1). Найнижче значення метрики використовується для визначення найкращого маршруту, і, отже, пакети даних передаються за вибраним шляхом. Архітектура проєкту, реалізована в мережі SU, проілюстрована на рис 2.1.

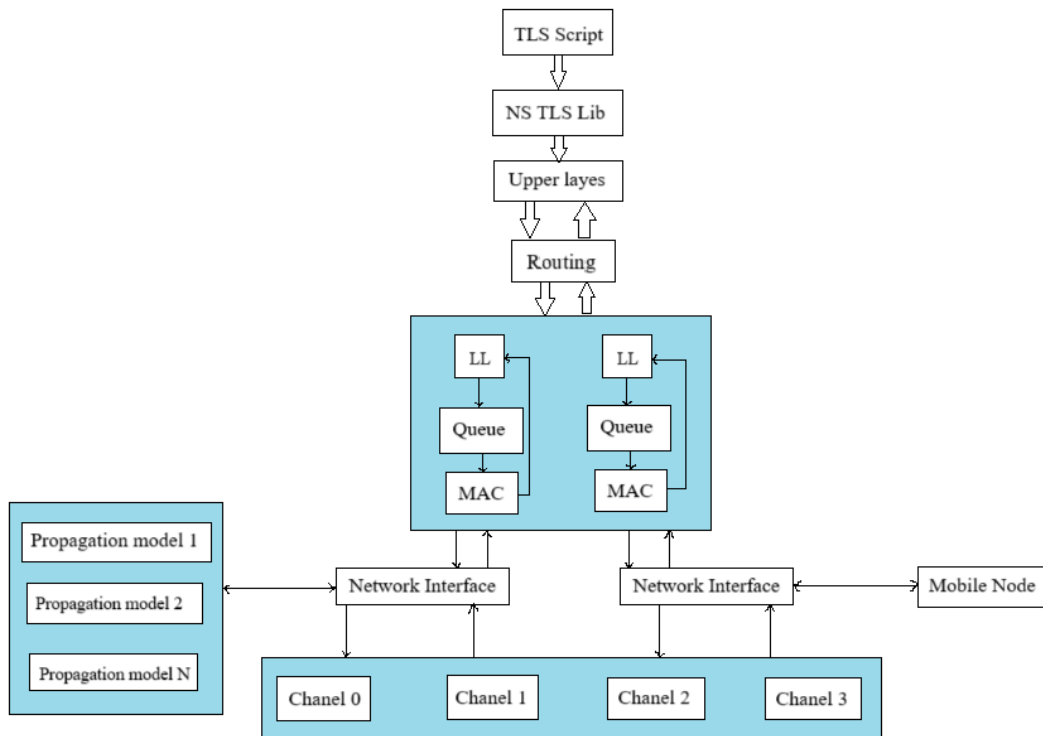


Рисунок 2.1 – Архітектура проекту

Протокол маршрутизації mWCETT реалізовано на основі мультирадіо багатоканальної архітектури. Сценарій TCL використовувався для налаштування кількості радіостанцій і каналів, необхідних для моделювання. У даному дослідженні кількість радіостанцій було встановлено на два, а кількість каналів, призначених для кожного радіо, було встановлено на чотири, щоб точно імітувати ідеальну функціональність CR-WMN.

2.2 Онтологічна модель метрики mWCETT у процесі маршрутизації CR-WMN

Метрика mWCETT (modified Weighted Cumulative Expected Transmission Time) розглядається не лише як числова функція оцінювання маршруту, а як формалізований механізм прийняття рішень, структура якого визначається онтологічною моделлю когнітивної бездротової сітчастої мережі. Основна ідея полягає в тому, що параметри маршрутизації в CR-WMN перебувають у

складних практично-наслідкових зв'язках, які неможливо коректно врахувати без явного семантичного опису.

Онтологія системи задає формальний простір понять, зв'язків, обмежень і правил, у межах якого формується та адаптується метрика.

Онтологічна модель дозволяє:

- Формалізувати процес вибору маршруту;
- Описати взаємодію когнітивних механізмів спектрального доступу з батьківською метрикою WCETT;
- Забезпечити можливість подальшої оптимізації через семантичні правила та логічні обмеження.

В наступних підрозділах подано структуру моделі у вигляді онтологічних класів та їх взаємозв'язків.

2.2.1 Формальна модель онтології

Онтологічна модель $mWCETT$ описується кортежем:

$$O_{mWCETT} = \langle C, R, P, A, \Omega \rangle \quad (2.2)$$

де C – множина класів мережі (вузли, канали, лінки, маршрути, спектральні ресурси), R – множина семантичних відношень між ними, P – параметри, що використовуються у метриці маршрутизації, A – правила логічного вводу, а Ω – система обмежень, що визначає допустимі стани маршрутів.

Суттєво, що саме множини A та Ω забезпечують перехід від статичної метрики до контекстно адаптивної.

2.2.2 Структура онтологічної моделі

Онтологічна модель $mWCETT$ складається з множини класів, властивостей та аксіом, що описують ключові елементи когнітивної мережі та їх взаємозв'язки.

Клас *Node* – описує вузли CR-WMN і включає такі підкласи як:

- *PrimaryUser (PU)* – ліцензований користувач спектра;

- *SecondaryUser (SU)* – когнітивний вузол, що здійснює маршрутизацію.

Кожен вузол характеризується рівнем залишкових ресурсів, радіоінтерфейсами, роллю в маршруті та має наступні параметри:

- ID – унікальний ідентифікатор;
- AvailableChannels – множина доступних каналів після спектрального сканування;
- ETT_i – очікуваний час передачі по каналах;
- PU_Activity – спостережувана активність первинних користувачів (Primary Users).

Клас *Link* – описує логічне з'єднання між двома вузлами SU та каналний сегмент між вузлами. Параметри:

- ETT – очікуваний час передачі:

$$ETT = \frac{S}{B} \times \frac{1}{1-e} \quad (2.3)$$

де:

S – розмір пакета;

B – пропускна здатність;

e – імовірність помилки.

Примітка: ETT є очікуваним часом одного успішного передавання кадру.

- Channel – вибраний частотний канал.
- Interference – рівень міжканальної інтерференції.

Клас *Channel*. Параметри:

- Frequency – частота передачі.
- Bandwidth – пропускна здатність (максимальна кількість даних, що може бути передана через мережеве з'єднання за одиницю часу).
- PU_presence – наявність первинного користувача.
- QualityIndex – агрегований показник якості каналу.

Клас *SpectrumResource* – описує спектральні ресурси, що доступні для SU та забезпечує когнітивну складову метрики mWCETT:

- частотний діапазон;
- часові спектральні вікна;
- ймовірність появи PU.

Клас *QoSMetric* – формалізує вимоги трафіку:

- максимальна допустима затримка;
- мінімальна пропускна здатність;
- допустимий рівень втрат пакетів;

Клас *InterferencePath* – джерело перешкод.

Клас *RoutingPath* – маршрут передавання.

Клас *CognitiveContext* – поточний когнітивний стан мережі.

Відношення між класами:

- usesChannel (Node, Channel)
- formsLink (Node_i, Node_j) → Link
- experiencesInterference (Link, InterferenceSource)
- occupies (PU, SpectrumResource)
- isAvailable (SpectrumResource, Channel)
- consistsOf (RoutingPath, Link)
- evaluatedBy (RoutingPath, QoSMetric)
- contextualizedBy (QoSMetric, CognitiveContext)

Таблиця 2.1 Взаємозв'язок онтології з параметром mWCETT

Клас онтології	Властивість / зв'язок	Параметр у формулі mWCETT	Пояснення
Мережевий вузол – NetworkNode	Роль – Role (PU/SU)	Впливає на доступність каналу	Визначає, чи вузол є первинним користувачем спектра (PU), чи вторинним (SU).

			Канали PU заборонені для SU – виключаються з маршруту.
Бездротове з'єднання – WirelessLink	Значення ETT – ETTvalue	ETT(i,j)	Прямий внесок у mWCETT. ETT оцінює ефективну затримку передачі пакета між вузлами i та j .
Бездротове з'єднання – WirelessLink	Рівень перешкод – interferenceL evel	Індивідуальна інтерференція $I(i,j)$	Враховується при комбінуванні лінків у сумарну метрику, особливо у багатоканальних сценаріях.
Спектральни й ресурс – SpectrumReso urce	Доступність каналу – channelAvaila bility	$A(i,j,k)$ – доступність каналу k на лінку (i,j)	Використовується для врахування спектрального контексту: якщо канал зайнятий PU, його ефективність зменшується або виключається.
Спектральни й ресурс – SpectrumReso urce	Ймовірність активності PU –	$P_busy(i,j,k)$	Додає когнітивну складову: високий рівень активності PU → штраф для

	PUactivityProbability		метрики mWCETT.
QoS Вимоги – QoS Requirement	Максимальна затримка – maxDelay	Впливає на вагу ETT або інтерференції	Забезпечує адаптацію вагових коефіцієнтів метрики під конкретний клас трафіку (VoIP, data, відео).
QoS Вимоги – QoS Requirement	Мінімальна пропускна здатність – minThroughput	Впливає на вагу ETT	Якщо мінімальна пропускна здатність не задовольняється, маршрут оцінюється гірше або виключається.
Метрика маршрутизації – Routing Metric	Значення метрики – metricWeight	w_ETT, w_int, w_spectrum	Вагові коефіцієнти для об'єднання складових mWCETT; змінюються динамічно через динамічне резонування.
Метрика маршрутизації – Routing Metric	Оцінка – evaluatedBy	$mWCETT(i, j) = f(ETT, interference, spectr)$	Центральний числовий результат, який обчислюється після

			семантичного виведення і адаптації ваг.
--	--	--	---

- *Мережевий вузол* → *роль*

Визначає, які канали і маршрути можна використовувати. PU заборонені для SU → забезпечує когнітивну безпеку спектра.

- *Бездротове з'єднання* → *значення ETT*

Класична складова WCETT, обчислює середній час передачі пакета. Основна числова величина, на яку орієнтується алгоритм.

- *Бездротове з'єднання* → *рівень перешкод*

Враховує перехресну інтерференцію між каналами; дозволяє багатоканальному mWCETT уникати колізій і знижувати затримку.

- *Спектральний ресурс* → *доступність каналу*

Перетворює семантичну інформацію про доступність спектра в числову оцінку для маршрутизації.

- *Спектральний ресурс* → *ймовірність активності PU*

Додає адаптивність: чим більше ймовірність активності PU, тим вища «вартість» лінку.

- *QoS вимоги* → *максимальна затримка/мінімальна пропускна*

здатність

Контекстно орієнтована адаптація: різні типи трафіку впливають на ваги складових mWCETT. Наприклад, VoIP ставить високий пріоритет на затримку.

- *Метрика маршрутизації* → *значення метрики*

Вагові коефіцієнти (w_{ETT} , w_{int} , $w_{spectrum}$) визначають, як складові комбінуються. В онтології вони адаптуються через правила reasoning.

- **Метрика маршрутизації** $\rightarrow$ **оцінка** $\rightarrow$ **mWCETT**

Підсумковий параметр, який використовується алгоритмом маршрутизації для вибору оптимального шляху.

2.2.3 Відображення онтології на формулу mWCETT

Оцінка маршруту P у метриці mWCETT задається виразом:

$$mWCETT(P) = \alpha \sum_{l \in P} ETT_l + \beta S(P) + \gamma I(P) + \delta A(P) \quad (2.4)$$

Ця формула відображає агрегацію чотирьох різних аспектів якості маршруту, кожен з яких має власне онтологічне походження.

Перший доданок $\sum_{l \in P} ETT_l$ описує сумарний очікуваний час передавання пакетів уздовж всього маршруту. Онтологічно він пов'язаний з класом *Link* та властивостями фізичного і канального рівнів. Його роль полягає у відображенні базової пропускної здатності та надійності з'єднань.

Другий доданок $S(P)$ відображає витрати, пов'язані з перемиканням каналів уздовж маршруту. Семантично він виникає з відношення *usesChannel* та відображає когнітивну ціну гетерогенності спектру. Чим частіше маршрут змінює канали, ти вищі затримки синхронізації та переналаштування радіоінтерфейсу.

Третій доданок $I(P)$ характеризує сукупний рівень перешкод, що впливають на маршрут. Він формується на основі відношення *experiencesInterference* і враховує як взаємні перешкоди між SU, так і вплив PU. Цей параметр не є незалежним від ETT , оскільки зростання перешкод безпосередньо погіршує ефективну швидкість передачі.

Четвертий доданок $A(P)$ вводить покарання за недоступність спектру. Його онтологічна основа – зв'язок *isAvailable (Channel, SpectrumResource)*. Цей параметр відображає ризик примусового розриву маршруту через появу первинного користувача.

Вагові коефіцієнти $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ не є сталими константами, а розглядаються як функції когнітивного контексту.

2.2.4 Обмеження онтологічної моделі

Онтологія mWCETT вводить низку обмежень, які визначають допустимість маршрутів ще до їх числового порівняння.

Обмеження доступності спектру формалізуються як:

$$A(P) \leq A_{max} \quad (2.5)$$

Це означає, що маршрути з високою ймовірністю витіснення PU не розглядаються незалежно від їх значень ETT .

Обмеження стабільності маршруту задається через максимальну кількість допустимих перемикань каналів:

$$S(P) \leq S_{max} \quad (2.6)$$

Таким чином, онтологія відсікає маршрути, які є надто фрагментованими у спектральному просторі.

Додатково вводиться семантичне обмеження кореляції, яке забороняє маршрути, де поєднуються високі перешкоди та часті перемикання каналів.

$$HighInterference(P) \wedge HighSwitching(P) \Rightarrow RouteUnstable(P)$$

Онтологічне обмеження ваг:

$$\alpha(P) + \beta(P) + \gamma(P) + \delta(P) = 1 \quad (2.7)$$

Онтологія не дозволяє «перекосів» метрики, а лише перерозподіляє відносну важливість складових.

У межах онтології задаються правила, які встановлюють відповідність між когнітивними станами мережі та вагами метрики. Наприклад, у разі виявлення високої активності первинних користувачів уздовж маршруту, онтологія підсилює вагу компонента $A(P)$, оскільки ризик втрати каналу є критичним фактором.

Аналогічно, за умов високого рівня взаємних перешкод між вторинними користувачами, зростає значення коефіцієнта $\gamma(P)$, що зумовлює перевагу маршрутів із меншою інтерференцією навіть за рахунок збільшення затримки.

Важливим є те, що онтологія враховує кореляцію між параметрами. Наприклад, часті перемикання каналів у зашумленому спектрі

інтерпретуються як ознака нестабільності маршруту, що призводить до одночасного збільшення ваг $\beta(P)$ та $\gamma(P)$.

2.2.5 Правила виводу та їх вплив на структуру метрики

Правила онтологічного виводу визначають, як змінюється форма метрики залежно від контексту. Наприклад, якщо онтологія фіксує високу PU-активність уздовж маршруту, активується правило:

$$PU_Activity(P) = High \Rightarrow \delta(P) \uparrow$$

Це правило означає, що параметр $A(P)$ стає домінуючим, навіть якщо базовий ETT є малим.

Аналогічно, за умов щільної мережі SU та високих взаємних перешкод, активізується правило, що змінює баланс метрики на користь зменшення перешкод, а не мінімізації затримки:

$$HighInterference(P) \Rightarrow \gamma(P) > \alpha(P)$$

Таким чином, формула $mWCETT$, де кожна вага є результатом онтологічного виводу, набуває вигляду:

$$mWCETT(P) = \alpha(P) \sum ETT_l + \beta(P)S(P) + \gamma(P)I(P) + \delta(P)A(P) \quad (2.8)$$

2.2.6 Алгоритм процесу маршрутизації на основі онтології $mWCETT$

Етап 1. Семантичне спектральне сканування

Формально:

$$AvailableChannels(n) = \{c | PU_presence(c) < TH_{PU} \wedge \\ QualityIndex(c) > TH\}$$

Етап 2. Формування набору кандидатів на з'єднання

Вузол формує множину:

$$Candidates = \{Link(n_i, n_j, c) | c \\ \in AvailableChannels(n_i) \cap AvailableChannels\}$$

Етап 3. Обчислення метрик ETT , $WCETT$, $mWCETT$

Для кожного лінку:

$$ETT_{ij} = f(S, B_{ij}, e_{ij}) \quad (2.9)$$

Для маршруту:

$$mWCETT(p) = (1 - \beta) \sum ETT + \beta \max X_k + \gamma CR_Penalty \quad (2.10)$$

Етап 4. Семантична фільтрація маршрутів

IF CR_Penalty > CR_threshold
THEN RejectRoute

Етап 5. Вибір найкращого маршруту

$$BestPath = \arg \min_p mWCETT(p) \quad (2.11)$$

2.2.7 Граф-схема онтологічної моделі

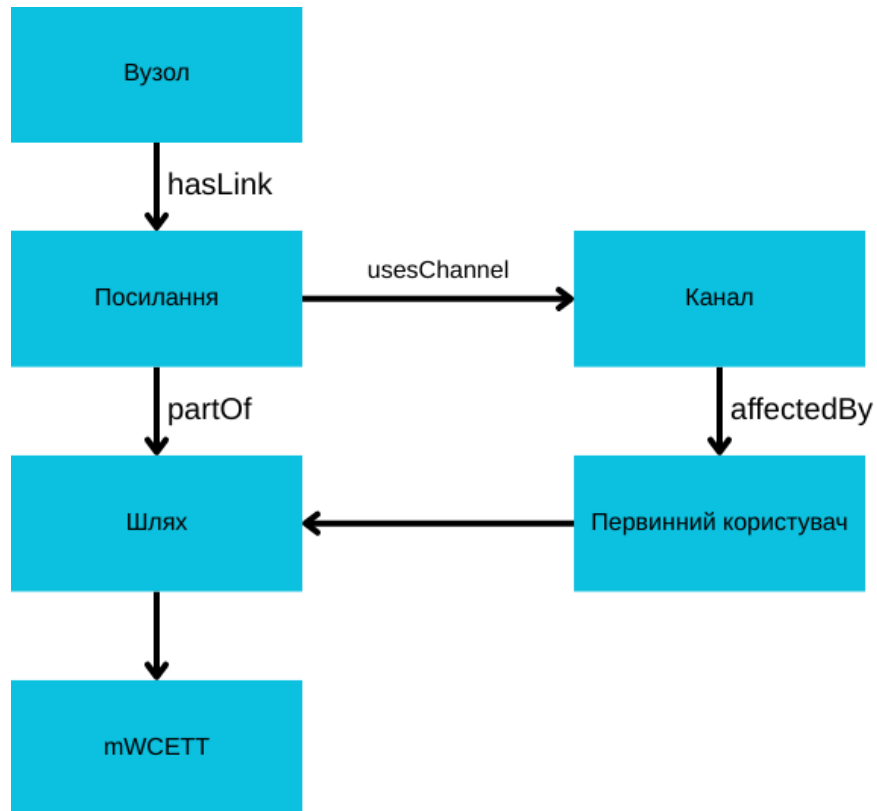


Рисунок 2.2 – Головна онтологічна структура

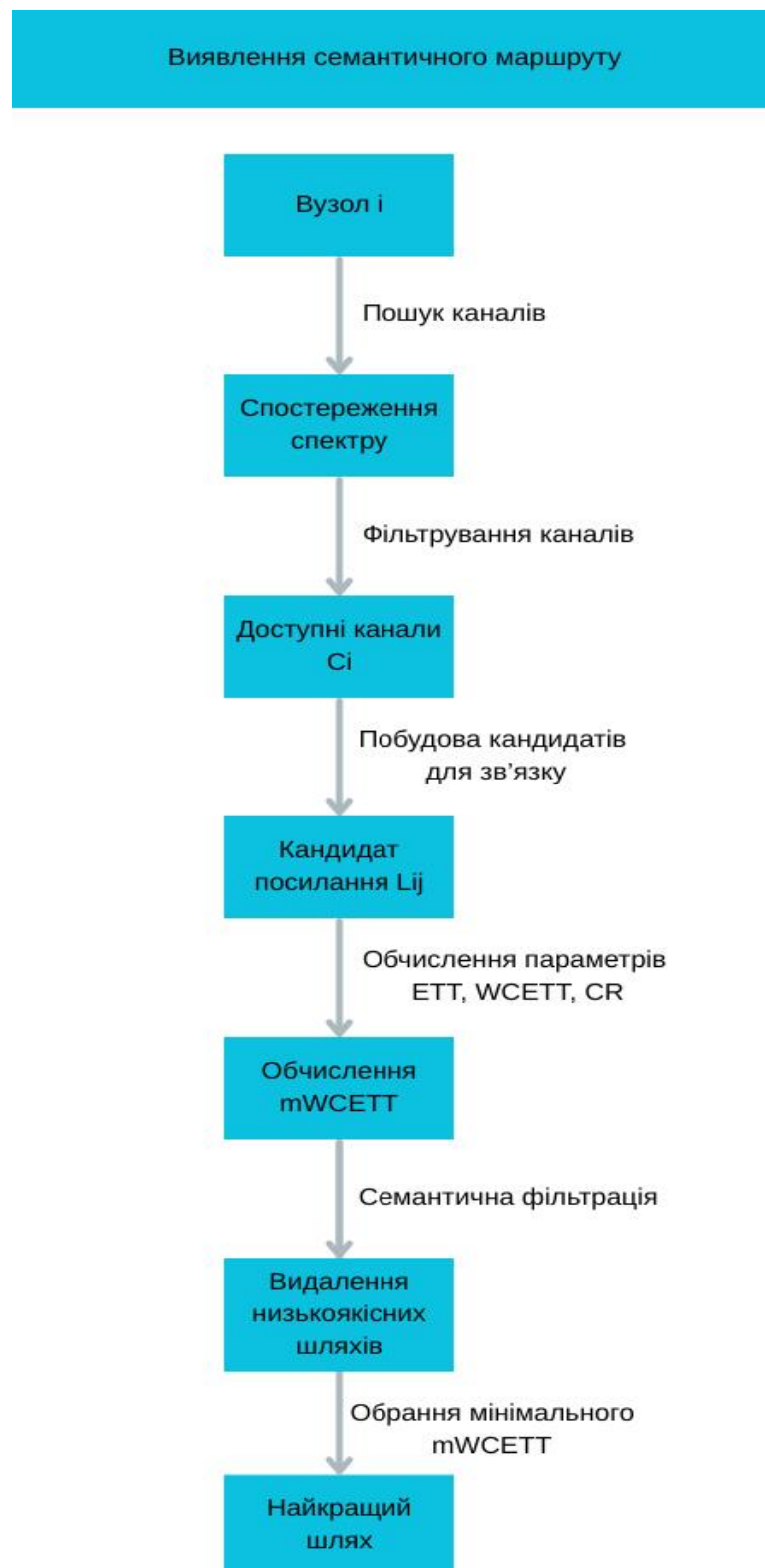


Рисунок 2.3 – Граф-схема процесу маршрутизації

Пояснення граф-схеми

1. Вузол проводить спектральне сканування.

2. Семантичні правила онтології відкидають канали з поганими характеристиками.
3. На основі прийнятних каналів будуються можливі зв'язки.
4. Для кожного маршруту обчислюється метрика $mWCETT$.
5. Маршрути з великим когнітивним ризиком відкидаються базуючись на онтологічних правилах.
6. Обирається маршрут з найменшим значенням $mWCETT$.

У процесі маршрутизації онтологія виконує роль інтерпретатора мережевого стану. Вона забезпечує перехід від сирих вимірювань (рівень шуму, активність PU, зайнятість каналів) до семантично осмислених рішень: допустимий маршрут, нестабільний маршрут, пріоритетний маршрут.

У підсумку, онтологічна модель $mWCETT$:

- визначає, які маршрути можуть існувати;
- формує структуру метрики;
- забезпечує адаптацію вагових коефіцієнтів у реальному часі;
- інтегрує когнітивні властивості CR-WMN без порушень базової логіки AODV/WCETT.

Ця модель є основою для подальшої оптимізації, автоматизації та інтеграції алгоритмів машинного навчання у когнітивні маршрутизатори.

2.3 Математична модель модифікованого протоколу маршрутизації

Метою даного розділу є побудова формальної математичної моделі процесу маршрутизації в багатоканальній бездротовій сітчастій мережі з урахуванням факторів QoS та когнітивних обмежень (динамічна доступність спектру[96], перешкоди, витрати на переключення каналів, тощо). Розглядається метрика $mWCETT$, що сформувалась як результат поєднання реактивних механізмів маршрутизації AODV та багатоканальної QoS-орієнтованої метрики WCETT на основі їх комплементарних властивостей.

Об'єднання не є механічним, а ґрунтується на узгодженні керуючої логіки маршрутизації та критеріїв оптимальності маршруту.

З протоколу AODV у mWCETT були запозичені такі ключові властивості:

- Реактивний характер маршрутизації – маршрути формуються лише за запитом, що дозволяє мінімізувати сигнальний трафік і є критично важливим для динамічних бездротових та когнітивних мереж.
- Механізм пошуку маршруту (RREQ/RREP) – процедура поширення RREQ використовується як транспортний механізм для накопичення значень метрики mWCETT вздовж маршруту.
- Підтримка актуальності маршрутів – використання порядкових номерів (sequence numbers) забезпечує уникнення застарілих маршрутів, що особливо важливо при частій зміні доступності каналів у багатоканальних та CR-сценаріях.
- Механізм локального відновлення маршрутів – Route Error (RERR) і локальне відновлення дозволяють швидко реагувати на розриви каналів або втрату доступності спектра.

З метрики WCETT до mWCETT були успадковані наступні концептуальні елементи:

- Урахування якості каналу через ЕТТ – метрика ЕТТ відображає реальну пропускну здатність каналу з урахуванням втрат і швидкості передачі, що дозволяє оцінювати QoS-параметри маршруту[100].
- Багатоканальна обізнаність – WCETT мінімізує внутрішньо-маршрутну інтерференцію за рахунок штрафування маршрутів з надмірним використанням одного й того ж каналу.
- Компроміс між затримкою та пропускну здатністю – параметр зважування (β) дозволяє балансувати між мінімізацією сумарного часу передачі та зменшенням каналної конкуренції.

Об'єднання цих протоколів відбулося на основі узгодження властивостей: розділення функцій керування та оптимізації – AODV відповідає за логіку побудови та підтримки маршруту, тоді як WCETT визначає критерій вибору оптимального маршруту; адитивність метрики – WCETT є частково адитивною метрикою, що дозволяє її інкрементальне обчислення під час поширення RREQ – ключова вимога для інтеграції з AODV; підтримка багатокритеріальної оптимізації без ускладнення протоколу – зміна hop-count у AODV на mWCETT не потребує радикальних змін у сигнальних повідомленнях що зберігає масштабованість протоколу.

Протокол mWCETT сформований на основі реактивної керуючої логіки AODV та багатоканальної QoS-орієнтованої метрики WCETT, що дозволяє поєднати низькі накладні витрати маршрутизації з підвищеною пропускну здатністю та зменшенням внутрішньомаршрутної інтерференції за рахунок адитивної багатокритеріальної оцінки якості маршруту, що відрізняється від існуючих підходів використанням когнітивно-обізнаних розширень метрики.

2.3.1 Вхідні параметри мережі

Нехай мережа задається орієнтованим графом:

$$\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}), \quad (2.12)$$

де $\mathcal{V}$ – множина вузлів, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ – множина ребер. Нехай доступно K частотних каналів, що не перекриваються: множина каналів $\mathcal{C} = \{1, \dots, K\}$. Кожне ребро $e \in \mathcal{E}$ має приписаний канал $ch(e) \in \mathcal{C}$ (залежно від конфігурації або вільного вибору) та параметри, описані нижче.

Доступність кожного каналу $c \in \mathcal{C}$ у момент часу t визначається станом активності первинного користувача та позначається змінною $a_c(t)$, яка може бути детермінованою, стохастичною або прогнозованою на основі історичних даних сенсингу.

Маємо множину потоків даних:

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}, \quad (2.13)$$

Для кожного з них задано вимоги до QoS: мінімальна пропускна здатність B_f , максимальна затримка D_f^{max} , допустима ймовірність втрат L_f^{max} . Необхідно визначити маршрут P_f та параметри передачі для кожного потоку з урахуванням доступності каналів і інтерференційних обмежень.

2.3.2 Математичне формулювання задачі

Постановка задачі маршрутизації в CR-WMN з урахуванням QoS формалізується як задачі багатокритеріальної оптимізації зі змінними:

- $X_{f,e} \in \{0,1\}$ – використання ребра e маршрутом потоку f ;
- $Y_{e,c}(t) \in \{0,1\}$ – призначення каналу c ребру e ;
- P_e – потужність передавання на ребрі e .

Цільова функція

Оскільки метою є одночасне забезпечення QoS та зменшення інтерференції, розглядається багатокритеріальна оптимізація:

$$\min J = \alpha \sum_{f \in F} Delay_f + \sum_{f \in F} \left(1 - \frac{Throughput_f}{B_f} \right) + \gamma \sum_{e \in E} Interference_e, \quad (2.14)$$

де α, β, γ – вагові коефіцієнти.

Обмеження задачі:

1. Маршрутизаційні обмеження:

$$\sum_{e \in \delta^+(v)} x_{f,e} - \sum_{e \in \delta^-(v)} x_{f,e} = \begin{cases} 1, v = s_f, \\ -1, v = d_f, \\ 0, \text{інакше;} \end{cases} \quad (2.15)$$

що задає умови збереження потоку.

2. QoS-обмеження:

$$Throughput_f \geq B_f, \quad Delay_f \leq D_f^{max}, \quad Loss_f \leq L_f^{max}. \quad (2.16)$$

3. Обмеження доступності спектра для каналів когнітивного радіо:

$$y_{e,c}(t) \leq a_c(t), \quad \forall e \in E, c \in C. \quad (2.17)$$

4. Інтерференційні обмеження щодо PU та інших вузлів:

$$\sum_{e \in N_j} p_e g_{e,j} \leq I_j^{max}, \quad (2.18)$$

де $g_{e,j}$ – коефіцієнт затухання від ребра e до PU_j .

5. Обмеження радіоресурсів – обмежена кількість інтерфейсів та одночасних каналів на вузол. У загальному випадку задача є NP-складною, що обумовлює необхідність розробки ефективних евристичних та гібридних методів її розв’язання.

2.3.3 Модель мережі та позначення

Параметри з’єднання:

- R_e – фізична швидкість (біт/с), доступна на ребрі e .
- S – розмір пакета (біт), який використовується при обчисленні ЕТТ (може бути типовим/середнім).
- ETX_e – очікувана кількість передач для успішної доставки пакету по з’єднанню e .
- ETT_e – очікуваний час передачі по ребру e , визначається як:

$$ETT_e = ETX_e \times \frac{S}{R_e} \quad (2.19)$$
- $O_s(t) \in [0,1]$ – зайнятість каналу s у момент часу t джерелами пріоритетних користувачів (первинні користувачі). Використовується для визначення доступності.
- A_e – коефіцієнт доступності ребра e (можна визначити як $A_e = 1 - O_{ch(e)}$) або як імовірність доступності каналу на цьому ребрі в часовому інтервалі передачі).
- I_e – локальна метрика перешкод для ребра e . Нормалізована так, щоб $I_e \in [0,1]$ (0 – немає перешкод, 1 – сильні перешкоди).
- t_{sw} – затримка на перемикання радіо з одного каналу на інший (середній час).
- $s(k, l)$ – вартість переключення з каналу k на канал l . Може бути представлена як $s(k, l) = t_{sw} + \eta(k, l)$, де η – додаткові витрати (наприклад, втрати пакетів під час переключення).

Шлях:

Нехай $P = (v_0, v_1, \dots, v_n)$ – шлях від вузла-джерела v_0 до вузла призначення v_n . Позначимо множину ребер цього шляху $\mathcal{E}(P) = \{e_1, \dots, e_n\}$, де $e_i = (v_{i-1}, v_i)$. Для кожного каналу $k \in \mathcal{C}$ визначимо сумарний ЕТТ, що проходить по каналу k на шляху P :

$$X_k(P) = \sum_{e \in \mathcal{E}(P), ch(e)=k} ETT_e \quad (2.20)$$

Сумарний ЕТТ по всьому шляху:

$$ETT_{sum}(P) = \sum_{e \in \mathcal{E}(P)} ETT_e + \sum_{k=1}^K X_k(P). \quad (2.21)$$

2.3.4 Класична WCETT

Класична метрика WCETT для шляху P визначається наступним чином (одна з поширених форм):

$$WCETT_{\alpha}(P) = (1 - \alpha)ETT_{sum}(P) + \alpha \max_{1 \leq k \leq K} X_k(P), \quad (2.22)$$

де $\alpha \in [0,1]$ – коефіцієнт, який балансує між сумарною пропускною здатністю шляху та його вузьким місцем по каналу.

Інтерпретація: перший член мінімізує сумарний час передачі (ефективність по кінцевій затримці/пропускній здатності), другий – мінімізує найбільший сумарний затор на одному каналі (усуває проблеми взаємного впливу потоків на одному каналі).

2.3.5 Розширена метрика mWCETT

WCETT не враховує деякі важливі чинники для когнітивних та QoS-орієнтованих мереж: динамічну доступність спектру (можлива втрата каналу через первинного користувача), перешкоди, витрати на переключення каналів (якщо маршрут змінює канал на проміжних вузлах), а також інші QoS-параметри (ймовірність втрати, джиттер). Тому вводимо mWCETT як комбіновану метрику:

$$mWCETT(P) = w_1 ETT_{sum}(P) + w_2 \max_k X_k(P) + w_3 S(P) + w_4 I(P) + w_5 A(P) \quad (2.23)$$

де ваги $w_i \geq 0$ налаштовані користувачем/системою (часто $\sum_i w_i = 1$ або інша нормалізація), а додаткові складові визначено як:

- Витрати на переключення каналів $S(P)$

У класичному WCETT перемикання каналів вважається безкоштовним, що не відповідає дійсності. У CR-WMN кожне перемикання призводить до затримки переналаштування радіоінтерфейсу, втрати пакетів, порушення синхронізації. Тому $S(P)$ вводиться як штраф за зміну каналу вздовж маршруту P . Переключення відбуваються у вузлах, де послідовні ребра мають різні канали.

Нехай маршрут $P = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, де кожен лінк використовує канал c_i .

Тоді:

$$S(P) = \sum_{i=1}^{n-1} \delta(c_i \neq c_{i+1}) \times T_{switch} \quad (2.24)$$

де δ – індикаторна функція (приймає значення 1 якщо відбувається зміна каналу); T_{switch} - середній час переключення каналу, що береться з апаратної специфікації або вимірюється експериментально (час між АСК до/після перемикання).

- Метрика перешкод $I(P)$

WCETT враховує тільки внутрішньопотокову інтерференцію, але ігнорує зовнішні завади та не бачить активність PU. Інтерференція може бути зведена в сумарну або максимально-нормовану міру. Наприклад, сумарна нормалізована перешкода:

$$I(P) = \sum_{i \in P} (w_1 \frac{1}{SINR_i} + w_2 \frac{P_i^{int}}{P_i^{sig}}) \quad (2.25)$$

P_i^{int} – сумарна потужність усіх завад на каналі;

P_i^{sig} – потужність корисного сигналу на приймачі хопу i .

У кожному приймачі бездротового вузла фізично вимірюються потужність корисного сигналу та сумарна потужність шуму та інтерференції. Ці вимірювання є невід’ємною частиною процесу прийому пакетів і доступні на реальному обладнанні.

На їх основі визначається $SINR$ ($0 < SINR_i < \infty$, де нижня межа $\rightarrow 0$ (сигнал загублений у шумі); верхня межа $\rightarrow \infty$ (ідеальний канал без

шуму)), який є первинним показником рівня перешкод. Чим нижче $SINR$, тим вищий вплив інтерференції, і тим більшим є внесок відповідного лінка у значення $I(P)$.

Для кожного лінка l_i вимірюється:

$$SINR_i = \frac{p_i^{rx}}{p_i^{noise} + p_i^{int}} \quad (2.26)$$

де, p_i^{rx} – потужність корисного каналу, p_i^{noise} – фоновий шум, p_i^{int} – інтерференція (SU + PU).

Оскільки метрика мінімізується, вводиться обернене представлення: $I_i^{PHY} = \frac{1}{SINR_i}$ та використовується у оберненій або нормалізованій формі, що дозволяє трактувати погіршення каналу як зростання штрафу.

- Покарання за недоступність спектру $A(P)$

Параметр $A(P)$ відображає ризик втрати маршруту в часі, зумовлений тим, що канал може бути доступним у момент вибору маршруту, але стати недоступним через появу PU під час передачі. Тобто, $A(P)$ описує часову стабільність каналу передачі.

Для кожного лінка:

$$A_i = 1 - P_{avail}(c_i) \quad (2.27)$$

де P_{avail} – ймовірність, що каналі залишиться вільним. $P_{avail} = 1$ – канал завжди вільний, $P_{avail} = 0$ – канал ніколи не доступний.

Тоді:

$$A(P) = \sum_{i=1}^n A_i, A_i \in [0; 1] \quad (2.28)$$

P_{avail} вираховується на основі історії спектрального зондування:

$$P_{avail} = \frac{T_{free}}{T_{obs}} \quad (2.29)$$

де T_{free} – час без PU за період спостереження T_{obs} .

$$T_{obs} = N \times T_{sense} \quad (2.30)$$

де T_{sense} – період одного вимірювального циклу.

Тобто, T_{obs} це фіксоване вікно часу, яке визначає наскільки в минуле необхідно дивитись, щоб оцінити доступність спектру.

T_{free} це сума інтервалів коли PU відсутній на конкретному каналі, який використовується лінком.

Під час кожного вимірювального циклу:

$$s(t_k) = \begin{cases} 1, \text{ канал вільний} \\ 0, PU \text{ присутній} \end{cases}$$

Тоді:

$$T_{free} = \sum_{k=1}^N s(t_k) \times T_{sense} \quad (2.31)$$

Необхідно агрегувати A_i вздовж всього маршруту шляхом усереднення, що не буде карати за довжину маршруту, відображатиме середній ризик і матиме стабільну маршрутизацію.

$$A(P) = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^H A_i \quad (2.32)$$

A_i оновлюється з частотою спектральних подій (PU), а не з частотою обробки пакетів або RREQ. Якщо оновлення відбувається занадто часто – шум і флапінг маршрутів, занадто рідко – застарілі маршрути.

Введення параметрів $S(P)$, $I(P)$ та $A(P)$ дозволяє врахувати не лише топологічні та пропускні характеристики маршруту, але й динамічні властивості спектрального середовища, що забезпечує більш раціональний вибір маршрутів у CR-WMN за рахунок урахування витрат на переналаштування радіоінтерфейсу, рівня інтерференції та часової доступності спектра, що відрізняється від існуючих метрик класу WCETT.

2.3.6 Узагальнення з QoS-обмеженнями

Модель маршрутизації за метрикою mWCETT може бути оформлена як задача оптимізації з обмеженнями:

Задача: знайти шлях P^* з v_s до v_d , який мінімізує mWCETT(P) при виконанні QoS-обмежень:

$$\text{Min}_{P \in \mathbb{P}(v_s, v_d)} mWCETT(P) \quad (2.33)$$

За умов:

$$BW(P) \geq B_{min},$$

$$Delay(P) \leq D_{max},$$

$$PLR(P) \leq PLR_{max},$$

де $BW(P)$ – гарантована пропускна здатність шляху (можна взяти мінімум по ребру), $Delay(P)$ – очікувана затримка (може наближено дорівнювати $ETT_{sum}(P) + S(P)$), $PLR(P)$ – очікувана ймовірність втрати пакета по шляху.

2.3.7 Представлення задачі як цілочисельної лінійної задачі (ILP)

Для формального математичного опрацювання можна подати задачу як ILP. Введемо бінарні змінні $x_e \in \{0,1\}$ – чи використане ребро e на обраному шляху. Тоді:

- Консерваційні обмеження потоку (єдиний шлях):

$$\sum_{(u,v) \in \mathcal{E}} x_{uv} - \sum_{(v,w) \in \mathcal{E}} x_{vw} = \begin{cases} 1 \text{ для } v = v_s \\ -1 \text{ для } v = v_d \\ 0 \text{ для інших } v. \end{cases} \quad (2.34)$$

- Сумарний ETT:

$$ETT_{sum} = \sum_{e \in \mathcal{E}} ETT_e x_e \quad (2.35)$$

- Для представлення $max_k x_k(P)$ введемо допоміжні змінні z та обмеження:

$$z \geq \sum_{e: ch(e)=k} ETT_e x_e \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (2.36)$$

тоді $max_k X_k(P) = z$ у оптимальному рішенні (мінімізуємо z).

- Переключення: щоб лінійно змодельовати (P) , потрібно ввести змінні для послідовних ребер, наприклад $y_{uv,vw} \in \{0,1\}$ означає, що використано ребро (u, v) і далі (v, w) , тоді:

$$y_{uv,vw} \leq x_{uv}, \quad y_{uv,vw} \leq x_{vw}, \quad y_{uv,vw} \geq x_{uv} + x_{vw} - 1.$$

Тоді

$$S = \sum_{(u,v),(v,w)} s(ch(u,v), ch(v,w)) y_{uv,vw} \quad (2.37)$$

Після введення всіх допоміжних змінних ILP набуває лінійного вигляду:

$$\begin{aligned} \min w_1 \sum_e ETT_e x_e + w_2 z + w_3 \sum_{(u,v),(v,w)} s(ch(u,v), ch(v,w)) y_{uv,vw} + \\ w_4 \sum_e \tilde{I}_e x_e + w_5 \sum_e (1 - A_e) x_e \end{aligned} \quad (2.38)$$

2.3.8 Алгоритм обчислення оптимального шляху для mWCETT

Ключова складність полягає в тому, що компонент $\max_k X_k(P)$ є неадитивним: він залежить від розподілу ЕТТ між каналами усього шляху. По цій причині, простий алгоритм Дійкстри з додаванням ваг лінків не дасть гарантовано оптимального рішення. Для вирішення даної проблеми буде надано два підходи: точний(проте більш дорогавартісний) та евристичний(практичний метод).

- Точний підхід – label-setting з векторами по каналам (multi-dimensional Dijkstra)

Для кожного вузла необхідно зберегти множину «міток». Мітка L – кортеж $L = (ETT_{sum}, (X_1, \dots, X_K), S, I, A)$, який відображає накопичені по шляху значення. Порівняння міток здійснюється за відношенням домінування: мітка L домінує L' , якщо всі її компоненти не більші і хоча б один – строго менший (з урахуванням зваженого об'єктиву або парето-домінування).

Алгоритм:

1. Ініціалізувати мітку в джерелі v_s : $L_0 = (0, (0, \dots, 0), 0, 0, 0)$.
2. Використовувати чергу пріоритетів.
3. Розширювати мітки по ребрах; при переході по ребру e для поточної мітки робимо оновлення компонентів (додаємо ETT_e до сумарного та до відповідного $X_{ch(e)}$; додаємо $S(.,.)$ якщо канал змінюється; додаємо $\tilde{I}_e$ та $(1 - A_e)$).
4. Після отримання нової мітки для вузла v проводимо відсікання: видаляємо доміновані мітки.
5. Процедура завершується, коли для вузли-призначення v_d більше не залишилось немінізованих міток у черзі або якщо досягнуто ліміт ресурсів.

Перевага підходу: точність – гарантований оптимум при повному переборі і відповідному збереженні міток.

Недолік підходу: експоненційний ріст кількості міток у найгіршому випадку (особливо при великому K).

- Евристичний підхід: релаксація $\max$ -компоненти

Щоб застосувати швидкий однопрохідний алгоритм, можна перетворити $\max_k X_k(P)$ у адитивний приближений компонент. Наприклад, для кожного ребра e можна задати «штраф»:

$$p_e = \beta \times \frac{ETT_e}{\bar{R}_{ch(e)}} \quad (2.39a)$$

або

$$p_e = f_{ch(e)}(ETT_e), \quad (2.39b)$$

де f_{ch} - функція, що підвищує вагу для каналів з вже великим навантаженням (адаптивна). Тоді для ребра беремо адитивну вагу:

$$w(e) = w_1 ETT_e + w_2 p_e + w_3 s_{avg}(ch(e)) + w_4 \tilde{I}_e + w_5 (1 - A_e). \quad (2.40)$$

2.3.9 Формальні властивості mWCETT

- Невід'ємність та обмеженість: усі складові члени mWCETT невід'ємні за означенням, отже $mWCETT(P) \geq 0$ для будь-якого шляху P . При нормалізації компонентів (наприклад, ділення на відповідні максимуми), метрика може бути обмеженою та порівнюваною між різними мережами.

- Монотонність при додаванні ребер: сумарна компонента ETT_{sum} та додані компоненти $S(P), I(P), A(P)$ є адитивними по ребрах і тому додавання нового ребра (подовження шляху) з нефіксованим знаком ніколи не зменшує ці складові, тобто вони не зменшуються при додаткових ребрах. Однак $\max_k X_k(P)$ може поводити себе нестрого монотонно – додавання ребра на вже завантажений канал може збільшити максимум сильніше, ніж додавання на інший канал. Відтак, загальна метрика є монотонною по відношенню до адитивних складових, і може збільшуватись або відносно легко змінюватись через максимальний член.

- Домінування та оптимальність: якщо всі $w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 0$, mWCETT вироджується в просту сумарну ЕТТ і стає адитивною, тому однопрохідний Дійкстра дає оптимум. Якщо ж $w_2 > 0$, то присутність

неадитивного члена змінює структуру оптимуму і вимагає багатомірних алгоритмів або ILP.

2.3.10 Рекомендації щодо реалізації та налаштування ваг

1. Нормалізація: перед сумуванням різнорідних компонент (ЕТТ у секундах, час переключення у секундах, інтерференція у відносних одиницях) необхідно нормалізувати кожен складову на її характерну шкалу (наприклад, поділити на очікуваний максимум або використовувати z-score), щоб ваги w_i відображали пріоритети.

2. Калібрування ваг: ваги w_i підбирати з урахуванням цілей: мінімізація затримки, надійності або мінімізація ризику втрати зв'язку через первинних користувачів. Для адаптивних систем можливе динамічне оновлення ваг залежно від умов мережі (наприклад, збільшення w_5 при виявленій активності первинних користувачів).

3. Гібридні алгоритми: застосовувати label-setting для критичних потоків (реального часу) та евристичні швидші підходи для менш критичних потоків.

4. Онлайн оновлення: в когнітивних мережах параметри A_e та I_e можуть змінюватись швидко – необхідно відслідковувати статистику та перераховувати метрики періодично або при виявленні значних змін.

5. Оцінювання та симуляція: перед розгортанням – провести експерименти в NS-2,3/OMNeT++ з різними сценаріями (мінливість спектру, навантаження) для калібрування w_i та перевірки стабільності обраного алгоритму.

2.4 Алгоритм роботи протоколу

2.4.1 Підготовка та локальні обчислення на кожному вузлі

Моніторинг каналів:

- Вузол періодично (або на вимогу/подію) вимірює/оцінює для кожного доступного каналу: ЕТТ (із вимірів успішних передач), спектральна доступність (ймовірність бути витісненим PU або середній вільний інтервал),

рівень інтерференції (локальний RSSI/смугові показники), і вартість перемикання.

- Формується таблиця локальних характеристик: для кожного – {ETT, SA, IF, CSC}.

Обчислення локального вкладення в метрику:

- Для кожного сусіднього переходу вузол обчислює $mWCETT$ (наприклад: $link_score = ETT * f(SA) * g(IF) + CSC$), де f, g – нормалізуючі функції/вагові множники. (Точні функції/коефіцієнти налаштовуються при реалізації/симуляції) [20].

2.4.2 Виявлення маршруту (RREQ/RREP – розширений AODV)

Ініціалізація RREQ – джерело формує RREQ, додає поле $accum_mWCETT = 0$, поле $channel_vector$ (за потреби) та свої реквізити (source, dest, seq_no).

Розповсюдження RREQ. Кожен проміжний вузол при отриманні RREQ:

- Перевіряє, чи вже обробляв цей RREQ – якщо так і значення метрики на поточному шляху не є кращим, то воно відкидається.
- Оновлює $accum_mWCETT += local_link_score$ (враховується свій вхідний link).
- Опціонально оновлює $channel_vector$ або $per_channel_sums$ для обчислення WCETT-частини (щоб знайти вузьке місце по каналу).
- Пропускає RREQ далі або відправляє RREP, якщо він є маршрутизатором до призначення [21].

Вибір RREP (при кількох маршрутних варіантах)

Призначення або проміжний вузол з маршрутом до призначення відповідає RREP назад джерелу. Якщо призначення отримало RREQ з різними $accum_mWCETT$, воно може:

- Віддати пріоритет RREQ із найменшим $accum_mWCETT$, тобто сформувати RREP для кращого шляху.

- Або надіслати кілька RREP і дозволити джерелу обрати кращий маршрут за отриманими метриками.

Фінальний вибір маршруту на джерелі.

Джерело отримує RREP(и) з обчисленими $mWCETT$ для кожного шляху; вибирає маршрут з мінімальною метрикою або за політикою load-balancing/множинних потоків.

2.4.3 Підтримка маршруту – обробка змін спектру

Виявлення втручання PU/втрата каналу. Якщо на активному каналі вузол виявляє появу первинного користувача (PU) або істотне погіршення SA/IF, він:

- Якщо є альтернативний радіоканал/інтерфейс до наступного стрибка – переключається (якщо CSC допустима) і повідомляє сусідам (опціонально RERR з оновленою метрикою).

- Якщо перемикання неможливе – генерує RERR (route error) і/або починає локальний ремонт (local repair) – надсилає RREQ для пошуку нового шляху, можливо з обмеженням TTL.

- $mWCETT$ пришвидшує реакцію на зміну спектру, бо метрика вже враховує SA та переключення [21].

Реакція на RERR у джерела. Джерело отримує RERR → або перезапускає процес виявлення маршруту, або вибирає із кандидатних кешованих маршрутів використовуючи $mWCETT$ для вибору кращого.

2.4.4 Візуалізація псевдокоду та алгоритму роботи протоколу

У цьому підрозділі буде надано псевдокод з його поясненням та візуалізовано його у вигляді блок-схеми.

Псевдокод:

```
on_receive_RREQ(RREQ, in_iface):
    if    seen_before(RREQ.id)    and    RREQ.accum_mWCETT    >=
best_seen[RREQ.id]:
        drop
```

```

else:
    best_seen[RREQ.id] = RREQ.accum_mWCETT
    link_score = compute_local_link_score(in_iface) # ETT * f(SA) * g(IF) +
CSC
    RREQ.accum_mWCETT += link_score
    if is_destination(RREQ.dest):
        send_RREP_back(RREQ.source, RREQ.accum_mWCETT)
    else:
        broadcast_RREQ(RREQ)

on_receive_RREP(RREP):
    store_route(RREP.path, RREP.accum_mWCETT)
    if is_source(RREP.dest): # RREP reached source
        select_route_with_min_mWCETT()

```

Даний код реалізує головну логіку маршрутизації протоколу mWCETT, а саме вирішує наступні питання:

1. Розповсюдження RREQ з нарощуванням метрики mWCETT.
2. Фільтрацію гірших маршрутів ще на етапі поширення.
3. Обчислення локальної метрики каналу для врахування доступності спектру, інтерференції, часу передачі, вартості перемикання каналів.
4. Вибір найкращого маршруту на джерелі на основі mWCETT.
5. AODV-подібний механізм → проте адаптований під спектрально-усвідомлені мережі.

2.4.5 Блок схема алгоритму

Для подання наочності, далі надано детальне, технічно коректне і логічно цілісне пояснення кожного кроку алгоритму. Описано реальний робочий механізм mWCETT, адаптований до логіки протоколів

AODV/WCETT, але розширений метриками когнітивного радіо та крос-канальної оцінки.

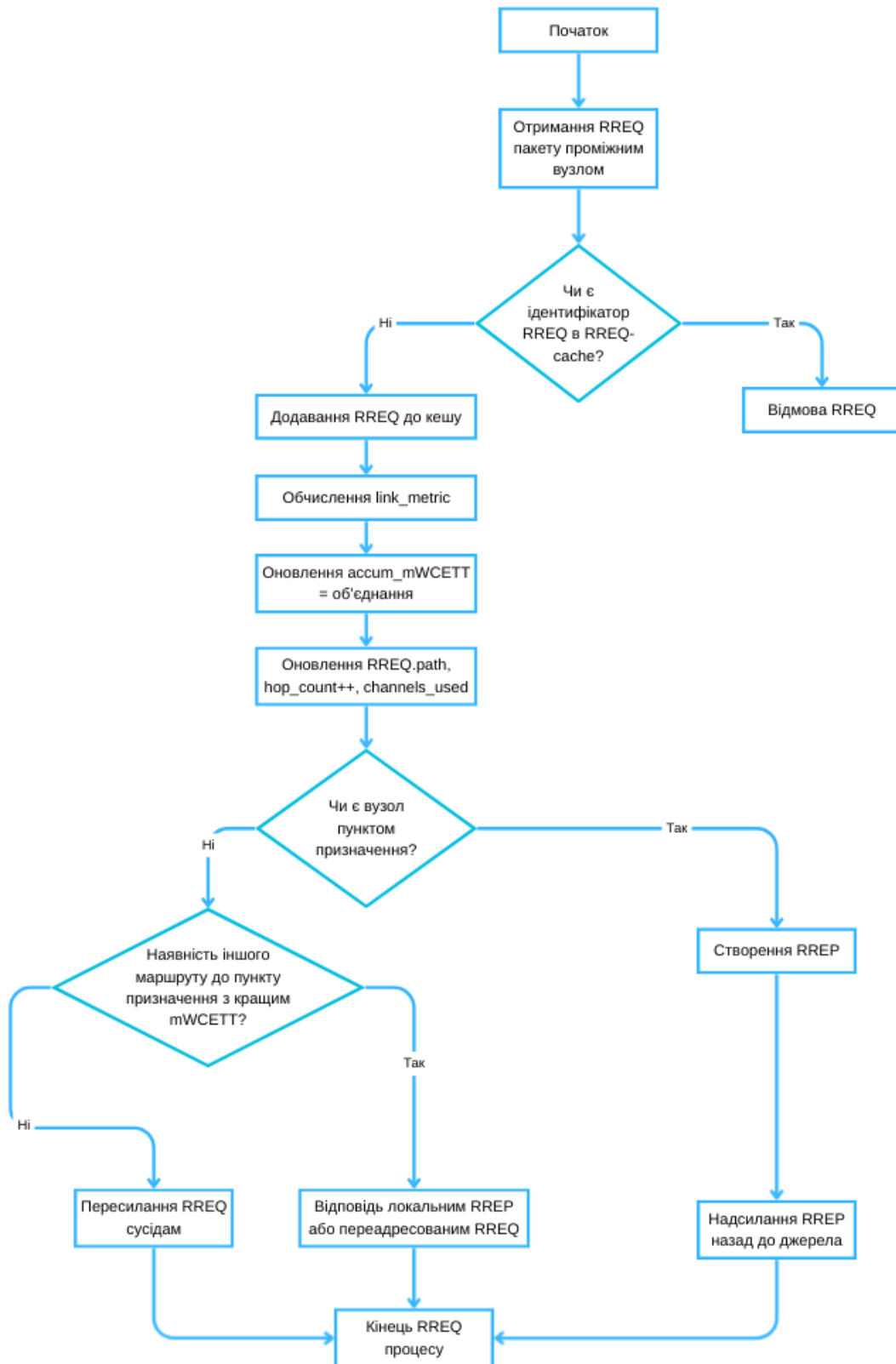


Рисунок 2.4 – RREQ_process – обробка Route Request

Пояснення до Рисунку 2.4:

- Початок/Отримання RREQ пакету – вузол отримує пакет RREQ. Це означає, що якийсь інший вузол шукає маршрут до призначення.
- Чи є ідентифікатор RREQ в кеші RREQ – кожен RREQ має унікальний RREQ_ID та адресу джерела. Якщо такий пакет вже бачили, це означає, що він дубльований (через ширококомовний характер AODV).
- Відкидання RREQ за умови дублювання – щоб уникнути нагромадження мережі, вузол ігнорує дублюючі RREQ.
- Додавання RREQ до кешу; запис до prev_hop – вузол кешує даний RREQ та запам'ятовує хто його відправив (зберігає prev_hop, щоб потім передавати RREP назад). Таким чином формується зворотній маршрут.
- Обчислення $link_metric = measure_link(prev_hop)$ – вузол оцінює параметри радіолінії від цього до попереднього стрибку. Для mWCETT це включає: ETX, затримку, частотний канал, перешкоди та пропускну здатність каналу.
- Оновлення $accum_mWCETT$ = об'єднання ($accum_mWCETT$, $link_metric$) – вузол додає свій внесок до глобальної метрики маршруту, тобто він формує наскрізну метрику маршруту:

$$accum_mWCETT = \sum_{i=1}^{Hops} (ETX_i \times Delay_i + \alpha \times ChannelPenalty_i) \quad (2.41)$$
- Оновлення RREQ.path, hop_count++, channels_used – вузол дописує в себе шлях RREQ.path.append(current_node), збільшує hop_count, оновлює список використаних каналів.
- Чи є вузол пунктом призначення? – за умови, що вузол є точкою призначення → він має відповісти RREP.
- Створення RREP – вузол формує Route Replay: копіює шлях, копіює метрику коду, може додати інформацію для кожного переходу.

- Надсилання RREP назад до джерела (зворотній шлях) – RREP рухається назад тим шляхом, яким прийшов RREQ, оскільки цей маршрут вже гарантовано існує.
- Наявність іншого маршруту до пункту призначення з кращим показником mWCETT? – проміжний вузол перевіряє чи наявний у його таблиці маршрутів кращий шлях до цілі, ніж той, який прийшов у RREQ.
- Відповідь локальним RREP або переадресованим RREQ, опціонально – якщо локальний маршрут кращий, то вузол має право або відповісти RREP локально, або продовжити RREQ оновивши метрику.
- Пересилання RREQ сусідам (з урахуванням швидкості/інтерфейсу) – широкомовне розповсюдження відбувається з урахуванням інтерфейсів, каналів, обмежень швидкості.
- Кінець RREQ процесу – опрацювання RREQ завершено.

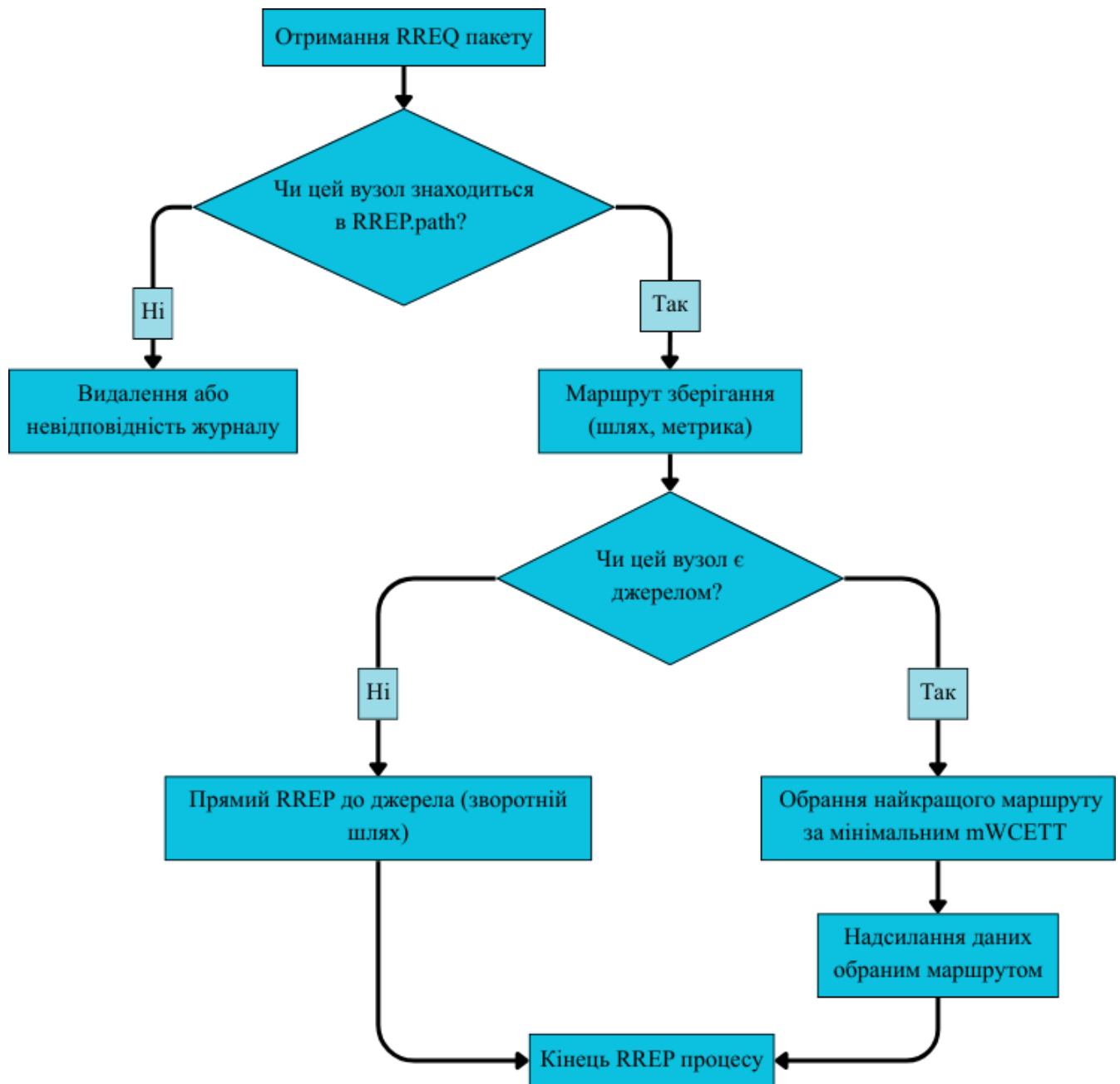


Рисунок 2.5 – RREP_process – обробка Route Reply

Пояснення до Рисунку 2.5:

- Отримання RREP пакету – вузол отримує пакет RREP, що є відповіддю на RREQ.
- Чи цей вузол знаходиться в RREP.path? – відбувається перевірка що даний вузол дійсно має бути включений у зворотній шлях. Якщо ні → RREP зіпсований (атака або помилка).

- Видалення або невідповідність журналу – некоректний RREP відкидається.
- Маршрут зберігання (шлях, метрика) – реплікована інформація зберігається у таблиці маршрутів: $route.path = RREP.path$ та $route.metric = RREP.accum_mWCETT$. Таким чином вузол дізнається про новий доступний маршрут.
- Чи цей вузол є джерелом? – якщо вузол джерело, яке колись відправляло RREQ → він збирає всі RREP.
- Обрання найкращого маршруту за мінімальним $mWCETT$ – джерело може отримати велику кількість відповідей, проте має обрати маршрут з мінімальним значенням метрики $mWCETT$ (найкращий):

$$best = \min (mWCETT_1, mWCETT_2, \dots, mWCETT_k)$$
- Надсилання даних обраним маршрутом – починається передача даних по оптимальному маршруту.
- Прямий RREP до джерела (зворотній шлях) – вузол пересилає RREP назад, використовуючи свій запис про зворотній стрибок.
- Кінець RREP процесу – процес закінчено.

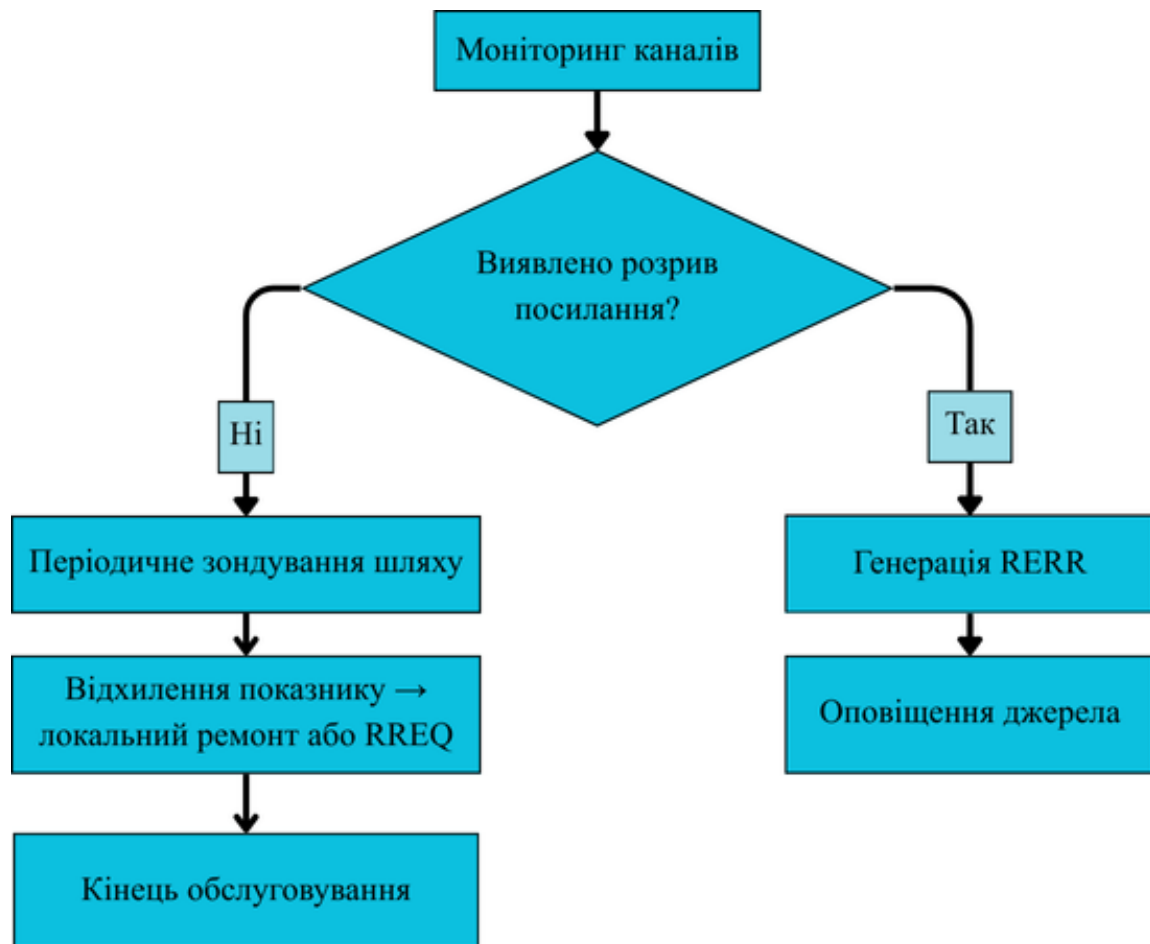


Рисунок 2.6 – Route_Maintenance – обслуговування маршруту

Пояснення до рис. 2.6:

- Моніторинг каналів (HELLO/зворотній зв'язок каналного рівня) – вузол постійно стежить за станом каналу: HELLO пакети, ACK від MAC, аналіз RSSI та повторні передачі.
- Виявлено розрив посилання? – аналізує чи став канал нестабільним чи недоступним.
- Генерація RERR – створюється Route Error (RERR), після чого маршрут вилучається та відбувається оповіщення всіх вузлів, які залежали від цього маршруту.
- Оповіщення джерела – повідомлення надсилається джерелу для запуску нового RREQ.
- Періодичне зондування шляху – відбувається оновлення показників якості каналу.

- Відхилення показнику $\rightarrow$ локальний ремонт або RREQ – якщо значення метрики погіршується до критичного значення, то вузол може виконати локальне покращення маршруту або ж ініціювати новий RREQ.
- Кінець обслуговування – завершення процедури обслуговування.

Висновки за розділом 2

1. Розроблена формальна модель процесу маршрутизації в CE-WMN доводить, що врахування динамічної доступності спектра та QoS-вимог є критично необхідним для адекватного функціонування мережі. Встановлено, що класичні протоколи маршрутизації та традиційні метрики не забезпечують стабільності маршрутів в умовах активності первинних користувачів та змін спектрального середовища, що підтверджує доцільність їх модифікації.

2. Сформульована багатокритеріальна оптимізаційна задача маршрутизації з QoS-обмеженнями дозволила встановити, що задача належить до класу NP-складних. Доведено, що це зумовлює доцільність застосування евристичних, гібридних і наближених алгоритмів для практичної реалізації в реальних мережах.

3. Запропонований протокол mWCETT забезпечує підвищення стабільності маршрутів, що досягається за рахунок інтеграції когнітивних параметрів (доступності спектра, інтерференції, активності первинних користувачів) у метрику маршрутизації. Встановлено, що врахування цих факторів знижує ймовірність розриву з'єднання та підвищує надійність передачі даних.

4. Розроблена онтологічна модель маршрутизації забезпечує формалізацію процесу прийняття рішень, що дозволяє виконувати семантичну оцінку каналів і маршрутів. Доведено, що використання онтологічного підходу підвищує обґрунтованість вибору маршрутів та створює основу для інтелектуалізації маршрутизації, зокрема із застосуванням методів машинного навчання.

5. Побудована математична модель метрики mWCETT дозволяє більш точно відображати умови функціонування CR-WMN, ніж класична WCETT. Встановлено, що включення когнітивних та QoS-параметрів забезпечує підвищення адекватності оцінки маршрутів та ефективності їх вибору.

6. Розроблений алгоритм функціонування протоколу mWCETT забезпечує зменшення накладних витрат керування, що досягається за рахунок використання накопичуваної метрики під час поширення RREQ. Показано, що це дозволяє відсікати неефективні маршрути на ранніх етапах та підвищує загальну ефективність процесу маршрутизації.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даному розділі представлені експериментальні дослідження, проведені на мережах із різною кількістю вузлів. Мета дослідження полягала у всебічній оцінці впливу масштабованості топології на продуктивність протоколу маршрутизації mWCETT. Для цього моделювалась поведінка когнітивних вузлів у динамічному середовищі, з урахуванням перешкод, доступності спектра та витрат на перемикання каналів, що забезпечує реалістичну оцінку ефективності протоколу. Основна увага приділяється визначенню впливу розміру мережі на ключові показники роботи: середню затримку, джиттер, пропускну здатність, коефіцієнт доставки пакетів (PDR), та нормалізовані втрати на маршрутизацію (NRL). Проведене порівняння дозволяє обґрунтувати переваги протоколу mWCETT у порівнянні з класичними протоколами AODV та WCETT, та дає змогу зробити висновки щодо його ефективності у масштабованих когнітивних сітчастих мережах.

3.1.1 Опис середовища моделювання

Для обґрунтованої оцінки продуктивності mWCETT необхідна коректно налаштована симуляційна платформа, що підтримує мультиканальну, мультиінтерфейсну модель та можливість моделювання когнітивних аспектів (динамічний вибір каналів, доступ до спектра). У роботах, де WCETT та AODV впроваджували та тестували, автори використовували симулятор NS-2 з додатковими патчами/моделями для multi-channel / multi-interface / cognitive-radio функціоналу; цей підхід дозволяє порівнювати результати з існуючою літературою та гарантує сумісність сценаріїв [22].

3.1.1 Версія симулятора та необхідні розширення

Python бібліотеки та базовий симулятор – NS-2 (Network Simulator 2). Для відтворення результатів рекомендовано використовувати NS-2.35,

оскільки більшість патчів та допоміжних прикладів для мультиканального моделювання сумісні з даною версією [23].

Обов'язкові розширення/патчі:

- CRCN/Cognitive-radio patch – додає багатоканальний, мультиінтерфейсний функціонал і можливість емуляції когнітивного радіо (моделювання інтерфейсів, динамічний вибір каналів). У документації та навчальних матеріалах описано процедури встановлення та приклади використання [24].
- Multi-channel/multi-interface патчі та моделі (альтернатива: MIRACLE framework або спеціальні реалізації multi-radio у NS-2). MIRACLE надає модульну підтримку мульти-технологій і може спростити інтеграцію власних метрик/механізмів маршрутизації [25].

Практична примітка: встановлення патчів зазвичай вимагає збірки NS-2 з джерельними файлами (rebuild), корекції шляху до заголовків та бібліотек, а також тестових скриптів. Для CRCN/мультиканального патча існують детальні покрокові інструкції у відкритих джерелах [26].

3.1.2 Архітектура моделі мережі

Топологія і розміщення вузлів:

- Фіксована решітка або випадкове розміщення в квадратній області (наприклад, 1000*1000 м) – вибір залежить від сценарію.
- Кількість вузлів – серії експериментів проводяться для множин N (наприклад, 20, 50, 100) щоб дослідити масштабованість.

Інтерфейси та канали:

- Кожен вузол може мати одну або кілька радіо-інтерфейсів. Кількість інтерфейсів визначається експериментально (1,2 або 3).
- Сукупність доступних каналів – важливий параметр: більше каналів зменшує перехресну інтерференцію, але ускладнює узгодження маршрутів. Для когнітивних сценаріїв перелік каналів може динамічно змінюватися залежно від доступності первинних користувачів [24].

Маршрутизуючий модуль:

- mWCETT реалізується як модуль маршрутизації в Python симуляції (аналогічно реалізаціям WCETT/AODV); необхідно додати обробку RREQ/RREP, зберігання метрик (accumulated mWCETT), механізми вибору найкращого маршруту за mWCETT-метрикою та можливості оновлення метрик при зміні каналів.

3.1.3 Фізичний рівень, MAC та моделі поширення

PHY/MAC стек:

- MAC: IEEE 802.11 (DCF) з можливістю розширення до 802.11e (за необхідності моделювання QoS-поведінки). Для мультиканальної роботи використовується модифікований MAC, який дозволяє призначати канал інтерфейсу або динамічно перемикатися між каналами [24].
- PHY[64]: параметри радіо (передавальна потужність, чутливість приймача, швидкості PHY) задаються згідно з стандартними профілями NS-2; для когнітивних сценаріїв додається модель виявлення наявності первинних користувачів або правила зайнятості каналів [27].

Модель поширення:

- Стандартні моделі NS-2: Free Space, Two-Ray Ground (вплив на дальність і затухання). Для міських/урбанізованих сцен може бути використана Shadowing модель. Обґрунтування вибору: Two-Ray – для сценаріїв з довгими відстанями і плоскою місцевістю; Shadowing – для варіацій в каналі [23].

Антенa:

- Ізотропні антени (за замовчуванням) – достатньо для більшості синтетичних експериментів. Якщо потрібно моделювати спрямовані антени або MIMO-сценарії, необхідні додаткові модулі та коректування PHY [23].

3.1.4 Трафік, генерація навантаження та сценарії

Типи трафіку:

- UDP CBR (константний бітрейт) – для вимірювання максимальної пропускної здатності, затримки, PDR.
- TCP (FTP/HTTP-подібний) – для оцінки поведінки в сценаріях з контрольованим потоком і валідації TCP-сумісності маршрутизації.
- Потоки різної інтенсивності (низька/середня/висока) і різні профілі (потоки з низькою/високою QoS-чутливістю) для перевірки адаптації mWCETT [28].

Сценарії тестування:

- Статичні сценарії – вузли позиціоновані статично; оцінка впливу числа вузлів, числа каналів та числа інтерфейсів.
- Динамічні сценарії – зміна доступності каналів (модель поведінки PU), падіння посилянь, зміни трафіку – перевірка стійкості mWCETT.

3.1.5 Метрики продуктивності та збір результатів

Ключові метрики:

- Throughput (середній для потоку / всього вузла) – біт/с або кбіт/с.
- End-to-End Delay – середній час доставки пакету.
- Packet Delivery Ratio (PDR) – відношення успішно доставлених пакетів до відправлених.
- Normalized Routing Load (NRL) – кількість контрольних повідомлень маршрутизації на доставлений пакет.
- Jitter – варіація затримки (важливо для QoS-чутливого трафіку).

Дані метрики будуть використані в порівняльних дослідженнях mWCETT до AODV/WCETT.

Збір даних:

- Використання стандартних NS-2 trace-файлів (*.tr) та додаткових логів для метрик mWCETT (наприклад, запис накопиченої метрики асс_mWCETT у RREP, часові штампи при відправці/прийомі).
- Після завершення симуляції – парсинг trace-файлів (awk/Python скрипти) для розрахунку метрик. Рекомендується зберігати сирі файли з усіма параметрами експерименту (TCL-скрипт, seed, config) для відтворюваності [23].

3.1.6 Реалізаційні деталі для mWCETT у NS-2

Інтеграція метрики

mWCETT має зберігати для кожного шляху накопичену метрику (ассум_mWCETT) у заголовках RREQ/RREP, оновлювати при проходженні через вузли і використовувати вузли-джерелі для вибору маршрутизації (C++ частина) і відповідні tcl-виклики для ініціалізації. Реалізації схожі на ті, що застосовуються для WCETT/ETX у попередніх дослідженнях [29].

Обробка мультиканальності

Коли маршрут прокладається, важливо враховувати конфігурацію каналів для кожного переходу (link channel assignment) та їхній вплив на очікуваний час передачі. Це потребує передачі інформації про канал/інтерфейс в маршрутизуючих повідомленнях або застосування механізмів узгодження каналів під час встановлення маршруту (control-channel або on-demand synchronization). Документація по мультиканальності в NS-2 описує приклади broadcast/hello для мультиінтерфейсного середовища [24].

Тестування і відлагодження

Проведення покрокових тестів:

- Простий сценарій 3-х вузлів для перевірки коректності асс_mWCETT;

- Сценарій з 2 інтерфейсами та 3 каналами для перевірки мультиканальної передачі;

- Масштабні конфігурації для всіх значущих конфігурацій.

Логування на кожному вузлі RREQ/RREP/маршрутної таблиці допомагає виявити логічні помилки.

3.1.7 Параметри симуляції (приклад конфігурації)

В цьому підрозділі надано типовий набір параметрів, що наводився в типових симуляціях до протоколів WCETT/AODV і можна застосувати як стартову конфігурацію:

- NS-2: 2.35 (з патчем CRCN/multi-channel)
- Тривалість симуляції: 300мс
- Розмір області: 1000*1000м
- Число вузлів: 20/50/100
- Інтерфейси на вузлі: 1/2/3
- Число доступних каналів: 3-12
- MAC: IEEE 802.11 DCF
- PHY: Two-Ray Ground / Shadowing (за потреби)
- Мобільність: статичні (для WMN) або Random Waypoint для тестів

з рухом.

3.1.8 Обмеження середовища моделювання та можливі похибки

Абстракції симулятора: NS-2 – дискретно-подієвий симулятор з певними спрощеннями PHY/MAC; реальні радіоканали можуть поводитись відмінно (наприклад, складні багатошляхові ефекти), тому результати симуляції є відносними і вимагають валідації у тестовому стенді [23].

Мультиканальна складність – узгодження каналів між вузлами у реальних мережах часто складніше за симуляцію (синхронізація, затримки перемикання каналів). Моделі симуляції можуть недооцінювати ці затримки [24].

Вплив параметрів – результати сильно залежать від вибору числа каналів, інтерфейсів і профілю трафіку – тому необхідно обов’язково виконувати серію експериментів з підвищеною чутливістю (sensitivity analysis)[28].

3.2 Проведення серії експериментів

Симуляційні дослідження було здійснено із застосуванням мови Python версії 3.14 з відкритим вихідним кодом, який було спеціально сконфігуровано для роботи в операційній системі Windows 11. Для забезпечення можливості моделювання механізмів когнітивного радіо в середовищі Python використовувались випадкові та детерміновані масиви та математичні формули базового функціоналу симулятора.

Для подальшої обробки вихідних симуляційних даних, їх структурування та інтерпретації застосовувався комплекс допоміжних програмних інструментів. Зокрема, для фільтрації та агрегування результатів були використані утиліти AWK і Perl-скрипти, тоді як аналіз статистичних залежностей і автоматизація обчислювальних процедур виконувалась за допомогою Python-сценаріїв. Візуалізацію отриманих показників, формування графіків та побудову аналітичних залежностей здійснювалось за допомогою бібліотек NumPy (для генерації випадкових чисел, масивів та обчислень) та Matplotlib (для побудови графіків). Використання цього інструментарію забезпечило ефективну обробку значних обсягів даних та створення наочних графічних інтерпретацій, що дало змогу виконати комплексний та об’єктивний аналіз продуктивності досліджуваних протоколів маршрутизації.

У межах експериментальної частини було проведено серію симуляцій, спрямованих на оцінювання ефективності мереж із різною щільністю розгортання вузлів – від 20 до 100. Такий підхід дозволив дослідити залежність показників якості обслуговування від масштабованості мережі. Під час моделювання здійснювалося порівняльне оцінювання характеристик двох протоколів маршрутизації з та без запропонованої метрики mWCETT:

традиційного AODV, модифікованого AODV + mWCETT, а також DYMO та DYMO + mWCETT. Кожен симуляційний сценарій виконувався протягом 300 секунд симуляційного часу, що забезпечило достатню тривалість для отримання стабільних і репрезентативних значень ключових показників продуктивності.

У кожному симуляційному сценарії здійснювалося ретельне спостереження за перебігом моделювання та фіксація отриманих результатів з метою подальшого аналізу. Оцінювання роботи кожного протоколу маршрутизації проводилось на основі низки ключових показників продуктивності, зокрема: кінцевої затримки передавання пакетів (end-to-end latency), пропускної здатності (throughput), джиттера (jitter), коефіцієнта доставки пакетів (packet delivery ratio) та нормалізованого маршрутизувального навантаження (normalized routing overhead). Такий набір метрик дозволив здійснити всебічне порівняння характеристик протоколів у різних умовах функціонування мережі.

Таблиця 3.1 – Параметри моделювання CR-WMN

Параметри	Значення
Кількість вузлів	20, 40, 60, 80, 100
Топографія	1000м * 1000м
Вузли PU	2% від кількості SU
Вузли SU	20, 40, 60, 80, 100
Сітчастий інтерфейс когнітивного радіо	2
Швидкість вузла мобільного клієнта	1-10м/с
Діапазон передачі	200м
Модель мобільності	Випадкова маршрутна точка
Модель поширення радіочастот	Двопроменева модель відбиття від землі
Тип антени	Всеспрямована
MAC-рівень	IEEE 802.11 DCF
Розмір пакету	1500 байт
Швидкість передачі даних	11Мбайт/с
Тип трафіку	CBR
Час моделювання	300с
Протоколи маршрутизації	AODV, AODV+mWCETT, DYMO, DYMO+mWCETT

Симуляційне середовище та відповідні параметри було налаштовано відповідно до значень, наведених у Таблиці 3.1. Для кожного симуляційного сценарію здійснювався моніторинг мережевих параметрів і фіксація ключових показників продуктивності, що дало змогу забезпечити об'єктивне порівняння ефективності обраних протоколів маршрутизації.

3.3 Аналіз отриманих результатів

Експериментальні дослідження було проведено для мереж із різною кількістю вузлів, що дозволило комплексно оцінити вплив масштабованості топології на ефективність роботи протоколу маршрутизації mWCETT.

Загалом було сформовано п'ять окремих сценаріїв моделювання, кожен з яких відображав різні умови навантаження та щільність мережі. Такий підхід дав змогу не лише проаналізувати залежність продуктивності протоколу mWCETT від розміру мережі, але й оцінити його поведінку в багатоперехідному когнітивному середовищі, де характерною є динамічна зміна доступності спектра та активності користувачів.

Оцінювання ефективності маршрутизаційних механізмів здійснювалося за набором ключових показників якості обслуговування, серед яких: середня наскрізна затримка (end-to-end delay), пропускна здатність (throughput), тремтіння затримки (jitter), коефіцієнт доставки пакетів (PDR) та нормалізовані витрати на маршрутизацію (NRL). Такий комплекс метрик забезпечив можливість всебічного порівняння поведінки протоколів у різних топологічних та спектральних умовах.

З метою оцінки ролі когнітивних параметрів у забезпеченні якості обслуговування в бездротових mesh-мережах та перевірки доцільності впровадження онтологічної моделі було виконано порівняльне моделювання протоколу маршрутизації mWCETT у двох варіантах: із повною когнітивною підтримкою та без урахування параметрів доступності спектра $A(P)$, рівня перешкод $I(P)$ і витрат на переключення каналів $S(P)$. Такий підхід дозволяє кількісно визначити наскільки інтеграція механізмів когнітивного радіо впливає на затримку, джитер, пропускну здатність, коефіцієнт доставки пакетів та службові накладні витрати маршрутизації. Код моделювання наведено в Додатку 1.

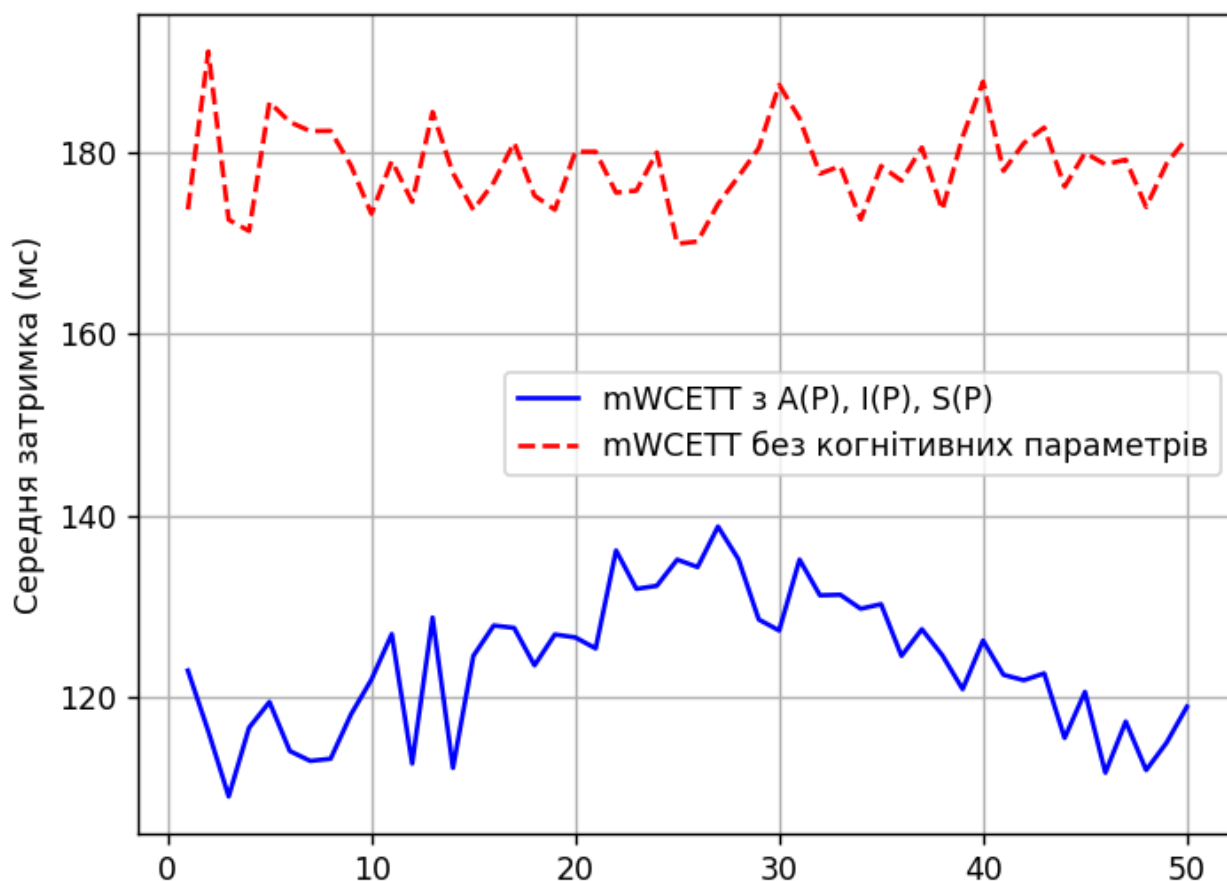


Рисунок 3.1 – Затримка протоколу mWCETT з та без когнітивних параметрів

Графік середньої затримки на рис. 3.1. демонструє суттєву перевагу протоколу mWCETT з урахуванням параметрів $A(P)$, $I(P)$ та $S(P)$ порівняно з варіантом без когнітивних механізмів. Використання інформації про доступність спектра та рівень перешкод дозволяє уникати перенавантажених або нестабільних каналів, що зменшує час очікування та кількість повторних передач. Натомість варіант без когнітивних параметрів фактично зводиться до класичної метрики якості каналу, не враховуючи динаміку спектра, що призводить до зростання затримки в умовах змінної радіообстановки.

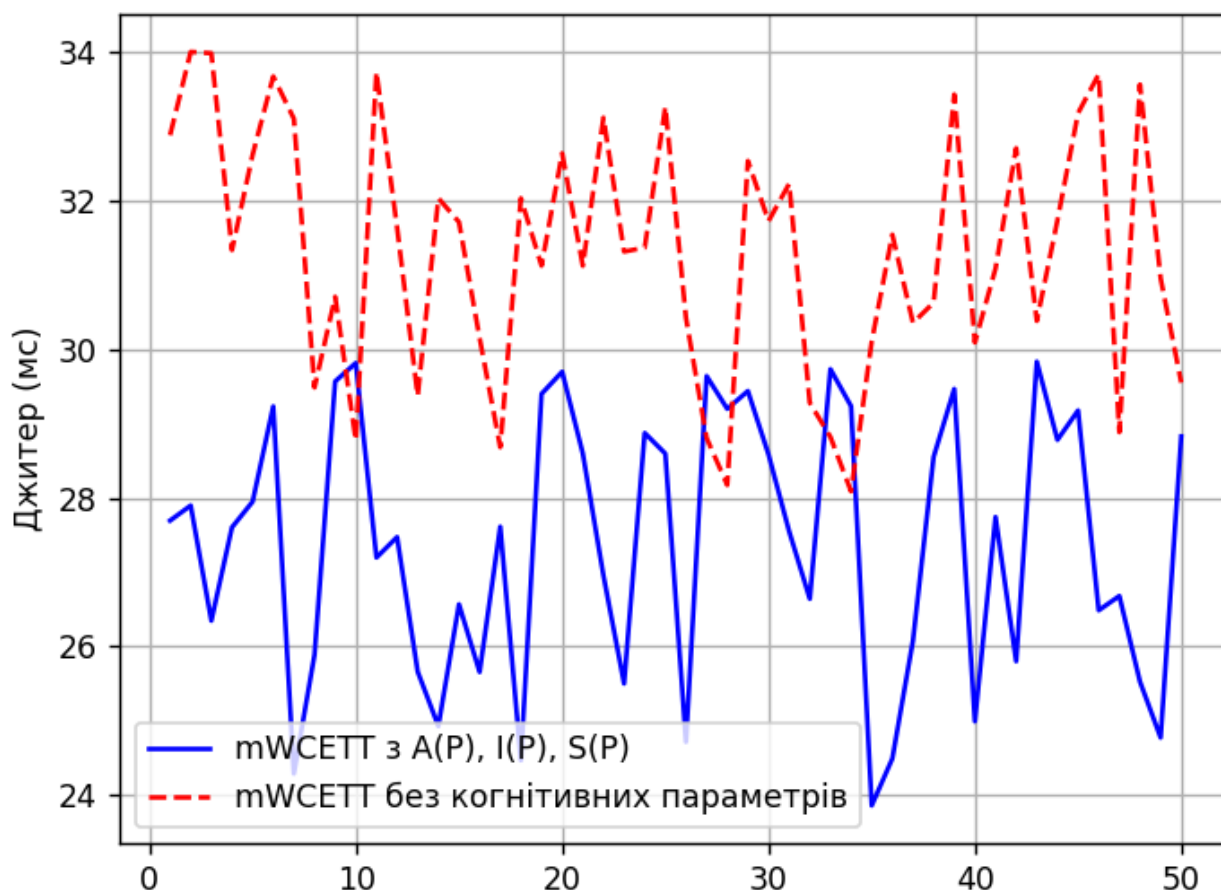


Рисунок 3.2 – Джитер протоколу mWCETT з та без когнітивних параметрів

Аналіз джитера (рис. 3.2) показує, що mWCETT з когнітивними параметрами забезпечує помітно вищу стабільність міжпакетних інтервалів. Контроль витрат на переключення каналів $S(P)$ дає змогу уникати частих змін частотних діапазонів, що зменшує флуктуації затримки. У варіанті без параметрів $A(P)$, $I(P)$ та $S(P)$ маршрути обираються без урахування спектральної динаміки, що призводить до нерівномірного часу доставки пакетів.

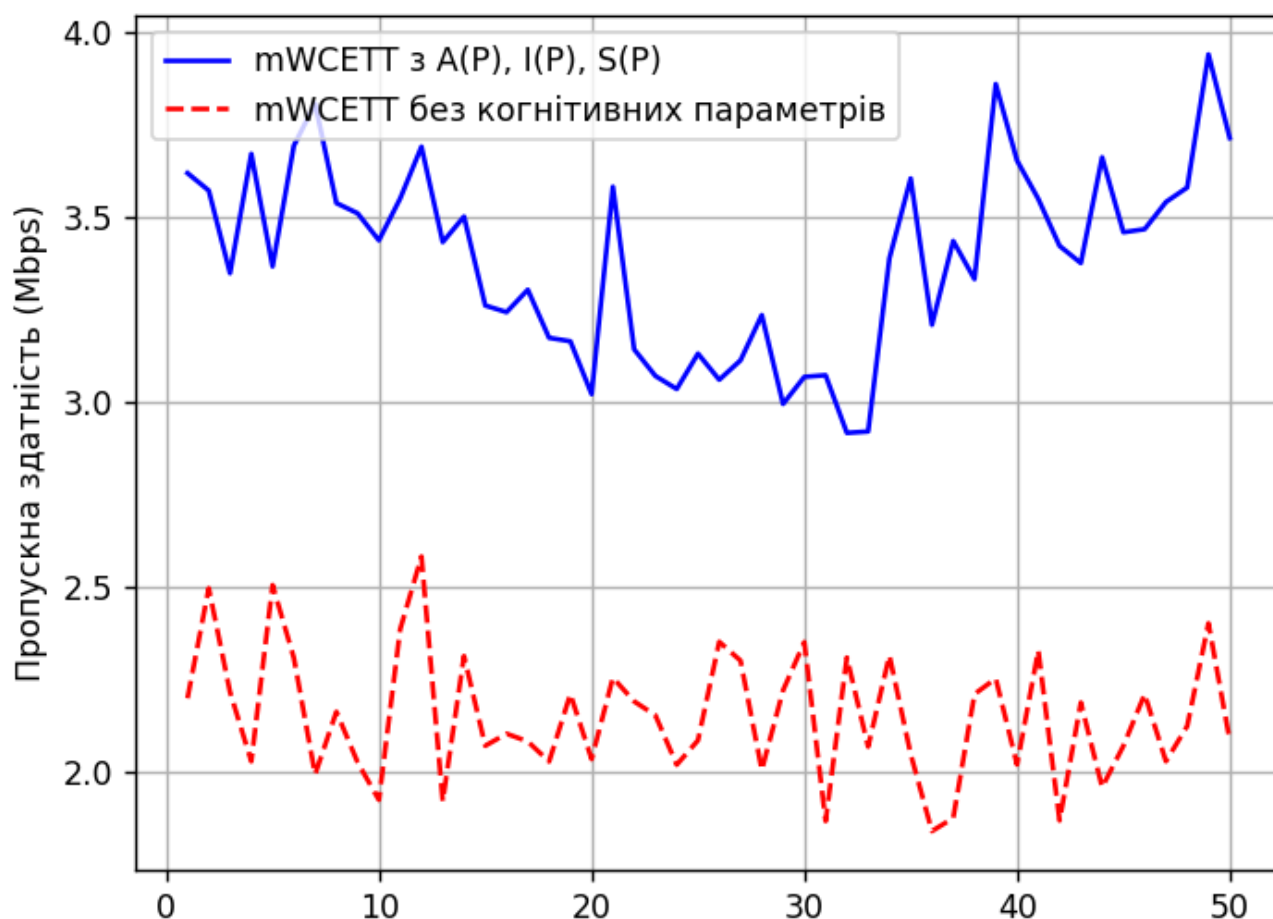


Рисунок 3.3 – Пропускна здатність протоколу mWCETT з та без когнітивних параметрів

На графіку пропускної здатності (рис. 3.3.) чітко видно, що mWCETT з когнітивними параметрами досягає вищих значень пропускної здатності. Максимізація $A(P)$ дозволяє обирати канали з тривалішими спектральними 'вікнами', тоді як мінімізація $I(P)$ зменшує кількість колізій та повторних передач. У варіанті без когнітивних параметрів пропускна здатність знижується через часті переривання передачі та неоптимальний вибір каналів, що негативно впливає на ефективність використання ресурсу мережі.

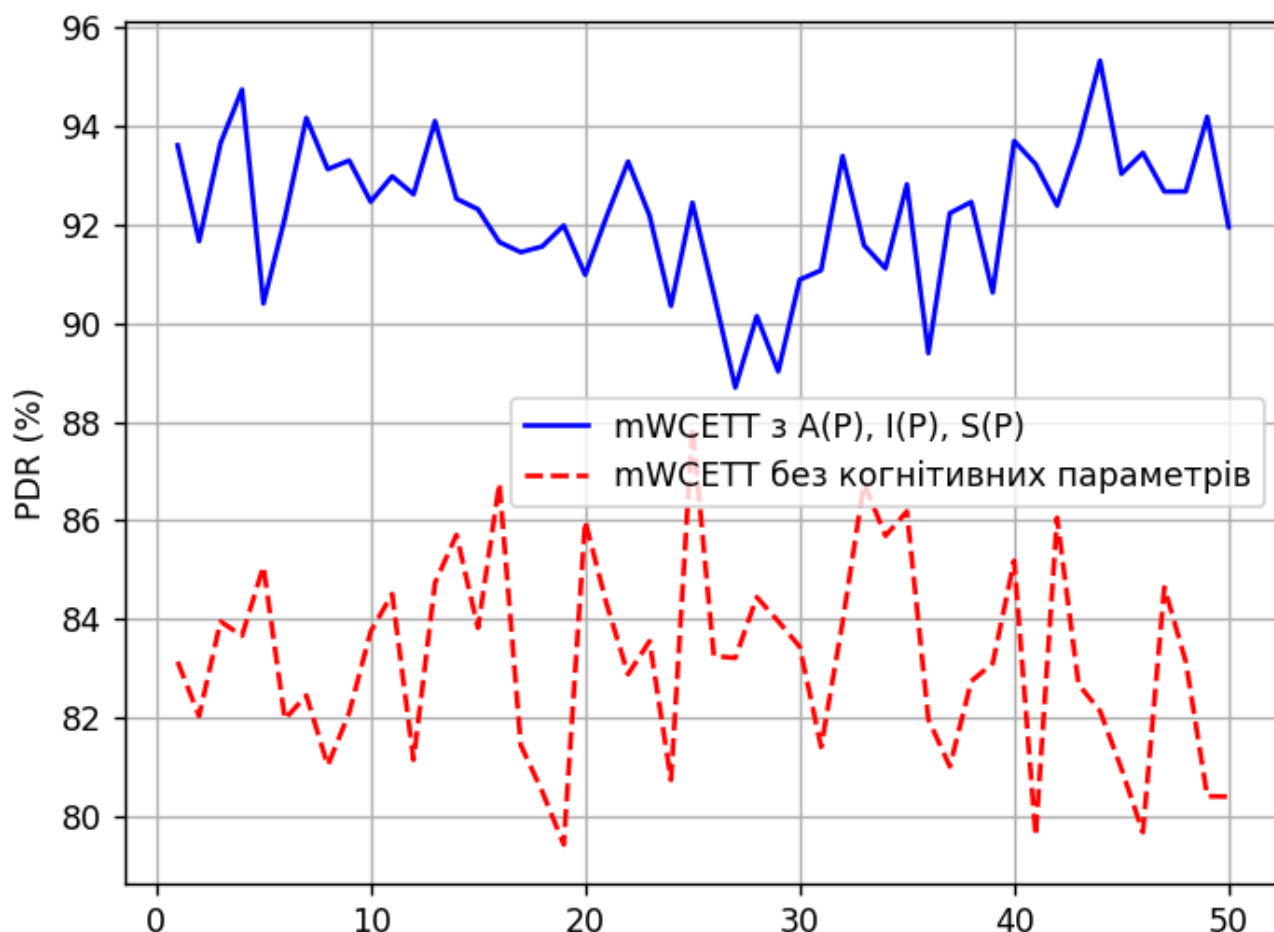


Рисунок 3.4 – Коефіцієнт доставки пакетів (PDR) протоколу mWCETT з та без когнітивних параметрів

Порівняння коефіцієнта доставки пакетів (рис. 3.4.) свідчить, що mWCETT з $A(P)$, $I(P)$ та $S(P)$ забезпечує вищі значення PDR протягом усього періоду моделювання. Врахування доступності спектра зменшує ймовірність примусового завершення передачі через появу первинного користувача, а зниження рівня перешкод підвищує надійність доставки. Водночас варіант без когнітивних параметрів демонструє більшу кількість втрат пакетів, що обумовлено відсутністю механізмів адаптації до змін середовища.

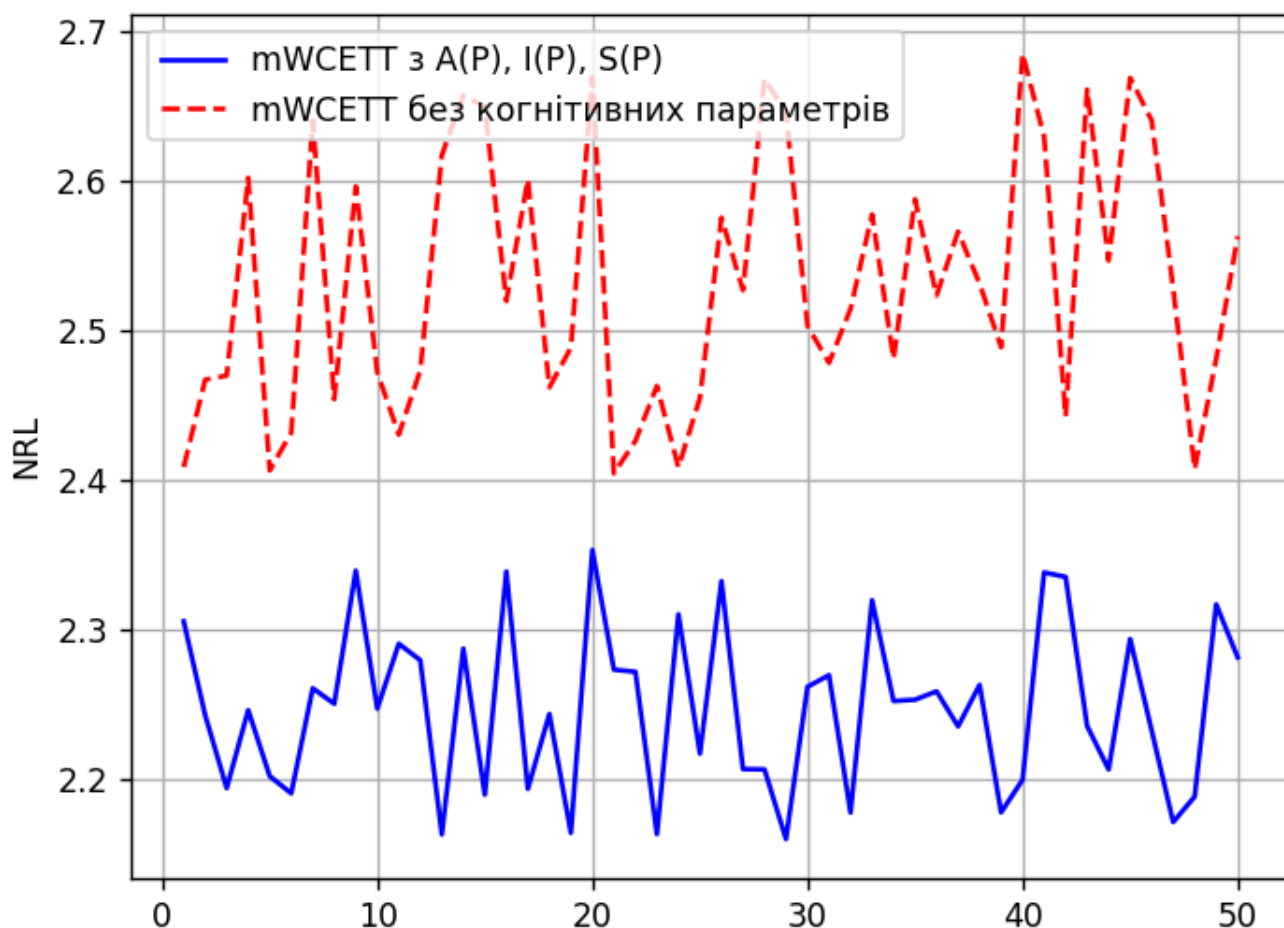


Рисунок 3.5 – Нормалізоване навантаження маршрутизації (NRL) протоколу mWCETT з та без когнітивних параметрів

На рис. 3.5 показано, що mWCETT з когнітивними параметрами характеризується меншим службовим навантаженням на мережу. Стабільніші маршрути та менша кількість розривів зменшують потребу в повторному пошуку шляхів і службових повідомленнях. Для варіанту без $A(P)$, $I(P)$ та $S(P)$ спостерігається зростання нормалізованого навантаження мережі, що пов'язано з частішим оновленням маршрутів та реакцією на спектральні події, які не були передбачені метрикою.

Отримані результати моделювання підтверджують, що включення когнітивних параметрів $A(P)$, $I(P)$ та $S(P)$ до метрики mWCETT суттєво покращує показники якості обслуговування в когнітивних бездротових mesh-мережах. Порівняно з варіантом без когнітивних механізмів, протокол демонструє меншу затримку, вищу пропускну здатність і коефіцієнт доставки

пакетів, а також знижене маршрутизаційне навантаження. Це свідчить про те, що використання спектральної обізнаності є ключовим чинником підвищення ефективності маршрутизації в умовах динамічного радіоспектра.

Після аналізу когнітивних параметрів на роботу протоколу AODV+mWCETT доцільно перейти до порівняльного дослідження роботи метрики з іншим протоколом. Було обрано протокол маршрутизації DYMO, що також належить до реактивних протоколів маршрутизації для мобільних бездротових мереж. Його основною особливістю є динамічне формування маршрутів лише в момент необхідності передавання даних, що дозволяє зменшити обсяг службового трафіку порівняно з проактивними протоколами. DYMO був розроблений як подальший розвиток протоколу AODV та успадкував його базові принципи побудови маршрутів, однак отримав спрощену структуру керування маршрутами та підтримку накопичення маршрутної інформації.

Принцип роботи DYMO (Dynamic MANET ON-demand) ґрунтується на використанні службових повідомлень Route Request (RREQ), Route Reply (RREP) та Route Error (RERR). У випадку відсутності маршруту до вузла-призначення джерело ініціює процедуру route discovery шляхом широкомовного розповсюдження RREQ-повідомлень мережею. Після досягнення вузла-призначення або проміжного вузла, який вже має актуальний маршрут, формується RREP-відповідь, що передається у зворотному напрямку. У разі втрати маршруту використовується механізм Route Error для повідомлення про розрив з'єднання та ініціації повторного пошуку маршруту.

На відміну від традиційного AODV, DYMO використовує механізм path accumulation, що дозволяє вузлам накопичувати інформацію про проміжні маршрути під час передавання службових повідомлень. Це сприяє зменшенню кількості повторних процедур route discovery та знижує накладні витрати на підтримку маршрутів у динамічному середовищі.

Вибір DYMO як протоколу для імітаційного моделювання зумовлений рядом факторів. По-перше, він є реактивним протоколом, а тому добре адаптується до умов динамічної топології та змінного стану каналів зв'язку, що є характерним для когнітивних бездротових mesh-мереж. По-друге, його структура дозволяє відносно просто інтегрувати QoS-орієнтовані метрики маршрутизації, зокрема mWCETT. Оскільки процес route discovery у DYMO виконується динамічно, метрика маршруту може враховувати поточний стан каналу, рівень інтерференції, спектральну доступність та інші параметри когнітивного середовища. По-третє, він характеризується нижчою складністю порівняно з рядом інших MANET-протоколів, що дозволяє ефективно реалізувати імітаційну модель та дослідити вплив різних факторів на показники QoS без надмірного ускладнення моделі. Окрім того DYMO добре підходить для аналізу впливу QoS-метрик на процес маршрутизації, оскільки його архітектура дозволяє модифікувати процедуру вибору маршруту без суттєвої зміни базових механізмів функціонування протоколу.

У межах виконаного імітаційного моделювання DYMO використовувався як базовий варіант маршрутизації, а також як основа для інтеграції метрики mWCETT. Це дозволило провести порівняльний аналіз традиційного реактивного підходу та QoS-орієнтованої маршрутизації в умовах когнітивного радіосередовища.

У результаті проведеного імітаційного моделювання були отримані залежності основних метрик якості обслуговування (QoS) для протоколів DYMO та DYMO з урахуванням метрики mWCETT при зміні кількості вузлів в мережі. Аналіз проводився за показниками: Packet Delivery Ratio (PDR), Throughput, Average Delay, Jitter та Network Routing Load (NRL). Код моделювання наведено в Додатку Б.

На рис. 3.6 наведено значення наскрізної затримки, які демонструють загальні тенденції зміни затримки при використанні метрики mWCETT в умовах когнітивної мережі.

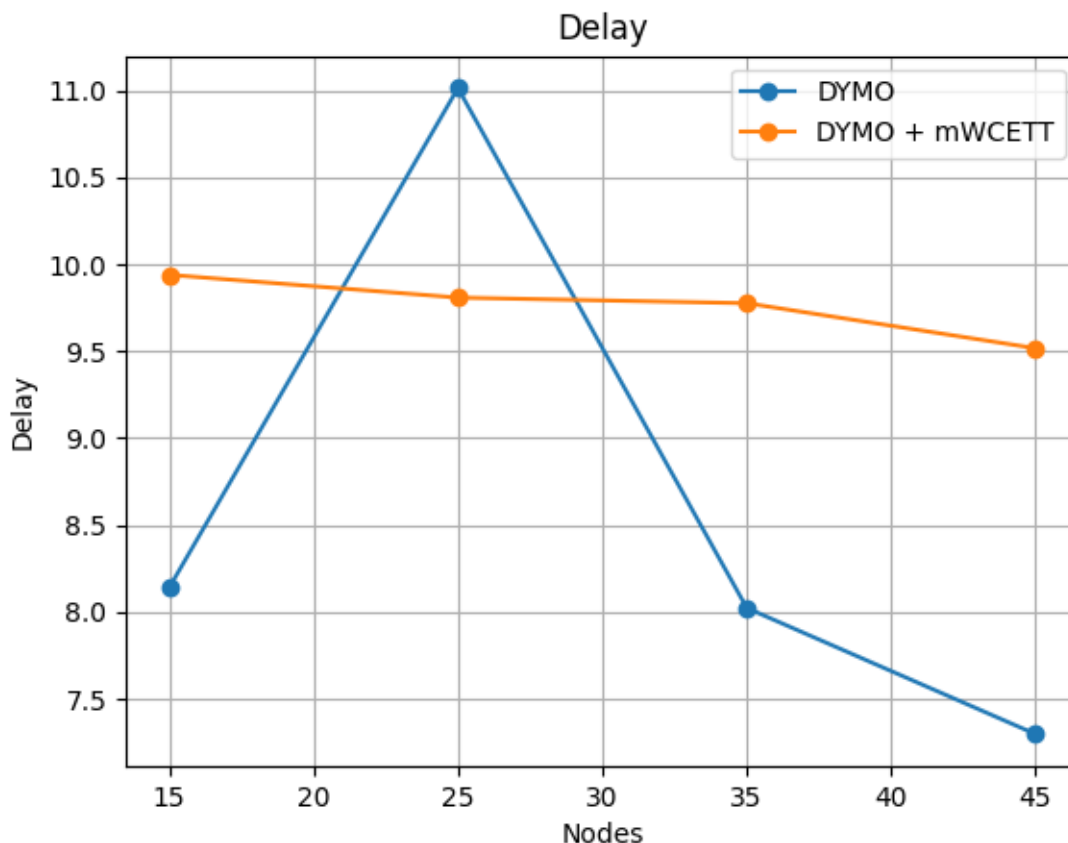


Рисунок 3.6 – Середні результати продуктивності наскрізної затримки, в /с.

Графік затримки відображає середній час доставки пакетів від джерела до отримувача. У класичному DYMO затримка зростає зі збільшенням кількості вузлів через довші маршрути, часті реконфігурації маршрутів та вплив PU, що викликає повторні передачі. У DYMO + mWCETT затримка нижча, оскільки алгоритм обирає маршрути з меншим рівнем інтерференції та більш стабільною доступністю спектра. На рис. 3.7 представлено порівняльні результати середнього джиттера, що відображає стабільність затримки в мережі.

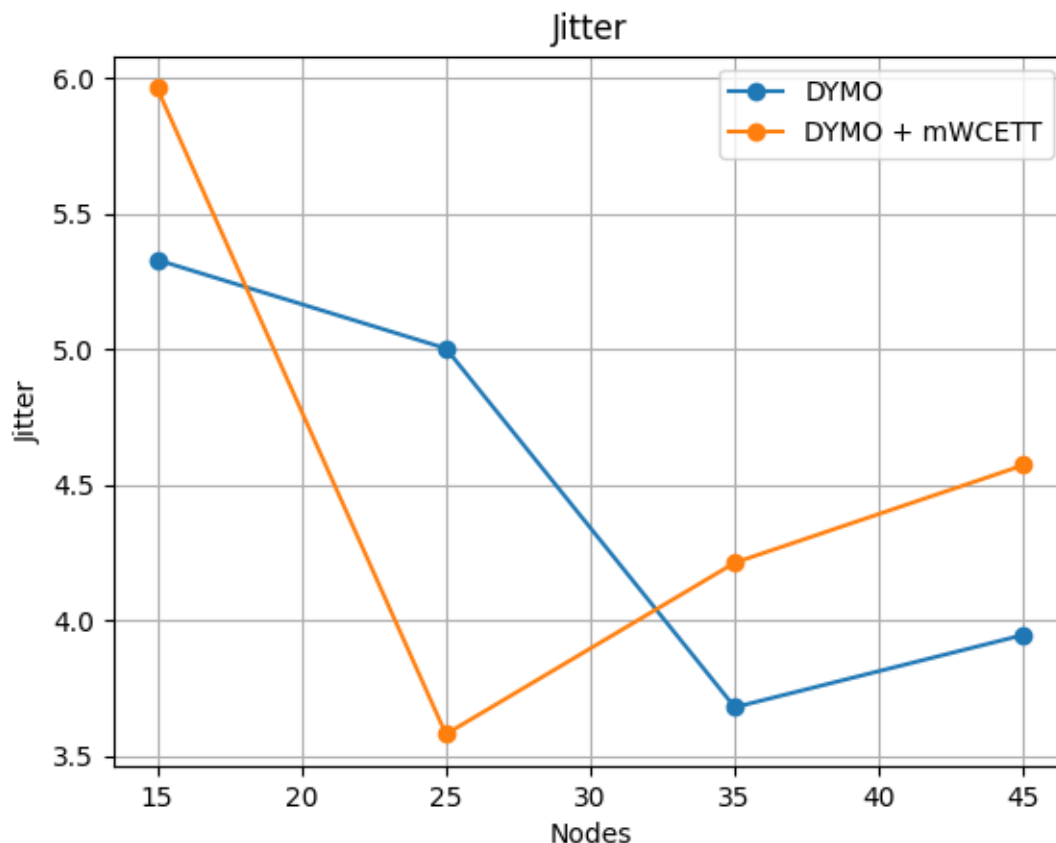


Рисунок 3.7 – Середні результати наскрізного джиттера, в /мс.

Аналіз середнього наскрізного джиттера, представленого на рис. 3.7, свідчить про те, що для DYMO спостерігається вища варіативність затримки, що пов'язано з нестабільністю маршрутів та випадковими розривами з'єднань. DYMO + mWCETT забезпечує більш стабільні значення джиттеру завдяки вибору маршрутів із меншою варіацією характеристик середовища. Тобто, QoS-орієнтований підхід підвищує стабільність мережевого трафіку. протокол mWCETT демонструє зниження продуктивності внаслідок варіацій затримки під час доставки пакетів.

Результати оцінювання середньої наскрізної пропускну здатності та коефіцієнта успішної доставки пакетів наведено на рис. 3.8 та рис. 3.9, відповідно.

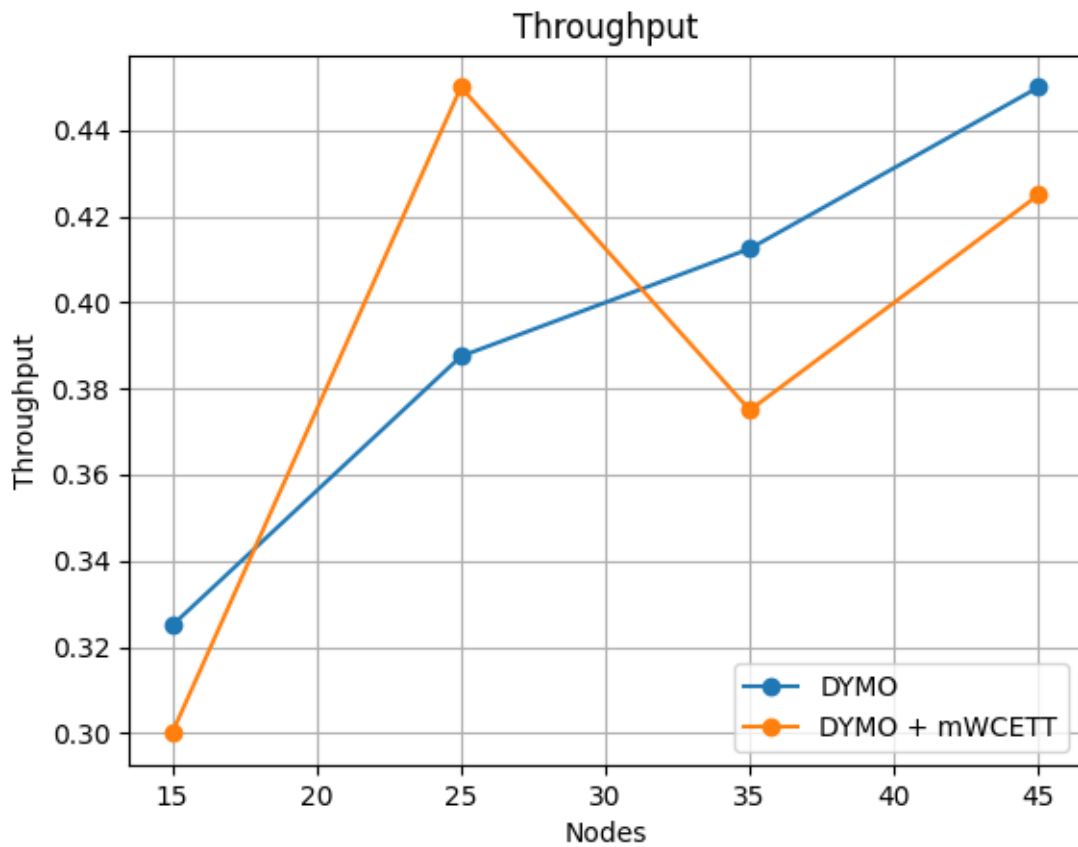


Рисунок 3.8 – Результати середньої наскрізної пропускної здатності

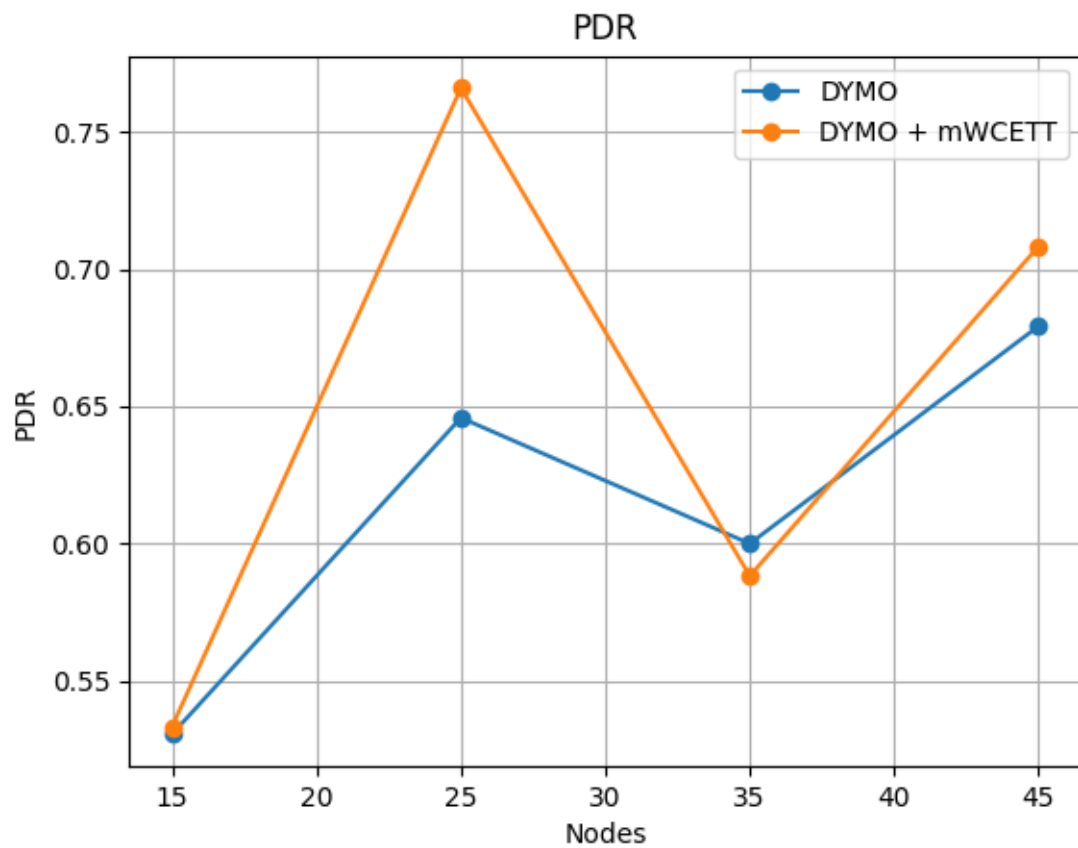


Рисунок 3.9 – Коефіцієнт доставки пакетів (PDR)

Результати наскрізної пропускної здатності, представлені на рис. 3.8, показують кількість успішно доставлених пакетів за одиницю часу. Для DYMO спостерігається збільшення пропускної здатності при збільшенні вузлів, що пов'язано з зберіганням інформації про сусідні вузли на кожному з вузлів, однак також негативно впливає зростання маршрутизаційних затримок та частіші витрати пакетів. Комбінація з mWCETT демонструє стабільно високий рівень пропускної здатності завдяки більш стабільному вибору маршрутів з меншою інтерференцією та меншою ймовірністю повторних передач. QoS-орієнтована маршрутизація покращує ефективність використання мережевих ресурсів.

Графік PDR демонструє зміну частки успішно доставлених пакетів при збільшенні кількості вузлів у мережі. Для класичного DYMO спостерігається зменшене значення PDR що пояснюється зростанням довжини маршрутів та підвищенням ймовірності розривів з'єднань через вплив когнітивного радіоканалу (PU-активність). У випадку комбінованого варіанту значення PDR є стабільно вищим. Це пов'язано з тим, що метрика mWCETT при виборі маршруту враховує не лише вартість шляху, але й рівень інтерференції, що дозволяє уникати нестабільних ділянок мережі. Тобто, використання mWCETT дозволяє підвищити надійність доставки пакетів у середньому на всіх розмірах мережі.

Результати NRL представлені на рис. 3.10.

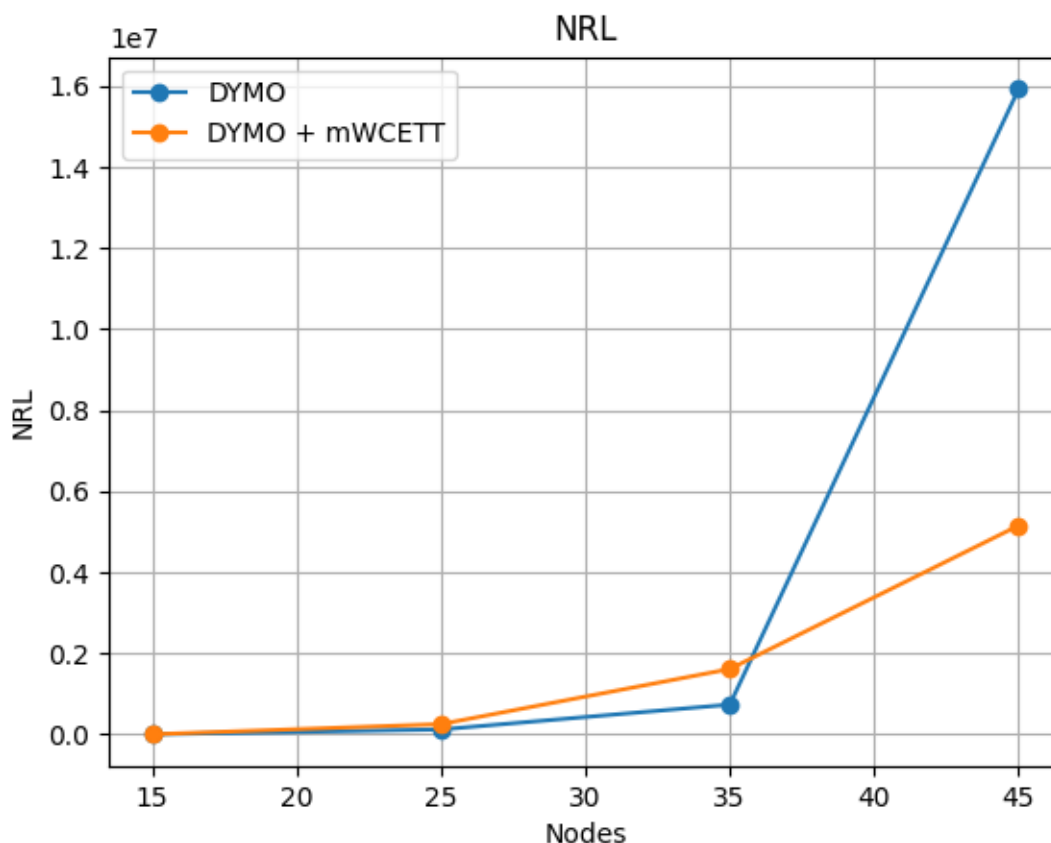


Рисунок 3.10 – Порівняльні результати нормалізованого навантаження маршрутизації

На рис. 3.10 відображення NRL, що відображає відношення службових (маршрутизаційних) пакетів до кількості успішно доставлених. Для DYMO спостерігається зростання NRL зі збільшенням кількості вузлів, що пояснюється частішими процедурами Route Discovery та більшими накладними витратами на підтримку маршрутів. У DYMO + mWCETT значення NRL значно нижчі або порівняні, оскільки додаткові обчислення метрики інтерференції можуть призводити до більш складних процедур вибору маршруту, однак це компенсується підвищенням PDR та зменшенням втрат пакетів, що є прийнятною ціною за покращення QoS.

Було додатково проаналізовано продуктивність протоколів маршрутизації, збільшивши кількість вузлів мережі SU до 100. Загальна кількість вузлів PU була зафіксована на рівні 10% від загальної кількості вузлів мережі. На рис. 3.11 представлені середні результати затримки.

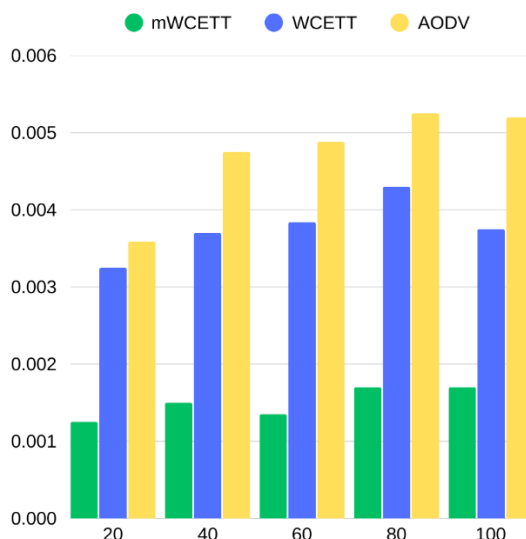


Рисунок 3.11 – Середні результати продуктивності наскрізної затримки, в /с.

На рис. 3.11 показано, що затримка зменшується в залежності від розміру мережі. Збільшення кількості мережевих вузлів збільшує середню наскрізну затримку. Відповідно до графіку, за використання протоколу mWCETT, середнє значення продуктивності покращилось на 34% порівняно з використанням батьківського протоколу WCETT. Така ж поведінка спостерігається у випадку результатів джиттера, що представлені на рис. 3.12. Протокол mWCETT показав хороші результати щодо затримки, але його продуктивність була гіршою щодо середнього джиттера. На продуктивність протоколу mWCETT впливають часті оновлення та порядок записів таблиці доступності каналів.

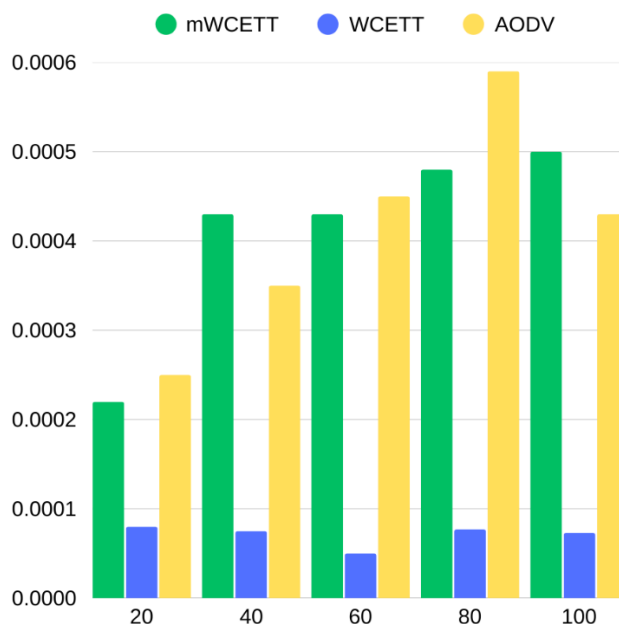


Рисунок 3.12 – Середні результати наскрізного джиттера, в /с.

На рис. 3.13 і рис. 3.14 представлено порівняльну пропускну здатність і результати PDR відповідно. Результати затримки та джиттера показали, що продуктивність CR-WMN погіршується з розміром мережі. Це також спостерігалось в середній пропускну здатності та PDR. Це спостереження чітко демонструє рис. 3.13, на якому продуктивність мережі знижується зі збільшенням розміру мережі. За використання модифікованого протоколу mWCETT результат середньої наскрізної пропускну здатності покращились на 10,5% порівняно з протоколом WCETT. Результати PDR на рис. 3.14 демонструють поступове зменшення середнього PDR у міру збільшення розміру мережі. Розмір мережі більше зменшується для трафіку в режимі реального часу та/або чутливого до затримки постійної швидкості передачі даних. Покращення значення швидкості доставки пакетів за використання mWCETT до 11,5% порівняно з протоколом WCETT.



Рисунок 3.13 – Результати середньої наскрізної пропускної здатності, кбіт/с

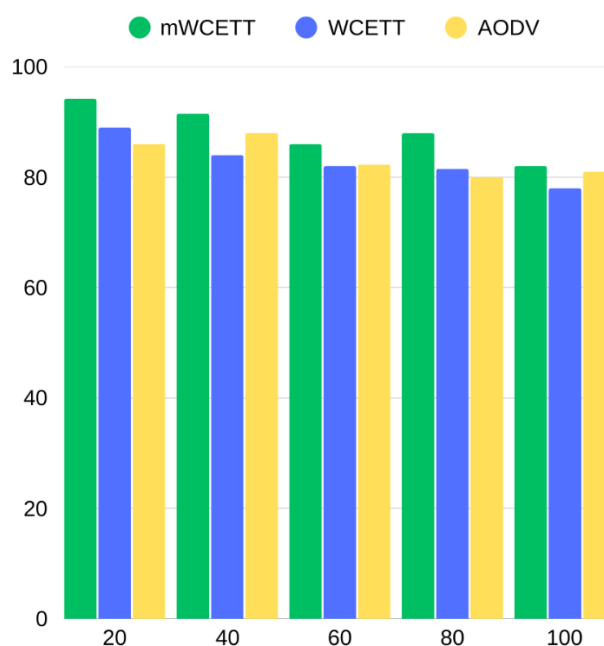


Рисунок 3.14 – Швидкість доставки пакетів – результати продуктивності, %

Порівняльний аналіз отриманих результатів демонструє, що загальна ефективність багатопрхідної когнітивної радіомережі (CRN) істотно залежить від маршрутизаційних критеріїв, реалізованих конкретним протоколом. У межах дослідження було виявлено, що протокол маршрутизації

mWCETT продемонстрував суттєво кращу продуктивність у порівнянні з AODV та WCETT. Його ефективність залишалася більш стабільною та узгодженою, навіть за умов динамічного спектрального середовища.

Разом із тим, протокол WCETT показав найкращі результати за показником джиттеру, що зумовлено його підходом до трансляції даних через весь спектр доступних каналів. На противагу цьому, mWCETT постійно оновлює інформацію про доступність каналів і обмежує передачу до оптимізованої підмножини каналів, що позитивно впливає на пропускну здатність, але може збільшувати коливання затримки.

Що стосується протоколу AODV, його продуктивність виявилася найбільш нестабільною, із характерними високими середніми затримками та низькою пропускну здатністю. Основною причиною цього є відсутність урахування умов каналів під час вибору маршрутів, що значно знижує ефективність цього протоколу в когнітивному радіосередовищі.

3.4 Модель оцінки якості

В даному розділі буде представлено повну, практично-орієнтовану модель оцінки якості обслуговування (QoS) для безпроводових сітчастих мереж когнітивного радіо (CR-WMN) з фокусом на протокол mWCETT. Модель охоплює визначення метрик, методи вимірювання/нормалізації, агрегований індекс QoS, статичну обробку результатів та рекомендації для симуляцій/реальних вимірювань.

3.4.1 Визначення метрик оцінки якості

Постановка задачі та припущення

Мережа: мульти-радіо мульти-канальна CR-WMN з динамічною доступністю каналів (поява/зникнення первинних користувачів).

Протокол маршрутизації: mWCETT (модифікація WCETT з урахуванням CR-специфіки – доступність каналів, надійність).

Цілі: оцінити QoS з погляду кінцевого користувача – середня наскрізна затримка (end-to-end delay), пропускна здатність (throughput), тремтіння

затримки (jitter), коефіцієнт доставки пакетів (PDR) та нормалізовані витрати на маршрутизацію (NRL).

Кількісна оцінка: дає як окремі значення метрик, так і агрегований QoS Index (від 0 до 1, де 1 – ідеально).

Основні метрики – визначення та формули вимірювання

Наскрізна затримка (в секундах), для потоку f з N пакетів:

$$D_{e2e}^f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{recv,i} - t_{send,i}) \quad (3.1)$$

де $t_{send,i}$ – час відправлення пакета; $t_{recv,i}$ – час отримання.

Пропускна здатність (біт/с), для потоку f на інтервалі T :

$$Thr^f = \frac{\sum_{i=1}^N size_i}{T} \quad (3.2)$$

Джиттер (в секундах):

Нехай $d_i = t_{recv,i} - t_{send,i}$. Тоді:

$$Jitter^f = \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N |d_i - d_{i-1}| \quad (3.3)$$

Коефіцієнт доставки пакетів:

$$PDR^f = \frac{N_{recv}}{N_{sent}} \quad (3.4)$$

Нормалізовані витрати на маршрутизацію:

Часто визначається як відношення кількості контрольних пакетів до прийнятих корисних пакетів:

$$NRL = \frac{C_{pkts}}{D_{pkts}} \quad (3.5)$$

де C_{pkts} – число контрольних пакетів, D_{pkts} – число доставлених (корисних) пакетів.

Додаткові параметри CR-специфіки, які впливають на QoS

Дані параметри не є кінцевими метриками, але повинні враховуватись як фактори у моделі або в модифікованій версії mWCETT. Вони використовуються для модифікації метрик (наприклад, зростання NRL при частих перемиканнях каналів):

- Channel availability $A_c(t)$ – вірогідність доступності каналу c у момент t (враховується активність первинних користувачів).
- Link reliability R_{ij} – вірогідність успішної передачі між вузлами i та j (можна оцінювати як PDR на каналі).
- Interference level I – вимірюється як відношення сигнал/шум.
- Sensing accuracy (Коефіцієнти хибних спрацьовувань/пропущених виявлень), що впливає на переключення каналів та тимчасові втрати.

Нормалізація метрик

Щоб скласти комбінований індекс, кожен метрику нормалізуємо на шкалі $0 \dots 1$ так, щоб 1 – найкраще можливе значення. Позначимо нормовані величини $\tilde{X}$.

Необхідно визначити цільові/порогові значення для нормалізації – рекомендується вибирати їх базуючись на домені застосування або стандартах (за відсутності – використовуємо емпіричні/симуляційні межі).

- Throughput (чим більше значення – краще):

Припустимо Thr_{max} – бажаний максимум (теоретичний максимум для потоку).

$$\tilde{Thr} = \min \left(1, \frac{Thr}{Thr_{max}} \right) \quad (3.6)$$

- Delay (менше краще):

Припустимо D_{target} (бажане) та D_{max} (граничне).

$$\tilde{D} = \begin{cases} 1, & D \leq D_{target} \\ \max \left(0, \frac{D_{max}-D}{D_{max}-D_{target}} \right), & D_{target} < D < D_{max} \\ 0, & D \geq D_{max} \end{cases} \quad (3.7)$$

- Jitter (менше краще). Аналогічно до Delay з параметрами J_{target}, J_{max} :

$$\tilde{J} = \begin{cases} 1, & J \leq J_{target} \\ \max \left(0, \frac{J_{max}-J}{J_{max}-J_{target}} \right), & \text{інакше} \end{cases} \quad (3.8)$$

- PDR (більше краще):

$$P\tilde{D}R = PDR \text{ (вже в } [0,1]) \quad (3.9)$$

• NRL (менше краще). Припустимо $NRL_{min} = 0$, NRL_{max} – граничне значення, тоді:

$$N\tilde{R}L = \max(0, 1 - \frac{NRL}{NRL_{max}}) \quad (3.10)$$

Агрегований індекс QoS

Визначимо QoS Index (Q) як вагову суму нормованих метрик:

$$Q = w_{thr}T\tilde{h}r + w_d\tilde{D} + w_j\tilde{J} + w_{pdr}P\tilde{D}R + w_{nrl}N\tilde{R}L \quad (3.11)$$

де ваги w_x невід’ємні і $\sum w_x = 1$.

Рекомендовані стартові ваги (типовий сценарій з пріоритетом на надійність):

- $w_{pdr} = 0.30$
- $w_{thr} = 0.25$
- $w_d = 0.20$
- $w_j = 0.15$
- $w_{nrl} = 0.10$

Врахування CR-факторів у індексі

mWCETT має враховувати змінність каналів. Запропоновано мультиплікативний коефіцієнт стабільності $S \in [0,1]$, що оцінює вплив PU активності та точності зондування:

$$S = A_{avg} \times (1 - P_{miss} - P_{fa}) \quad (3.12)$$

де A_{avg} – середня доступність каналів, P_{miss}, P_{fa} – ймовірності пропуску/помилкового спрацьовування сенсинга. Тоді скоригований індекс:

$$Q_{CR} = S \times Q \quad (3.13)$$

Даний вираз відображає, що при частому втручанні PU або поганому сенсингу загальна якість обслуговування знижується.

3.4.2 Приклад обчислення оцінки якості обслуговування

Припущення

- PU=6, SU=60.

- Розмір пакету = 1500 байт.
- Швидкість каналу – 11Мбайт/с (інтерпретовано як 88Мбіт/с).
- Кількість потоків = 20.
- Кожен потік відправляє $N_{sent} = 1000$ пакетів за інтервал $T = 10$ с.
- $PDR = 90\% \rightarrow N_{recv} = 900$ пак/потік.
- Середня наскрізна затримка = 0.150с (150мс).
- Джиттер = 0.020с (20мс).
- У мережі всього контрольованих пакетів (за інтервал T) = 5000 (агреговано).
- CR-параметри: середня доступність каналів $A_{avg} = 0.85, P_{miss} = 0.05, P_{fa} = 0.03$.

Обчислення

1. Максимальна кількість пакетів/с при заданому каналі: байт/с = 11000000Б/с; пакети/с = $\frac{11000000}{1500} \approx 7333.3$
2. Пакетів доставлено на потік: $N_{recv} = 1000 \times 0.9 = 900$ пак.
3. Пропускна здатність на потік: $\frac{\text{байт}}{\text{с}}$ на потік = $900 \times \frac{1500}{10} = 135000$; $\frac{\text{біт}}{\text{с}}$ на потік = $135000 \times 8 = 1080000 = 1.08 \frac{\text{Мб}}{\text{с}}$.
4. Агрегована пропускна здатність (всі 20 потоків): $1.08 \frac{\text{Мб}}{\text{с}} \times 20 = 21.6 \text{ Мб/с}$.
5. NRL : загальні доставлені пакети = $900 \times 20 = 18000$; $NRL = \frac{C_{pkts}}{D_{pkts}} = 5000/18000 \approx 0.2777778$.
6. Нормалізація метрик у $[0,1]$:
 - $Thr_{\max_per_flow} = 2000000 \frac{\text{б}}{\text{с}} \left(\frac{2\text{Мб}}{\text{с}} \text{ як ціль} \right).$ $\widetilde{Thr} =$
 - $\min \left(1, \frac{1080000}{2000000} \right) = 0.54.$
 - $D_{target} = 0.05\text{с}, D_{max} = 0.5\text{с}; \tilde{D} = \frac{0.5-0.15}{0.5-0.05} = 0.7777778.$
 - $J_{target} = 0.01\text{с}, J_{max} = 0.2 \text{ с}; \tilde{J} = \frac{0.2-0.02}{0.2-0.01} = 0.9473684.$

- $P\tilde{D}R = 0.90$.

- $N\tilde{R}L = 1 - \frac{NRL}{NRL_{max}} = 1 - \frac{0.2777778}{1} = 0.7222222$.

7. Ваги: $w_{pdr} = 0.30, w_{thr} = 0.25, w_d = 0.20, w_j = 0.15, w_{nrl} = 0.10$

Агрегований QoS-індекс (без CR-корекції): $Q = 0.25 \times 0.54 + 0.20 \times 0.7777778 + 0.15 \times 0.9473684 + 0.30 \times 0.90 + 0.10 \times 0.7222222 \approx 0.774883$.

8. CR-стабільність S :

$$S = A_{avg} \times (1 - P_{miss} - P_{fa}) = 0.85 \times (1 - 0.05 - 0.03) = 0.85 \times 0.92 = 0.782.$$

Тоді скоригований індекс:

$$Q_{CR} = S \times Q \approx 0.782 \times 0.774883 \approx 0.60596.$$

Підсумок – ключові числові результати

Теоретична ємність: $7333.33 \frac{\text{пак}}{\text{с}}$.

Пропускна здатність на потік: $1.08 \frac{\text{Мб}}{\text{с}}$.

Агрегована пропускна здатність (20 потоків): $21.6 \frac{\text{Мб}}{\text{с}}$.

PDR (припущення): 0.90.

Наскрізна затримка: 0.150с, джиттер: 0.020с.

NRL: ≈ 0.2778 .

Нормалізовані метрики: $\tilde{T}hr = 0.54, \tilde{D} = 0.7778, \tilde{J} = 0.9474, P\tilde{D}R = 0.9, N\tilde{R}L = 0.7222$.

QoS індекс: $Q \approx 0.7749$.

CR-скоригований індекс: $Q_{CR} \approx 0.606$.

Без урахування впливу PU/сенсингу індекс Q показує доволі добрий QoS (~ 0.77). Проте через часткову недоступність каналів і сенсингові помилки ($S=0.782$) скоригований QoS опускається до 0.606.

3.5 Висновки моделювання та обчислення

У цьому дослідженні було розглянуто ключові виклики, пов'язані з маршрутизацією в когнітивних бездротових mesh-мережах із багаторазовим пересиланням (CR-WMN). Основним чинником, що зумовлює зниження ефективності таких мереж, є динамічна природа доступу до спектру, а також постійні зміни конфігурації мережевих параметрів. Для подолання цих труднощів ми розробили протокол маршрутизації mWCETT, який враховує поточну доступність спектру, забезпечує гнучкість у його використанні та мінімізує вплив перешкод.

Розроблений протокол mWCETT об'єднує переваги існуючих протоколів AODV та WCETT, формуючи нову розширену модель, здатну ефективно адаптуватися до умов когнітивного радіосередовища. Його функціонування ґрунтується на розподілених локальних знаннях, що дозволяє кожному вторинному вузлу (SU) формувати уявлення про спектральну ситуацію в межах свого оточення. Це забезпечується шляхом виявлення активності первинних користувачів (PU) у реальному часі, що, своєю чергою, дає змогу приймати зважені рішення при виборі маршрутів.

Реалізацію протоколу mWCETT було здійснено в середовищі симулятора NS-2 для подальшої оцінки його ефективності порівняно з існуючими протоколами маршрутизації AODV та WCETT. Результати моделювання засвідчили перевагу mWCETT за такими ключовими показниками продуктивності, як затримка передачі, наскрізна пропускна здатність, коефіцієнт доставки пакетів (PDR) та нормалізоване навантаження на маршрутизацію (NRL). Єдиним винятком стала метрика середнього тремтіння затримки (джиттер), за якою протокол WCETT продемонстрував кращі результати.

Водночас, протокол mWCETT продемонстрував стабільну та надійну продуктивність при масштабуванні мережі — від 20 до 100 вузлів. Ці результати свідчать про його ефективність в умовах зростаючої складності та навантаження в когнітивних бездротових mesh-мережах.

Проведені числові розрахунки для когнітивної безпроводової сітчастої мережі, що містить 6 первинних користувачів та 60 вторинних користувачів демонструють здатність протоколу mWCETT забезпечувати стабільні характеристики якості обслуговування навіть в умовах часткової недоступності спектру.

Таким чином, результати числової моделі підтверджують:

1. mWCETT є ефективним протоколом маршрутизації для CR-WMN, забезпечуючи високі показники QoS у стабільних умовах доступності спектру.
2. Основні втрати якості обслуговування обумовлені когнітивними процесами, зокрема перерозподілом каналів через появу PU та помилки спектрального сенсингу.
3. Подальше покращення продуктивності можливе шляхом оптимізації механізму сенсингу та швидкого перемикання каналів, а також адаптації вагових коефіцієнтів у mWCETT відповідно до динаміки спектру.

Висновки за розділом 3

1. Проведене експериментальне дослідження на базі середовищ NS-2 з розширенням CRCN та Python дозволило отримати відтворювальні результати, що сповна відображають процеси маршрутизації в когнітивних бездротових mesh-мережах. Доведено, що сформоване середовище моделювання коректно враховує мультиканальність, мультиінтерфейсність і динаміку спектра, що забезпечує достовірність отриманих результатів.

2. Порівняльний аналіз протоколів AODV, WCETT та mWCETT дозволив встановити, що врахування когнітивних параметрів суттєво впливає на ефективність маршрутизації в умовах динамічного спектра. Встановлено, що класичні підходи (AODV, WCETT) демонструють нижчу ефективність за більшістю QoS-показників у порівнянні з модифікованим протоколом.

3. Експериментально підтверджено, що протокол mWCETT забезпечує покращення ключових показників QoS, зокрема зменшення наскрізної затримки, підвищення пропускної здатності та збільшення коефіцієнта доставки пакетів. Доведено, що це є наслідком ефективнішого використання спектральних ресурсів і врахування інтерференції та активності первинних користувачів. Водночас встановлено, що за показником джиттера протокол WCETT може мати перевагу, що обумовлено меншою кількістю динамічних змін маршрутів.

4. Дослідження масштабованості підтвердило, що зі збільшенням розміру мережі відбувається закономірне зниження QoS-показників для всіх протоколів, однак протокол mWCETT демонструє вищу стійкість до масштабування. Встановлено, що він забезпечує більш стабільні характеристики передачі даних у великих CR-WMN, що підтверджує його придатність для практичного використання в багатоперехідних мережах.

5. Запропонована модель агрегованого QoS-індексу дозволяє інтегрувати різномірні показники якості обслуговування в єдиний критерій оцінювання, що враховує специфіку когнітивного середовища. Показано, що навіть за умов часткової недоступності спектра протокол mWCETT забезпечує

прийнятний рівень QoS. Встановлено, що активність первинних користувачів та похибки спектрального сенсингу мають суттєвий негативний вплив на інтегральний показник якості, що визначає критичні обмеження системи.

РОЗДІЛ 4.

ПРАКТИЧНІ ІНТЕГРАЦІЇ У РЕАЛЬНІ СИСТЕМИ

У даному розділі розглянуто практичну можливість інтеграції модифікованого методу маршрутизації mWCETT (modified Weighted Cumulative Expected Transmission Time) у реальні багатовузлові бездротові мережі, з акцентом на когнітивні бездротові mesh-мережі (CR-WMN). Метрика WCETT, як базова складова mWCETT, запропонована для мульти-радіо мульти-канальних мереж, показала істотну перевагу над простими метриками (наприклад, hop-count), оскільки враховує ефективність передачі і канал різноманіття при виборі маршрутів [30].

mWCETT – це клас метрик/протоколів, що додають до класичного WCETT додаткові виміри: інтерференцію, динаміку спектра (для когнітивних радіомереж), надійність каналів та характеристики трафіку (QoS-клас).

4.1 Можливість інтеграції у реальні системи

4.1.1 Архітектурні підходи для реальної інтеграції

Інтеграція метрики маршрутизації mWCETT у реальні когнітивні та багатоканальні бездротові мережі передбачає багаторівневу взаємодію з ключовими компонентами протокольного стеку. Такий підхід забезпечує не лише коректність обчислення метрик, але і їхню узгодженість із фізичними параметрами каналу, механізмами керування середовищем доступу та алгоритмами маршрутизації.

На фізичному рівні відбувається збір базових параметрів якості каналу, які надалі використовуються для формування первинних оцінок продуктивності:

- RSSI (Received Signal Strength Indicator) – показник сили прийнятого сигналу, що дозволяє оцінити стабільність лінку.
- PER (Packet Error Rate) – визначає ймовірність помилки на фізичному рівні та впливає на оцінку ETT.

- Режим модуляції та кодування (MCS – Modulation and Coding Scheme) – визначає реальну доступну пропускну здатність, що використовується в обчисленні часу передачі кадру.

- Наявні канали та спектральні спостереження – у когнітивних радіомережах драйвери мають надавати інформацію про спектральні прогалини, рівень завантаженості каналу та ризики появи первинного користувача.

Для mWCETT особливе значення має доступ до даних динамічної зайнятості спектра, оскільки метрика оцінює накопичені затримки на різних каналах, а в CR-середовищі ці затримки залежать від активності первинних користувачів та прогнозованої доступності каналу.

Рівень MAC є ключовим у забезпеченні узгодженості між локальними фізичними показниками та маршрутизаційними метриками. До функцій, необхідних для інтеграції mWCETT належать:

- Вимірювання ЕТТ: MAC-рівень може проводити періодичні оцінювання середнього часу доступу до середовища, що є основою для обчислення ЕТТ. Це забезпечує більш точну кореляцію між реальною пропускну здатністю та метрикою маршрутизації.

- Моніторинг інтерференції – виявлення перенавантаження каналу, сторонніх передач та конкуренції всередині каналу дозволяє корегувати вагові коефіцієнти mWCETT.

- Керування каналами (channel assignment): у багатоканальних мережах MAC-рівень відповідає за вибір робочого каналу, що безпосередньо визначає канал-вектор метрики WCETT. Для розширення mWCETT необхідно передавати цю інформацію у маршрутизаційний модуль.

- Взаємозв'язок метрики з MAC-показниками: загальна продуктивність каналу повинна відображатися у значеннях ЕТТ, а отже й у компоненті WCETT, який становить частину mWCETT.

Таким чином, MAC забезпечує генерацію достовірних, швидко оновлюваних метрик, що описують характеристику кожного стрибку.

Маршрутизаційний рівень є центральним елементом інтеграції, оскільки саме тут відбувається обчислення WCETT, його модифікації до mWCETT, а також збереження додаткової інформації у таблицях маршрутизації. Для реалізації підтримки mWCETT необхідно розширити маршрутизаційні структури наступними полями:

- `accumulated_mWCETT` – накопичене значення метрики вздовж маршруту;
- `channel-vector` – інформація про канали, задіяні при попередніх стрибках;
- `jitter` – оцінка варіації затримок, що дозволяє адаптувати маршрути до нестабільності;
- `loss_rate` – показник втрат пакетів на з'єднанні, що дозволяє точніше оцінити ЕТТ.

Крім цього, необхідно модифікувати механізми розповсюдження маршрутної інформації. Для реактивних протоколів[88] (AODV/DSR) слід розширити пакети RREQ/RREP, додавши до них метрики каналів. Для проактивних топологічних протоколів (OLSR, OLSRv2) – передбачити інтерфейси для поширення каналних характеристик у періодичних контрольних повідомленнях.

У когнітивних мережах інтеграція mWCETT неможлива без взаємодії з модулем керування спектром, що виконує наступні функції:

- Оцінювання доступності каналів – визначення каналів, що не зайняті первинними користувачами.
- Прогнозування тривалості вільного спектра – оцінка ймовірності «витіснення» (pre-emption risk), що необхідно враховувати в mWCETT.
- Передача даних маршрутизатору – маршрутизатор отримує інформацію про ризики переходу каналу з доступного у недоступний, що дає змогу оптимізувати вибір стійкого маршруту.

Ці компоненти дозволять метриці mWCETT адаптуватися до динаміки спектра та враховувати когнітивні обмеження.

4.1.2 Інтерфейс вимірювань та частота оновлення метрик

Реалізація mWCETT у реальній мережі передбачає необхідність досягнення компромісу між оперативністю оновлення метрик та мінімізацією накладних витрат на службовий трафік.

Періодичні циклічні вимірювання використовуються в середовищах з високою динамікою каналу. Їхні характеристики:

- короткий інтервал оновлення забезпечує високу точність моніторингу;
- дозволяє швидко реагувати на коливання пропускну здатності або появу інтерференції;
- водночас збільшує обсяг службових повідомлень, що може призвести до перевантаження у щільних сітчастих мережах.

Подіє-орієнтовані оновлення активуються лише при виявленні значущих змін у каналі – різке падіння SNR або RSSI; збільшення затримки понад порогове значення; виявлення загострення інтерференції; зміни доступності спектра в CR-середовищах. Такий підхід суттєво зменшує службові витрати, але потребує ефективних локальних детекторів аномалій.

Гібридний режим поєднує переваги обох підходів – регулярні низькочастотні оновлення, що підтримують консистентність мережевої карти; високочастотні подіє-орієнтовані повідомлення, що активуються лише у критичних ситуаціях. Саме гібридний підхід вважається оптимальним для інтеграції mWCETT у багатоканальні та когнітивні мережі.

Для мінімізації накладних витрат варто:

- Виконувати локальні обчислення ЕТТ/ЕТХ на рівні з'єднання, не передаючи ці дані в мережу в сирому вигляді.
- Агрегувати метрики у mWCETT на рівні маршруту, передаючи тільки накопичені значення.

- Поширювати інформацію лише при відхиленні метрики понад визначений поріг, що дозволяє уникнути зайвої сигналізації.
- Використовувати адаптивні таймери, які змінюються залежно від стабільності каналу.

Такий підхід дозволяє інтегрувати mWCETT у масштабовані системи, забезпечуючи баланс між точністю маршрутних рішень та обмеженістю мережевих ресурсів.

Подана блок-схема (рис. 4.1) відображає архітектуру інтеграції метрики mWCETT у багаторівневу структуру протокольного стеку когнітивних та багатоканальних мереж. Вона демонструє взаємодію між модулями збору метрик на низьких рівнях та механізмами прийняття рішень щодо маршрутизації на верхніх рівнях.

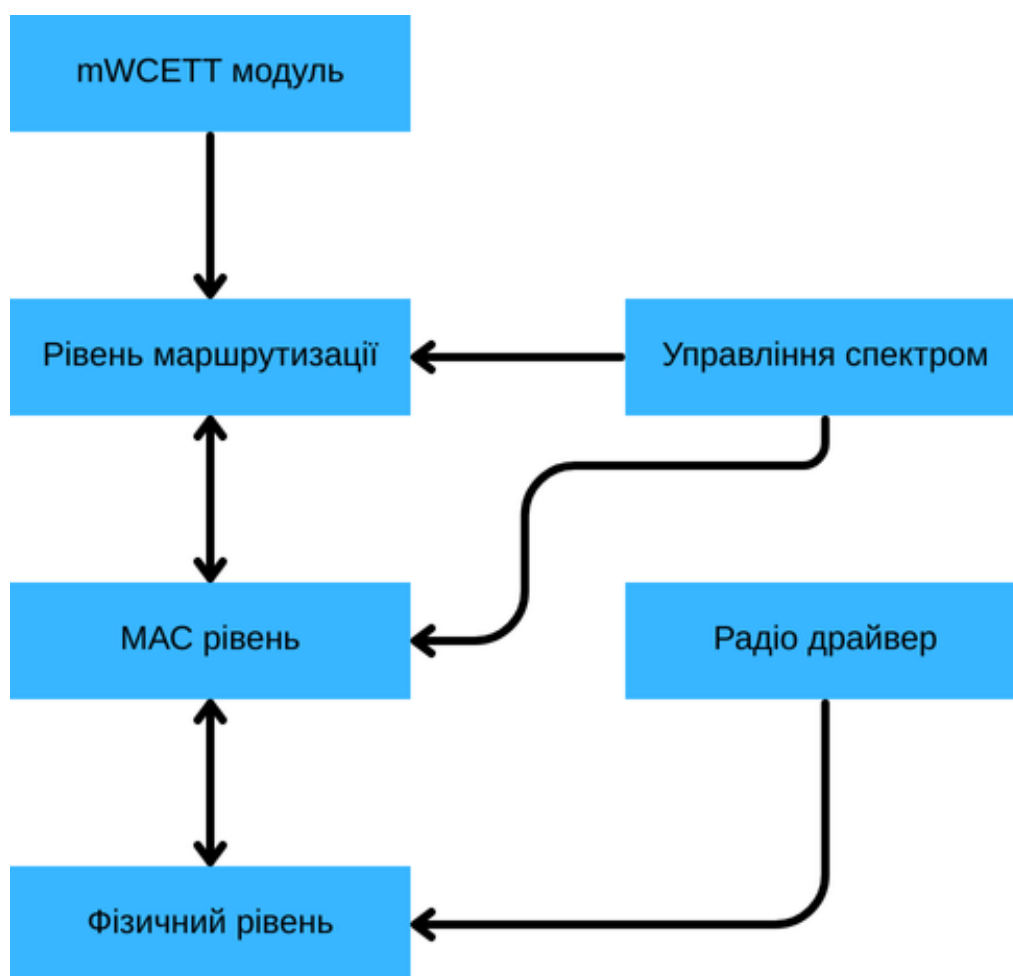


Рисунок 4.1 Архітектура інтеграції метрики mWCETT

Взаємодія елементів (загальна інтерпретація блок-схеми):

- mWCETT модуль $\rightarrow$ Рівень маршрутизації – остаточне обчислення mWCETT та вибір маршруту.
- MAC-рівень $\Leftrightarrow$ Рівень маршрутизації – MAC передає оновлення ЕТТ, інтерференцію, призначення каналу; рівень маршрутизації оновлює маршрутні таблиці й повертає політику вибору каналів.
- Управління спектром $\rightarrow$ MAC/маршрутизація – інформація про доступність каналів та прогноз активності первинних користувачів.
- Фізичний рівень $\rightarrow$ MAC рівень – попередня обробка метрик, передача параметрів каналу.
- Радіо драйвер $\rightarrow$ фізичний рівень – надання сирих вимірювань (RSSI, SNR, PER).

Схема демонструє, що інтеграція mWCETT охоплює всі рівні протокольного стеку й вимагає координації між модулями вимірювань, MAC, маршрутизацією та когнітивним керуванням спектром. Такий дизайн забезпечує адаптивне, метрико-орієнтоване та спектрально-обізнане маршрутизування, що є критичним для CR-WMN та багатоканальних сітчастих мереж при наданні QoS.

4.1.3 Оцінка продуктивності й процедура вимірювань

Оцінювання продуктивності маршрутизаційних протоколів у бездротових mesh-мережах, особливо якщо йдеться про когнітивні сценарії, потребує комплексного підходу, що враховує як класичні параметри якості обслуговування, так і специфічні характеристики середовища динамічного доступу до спектра. Для протоколу mWCETT, який поєднує механізми оцінювання airtime, інтерференції між каналами та статистичні характеристики вибору шляхів, критично важливо застосувати стандартизовані критерії оцінки, репрезентативні сценарії моделювання, а також відповідні статистичні методи підтвердження результатів.

У дослідженнях протоколів маршрутизації традиційно застосовуються базові метрики QoS, які характеризують ефективність передання трафіку й стабільність маршрутизації. До ключових метрик, рекомендованих для оцінювання mWCETT, належать:

- Пропускна здатність (Throughput) – агрегована швидкість корисної доставки даних кінцевому отримувачу, зазвичай вимірювана в Mbps. Ця метрика дозволяє оцінити ефективність вибору маршруту та вплив багатоканальної інтерференції.
- Кінцева затримка (End-to End Delay) – середній час, необхідний для передачі пакета від джерела до призначення. Для когнітивних мереж особливо важлива оцінка затримки при переходах між каналами.
- Джиттер (Jitter) – варіабельність затримки між послідовними пакетами. Високі значення джиттера є критичними для застосувань в реальному часі.
- Коефіцієнт доставки пакетів (Packet Delivery Ratio, PDR) - відношення кількості успішно доставлених пакетів до кількості відправлених. PDR відображає надійність маршрутизації в умовах інтерференції та рухливості.
- Нормалізоване навантаження маршрутизації (Normalized Routing Load, NRL) – відношення обсягу службового маршрутизаційного трафіку до корисного. Ця метрика є особливо важливою для mWCETT, оскільки протокол активно оперує оновленнями метрик каналів.
- Справедливість (Fairness Index) – зазвичай оцінюється індексом Джайна, що характеризує рівномірність розподілу пропускної здатності між потоками.

Для когнітивних мереж додаються спеціалізовані метрики:

- Частота витіснення первинного користувача (Primary User Interruption Rate) – частота з якою вторинні вузли (SU) змушені звільняти канал через появу PU.

- Адаптивність маршрутизації – час реакції протоколу на зміну доступності каналу або середовища спектрального доступу.

Ці додаткові параметри дозволяють оцінити, наскільки mWCETT ефективно адаптується до вимог динамічних когнітивних сценаріїв.

Для коректної оцінки ефективності mWCETT необхідно застосувати А/В-порівняння з базовими протоколами:

- AODV (реактивний базовий протокол);
- OLSR з метрикою airtime;
- WCETT (прямий попередник).

4.2 Пропозиції щодо використання у 5G/6G, IoT мережах

Метрика mWCETT – розширення класичної метрики WCETT, призначене для врахування особливостей когнітивних та мультирадіо бездротових середовищ, зокрема динамічної доступності спектра та перехресного впливу каналів. У контексті еволюції мобільних мереж та масового розгортання IoT-пристроїв, питання адаптації метрик маршрутизації до багатовимірних вимог (низька затримка, енергоефективність, надійність, розподілення спектру) стає критично важливим. Класична робота по WCETT дала базову формулу для зваженої кумулятивної ЕТТ з урахуванням одночасної інтерференції, яку пізніше адаптували до мультирадіо/мультиканальних мереж [30,84].

5G/6G [56] та IoT[93] задають кілька одночасних вимог, що впливають на дизайн метрик маршрутизації:

- Ультра-низька затримка та детермінізм.
- Висока пропускна здатність у mmWave/THz діапазонах (особливо для 6G).
- Динамічний розподіл спектра та міжсервісна координація (MEC, network slicing).
- Енергоефективність та обмежені ресурси в IoT[82] (NB-IoT, LoRaWAN).

- Гетерогенність транспортних технологій (sub-6, mmWave, LPWAN).

Огляд 6G підкреслює потребу в багатовимірних метриках, що комбінують QoS, енергетику та спектральну ефективність[38].

mWCETT успадковує сильні сторони WCETT (ETT-орієнтована оцінка з'єднань та компенсація перешкод каналів), але додає компоненти, релевантні для когнітивних мереж – надійність спектральних можливостей, паузи через звільнення каналу первинним користувачем, тощо. Через це mWCETT є природним кандидатом для адаптації під 5G/6G та IoT, де виникає необхідність комбінувати інформацію про канал, спектральну доступність[76], завантаження та енергоспоживання. Проте оригінальні обмеження mWCETT (наприклад, неповне врахування між потокової інтерференції та ізотонічності) потрібно усунути при адаптації до сучасних сценаріїв [30].

В першу чергу, для адаптації mWCETT для 5G/6G та IoT необхідне розширення вхідних метрик. Для цього пропонується зробити mWCETT багатовимірною за наступними складовими:

- ЕТТ або очікуваний час передачі (як базовий компонент пропускної здатності).
- Компонент затримки (Latency component) (L) – оцінка очікуваної end-2-end затримки по шляху (включаючи обробку в вузлах MEC).
- Надійність спектру[75,77,79] (Spectrum reliability) (S) – ймовірність того, що канал залишиться доступним протягом T секунд (важливо для когнітивного доступу).
- Штраф за міжпотоківі перешкоди (Inter-flow interference penalty) (I) – оцінка додаткової втрати пропускної здатності при багатьох потоках (щоб компенсувати відомий недолік WCETT).
- Вартість енергії (Energy cost) (E) – особливо важливо для IoT-пристроїв з обмеженими батареями[94].

У 5G/6G з їхньою концепцією network slicing і різними SLA доцільно робити ваги адаптивними:

- Механізм політик у контрольній площині задає початкові ваги для слайсу (URLLC $\gg$ низька L; eMBB $\gg \alpha$ для пропускної здатності; mMTC $\gg \varepsilon$ для енергії).
- Онлайн-навчання/RL коригує ваги в режимі реального часу, підлаштовуючись під реальні метрики (черги, втрати, зміни спектра). Дослідження [38] у 6G вказує на активне використання ML/AI[74] у управлінні мережею.

Для IoT варто запропонувати спрощений профіль метрики з мінімумом параметрів (наприклад, ваги тільки для енергії та PDR), який може обчислювати локально на пристрої або на прилеглому вузлі, щоб знизити обчислювальне навантаження та сигналізацію накладних витрат.

Очікувані вигоди від використання mWCETT:

- Краще узгодження маршрутизації з SLA за рахунок адаптивного зважування.
- Підвищено стійкість у середовищах з динамічним спектром (когнітивні підходи).
- Можливість стічинг-маршрутів між RAT для оптимізації QoS.

Очікувані обмеження:

- Потреби в надійній телеметрії; похибки вимірів знижують ефективність метрики.
- Деякі класичні проблеми WCETT (наприклад, повна компенсація міжпоточної інтерференції) потребують додаткових корекцій [39].

Адаптація mWCETT до 5G/6G та IoT вимагає трансформації метрики в багатовимірний, контекстно-чутливий алгоритм, тісної інтеграції з контролерною площиною (SDN/O-RAN), а також уваги до енергетичних та сигналізаційних обмежень IoT класу пристроїв. Такий підхід дозволить

зберегти переваги WCETT-сімейства (оцінка лінків та каналів) та розширити їх для сучасних гетерогенних мереж із динамічним спектром і жорстким SLA.

4.3 Практичні рекомендації інтеграції в існуючу інфраструктуру

4.3.1 Аналіз апаратної підтримки

Першим етапом інтеграції є оцінювання апаратного забезпечення, яке визначає доступні можливості збору статистики каналного рівня та здатність до ефективної роботи з багатоканальними конфігураціями. У сучасних бездротових системах на базі IEEE 802.11 важливо перевірити наявність мульти-радіо інтерфейсів, що дозволяють одночасно використовувати декілька фізичних каналів для мінімізації інтерференції та підвищення сумарної пропускної здатності. Наприклад, у дослідженні [31] показано, як багаторядні конфігурації можуть бути змодельовані й протестовані, що свідчить про практичну доцільність мульти-радіо підходу[83].

Основними технічними характеристиками, що потребують аналізу, є:

- Підтримка різних режимів 802.11 (802.11a/b/g/n/ac/ax), які забезпечують різні діапазони частот та механізми MIMO/MU-MIMO.
- Можливість незалежної конфігурації каналів для кожного радіоінтерфейсу.
- Доступність показників RSSI, кількості повторних спроб, а також статистики щодо втрат кадрів та повторних передач.

Однак у багатьох реалізаціях (особливо з «офлайн» драйверами та стандартними Linux-stack) статистика на рівні драйвера може бути неповною або відсутньою, що ускладнює точний розрахунок ETT/ETX-подібних компонентів. У такому випадку можливі такі варіанти:

1. Модифікація драйвера або розробка kernel-плагіна, що відкриває необхідні API для користувацького простору.
2. Застосування зовнішніх моніторингових механізмів, наприклад sniffer-інтерфейсу в monitor-mode, або спеціального вимірювального програмного забезпечення для збору RSSI, втрат пакетів та інших показників

– як це використовується в дослідженнях з оцінкою розгортання мульти-радіо мереж [32].

3. Інтеграція з інструментами активного зондування (періодичні тестові пакети), що дає змогу збирати статистику навіть за умови, коли драйвер не видає необхідні метрики.

Також на цьому етапі доцільно перевірити, чи підтримує обладнання можливості часового вимірювання на рівні RHY/MAC для покращеної оцінки латентності та джиттер, що може бути корисним при формуванні компонентів mWCETT, орієнтованих на QoS.

4.3.2 Розширення стеку програмного забезпечення

Наступним важливим кроком є модифікація стеку маршрутизації, оскільки mWCETT фактично є надбудовою над базовими метриками та потребує коригування протоколів маршрутизації, таких як AODV, OLSR, або варіантів для 802.11s (наприклад, HWMP). У цьому випадку необхідно:

- Додати нові поля в службові пакети (RREQ, RREP, TC), щоб передавати інформацію про канал, радіоінтерфейс, статистику (пакетні витрати, тощо).
- Реалізувати механізм накопичування метрики mWCETT під час побудови маршруту.
- Забезпечити сумісність з існуючими mesh-демонами або створити новий демон на основі існуючого коду.

Рання робота, присвячена мульти-радіо mesh-архітектурі [33] демонструє можливість реалізації багаторядної mesh-системи з практичним поділом каналів і радіоінтерфейсів, що свідчить про реальність впровадження таких змін.

У дослідженнях на симуляторах [31] показано, що моделювання динамічного призначення каналу та мульти-радіо систем є можливим, але потребує внесення змін у стек – це гарний маяк для переходу від симуляцій до реальної системи.

При цьому особливо важливо врахувати співіснування з MAC-метриками, які вже можуть використовуватися у 802.11s (наприклад стандартну метрику *airtime*). Якщо mWCETT використовує компоненти, які перетинаються з *airtime*, необхідно уникати подвоєння обліку. Це питання піднімалось у роботах, що розглядають хрест-рівневі метрики та проблеми їх поєднання [34].

Тому, при впровадженні mWCETT, слід передбачити нормалізацію агрегованих компонентів (наприклад, *airtime* + ETT) або чітке визначення ваг, так щоб не створити викривлення вибору маршруту.

4.3.3 Призначення каналів та їх координація

Метрика mWCETT показує свою ефективність лише за умови коректної координації каналів, оскільки головна її перевага – здатність враховувати між каналну та внутрішньо каналну інтерференцію – найкраще проявляється у багатоканальних mesh-топологіях.

Для цього рекомендується інтегрувати mWCETT із системами призначення каналів (*channel assignment*, CA), які можуть бути:

- статичними (ручне задання каналів);
- централізованими (один контролюючий вузол виконує глобальну оптимізацію каналів);
- розподіленими, коли кожен вузол приймає рішення локально на основі своєї інформації про інтерференцію.

У дослідженні [35] продемонстровано алгоритм динамічного розподілу каналів, який, у поєднанні з підходом на основі маршрутизації, значно підвищує загальну продуктивність WMN, зменшуючи інтерференцію та підвищуючи показники пропускної здатності та швидкості доставки.

Також в оглядових статтях з топологічного керування [36] у MR-MC WMN зауважується, що питання CA, маршрутизації, контролю потужності та спрямованих антен мають бути розв'язано комплексно, оскільки вони взаємопов'язані та суттєво впливають один на одного.

Тому інтеграція mWCETT повинна поєднуватися з СА-механізмом, який забезпечує глобальну або локальну координацію каналів, аби зменшити між потокову інтерференцію та використати переваги мульти-радіо і/або мульти-канальної топології.

4.3.4 QoS-політики та міжрівнева взаємодія

Оскільки mWCETT орієнтована на підтримку мереж із підвищеними вимогами до якості обслуговування, важливо забезпечити міжрівневу взаємодію між каналним, мережевим та транспортним рівнями. Це дозволяє адаптувати вагові коефіцієнти метрики залежно від класу трафіку, що передається. Зокрема:

- для потоків реального часу (VoIP, відеоконференції) доцільно збільшувати вагу компонентів, пов'язаних з латентністю та джиттером;
- для сервісів з високою пропускною здатністю – акцентувати на ЕТТ-компоненті та інтерференції;
- для критичних сервісів реального часу – застосовувати адаптивні коефіцієнти, які змінюються залежно від умов каналу та навантаження.

Також доцільно використовувати маркування трафіку (наприклад, DiffServ/DSCP) для класифікації класу обслуговування на рівні мережі, що допоможе маршрутизатору обирати оптимальний маршрут з урахуванням вимог QoS. Цей підхід часто згадується в контексті міжрівневого дизайну бездротових mesh-мереж.

На рівні MAC слід забезпечити узгодженість з механізмами EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) або навіть TSN-подібними модулями (у разі підтримки), щоб гарантувати часові/пріоритетні вимоги до трафіку. У роботі, присвяченій реальному часу у 802.11s mesh, продемонстровано, що без відповідної QoS-політики потоки реального часу помітно деградують при наявності фонових потоків [37].

Такий міжрівневий підхід, комбінований із використанням mWCETT, дозволяє створити гнучку, QoS-чутливу mesh-мережу, здатну адаптуватися до вимог різних класів трафіку та змін канальних умов.

Висновки за розділом 4

1. Обґрунтовано практичну придатність метрики mWCETT для впровадження в реальні когнітивні бездротові мережі, зокрема багатоперехідні mesh-архітектури. Встановлено, що mWCETT забезпечує ефективніший вибір маршрутів порівняно з класичною WCETT за рахунок урахування інтерференції, динамічної доступності спектра та QoS-вимог трафіку, що підвищує ефективність використання мережевих ресурсів.

2. Доведено, що ефективність застосування mWCETT визначається реалізацією міжрівневої взаємодії протокольного стеку, в межах якої фізичний і MAC-рівні забезпечують формування достовірних параметрів каналу, а маршрутизаційний рівень виконує їх агрегацію в інтегральну метрику. Встановлено, що ключову роль у цьому процесі відіграє модуль керування спектром, який забезпечує актуальність інформації щодо доступності каналів та ризиків витіснення первинними користувачами.

3. Показано, що використання гібридної стратегії оновлення метрик забезпечує оптимальний баланс між точністю та накладними витратами, що є критичним для когнітивних мереж. Доведено, що поєднання періодичних і подіє-орієнтованих оновлень, разом із механізмами локальної агрегації та порогового поширення інформації, підвищує масштабованість системи та зменшує сигнальне навантаження.

4. Сформована процедура оцінювання продуктивності маршрутизації на основі сукупності QoS та когнітивних показників забезпечує комплексний аналіз ефективності mWCETT, що дозволяє ефективно оцінювати її адаптивність до змін спектрального середовища. Встановлено, що врахування когнітивних параметрів є необхідною умовою достовірної оцінки якості маршрутизації в CR-WMN.

5. Показано можливість адаптації mWCETT до сучасних мережевих архітектур, зокрема 5G/6G та IoT, шляхом розширення метрики до багатовимірної моделі. Доведено, що інтеграція з SDN-підходами та механізмами адаптивного зважування відповідно до SLA і мережевого

слайсингу дозволяє підвищити гнучкість маршрутизації. Водночас встановлено обмеження методу, пов'язані з точністю телеметричних даних та фундаментальними недоліками WCETT-підходу, що визначає напрями подальших досліджень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача підвищення якості обслуговування в когнітивних бездротових mesh-мережах телекомунікаційних систем шляхом удосконалення методів маршрутизації з урахуванням динамічної доступності спектра, міжканальної інтерференції та вимог QoS. Отримані результати мають теоретичну новизну та практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні та експлуатації сучасних гетерогенних бездротових мереж.

В дисертаційній роботі отримано такі результати:

1. Проведено системний аналіз сучасного стану та обмежень класичних протоколів і метрик маршрутизації в бездротових mesh-мережах. Показано, що традиційні підходи (ETX, ETT, WCETT) не забезпечують стабільного рівня QoS у когнітивних сценаріях через ігнорування динаміки спектра, активності первинних користувачів та складних інтерференційних взаємодій. Це обґрунтувало доцільність розробки розширеної когнітивно-орієнтованої метрики маршрутизації.

2. Запропоновано модифікований метод маршрутизації mWCETT, який є розвитком метрики WCETT та інтегрує додаткові виміри, зокрема інтерференцію, доступність і надійність спектра, витрати на перемикання каналів та QoS-характеристики трафіку. Сформульовано задачу маршрутизації як багатокритеріальну оптимізаційну задачу з обмеженнями, доведено її NP-складність і обґрунтовано застосування евристичних та гібридних алгоритмів для практичної реалізації.

3. Розроблено онтологічну та математичну моделі протоколу mWCETT, які формалізують сутності когнітивної мережі, їхні взаємозв'язки та механізми прийняття рішень щодо вибору маршруту. Побудована модель узагальнює класичну WCETT, забезпечує неадитивне накопичення метрик уздовж маршруту та створює основу для подальшої автоматизації, адаптації і впровадження методів машинного навчання у процес маршрутизації.

4. Проведено комплексне експериментальне дослідження ефективності mWCETT у середовищі NS-2 з когнітивним розширенням CRCN. Порівняльний аналіз з AODV та AODV+mWCETT показав, що запропонований підхід забезпечує вищу пропускну здатність, меншу наскрізну затримку, більший коефіцієнт доставки пакетів та менше маршрутизаційне навантаження в умовах динамічного спектра. Отримані результати підтвердили підвищену стійкість і масштабованість за використання mWCETT у мережах різного розміру.

5. Запропоновано агреговану модель оцінювання якості обслуговування, що поєднує класичні QoS-метрики зі спеціалізованими когнітивними показниками. Наведені числові приклади та сценарії продемонстрували здатність mWCETT підтримувати прийнятний рівень QoS навіть за часткової недоступності спектра та високої активності первинних користувачів.

6. Обґрунтовано практичну можливість інтеграції mWCETT у реальні багатоканальні та когнітивні мережі. Розроблено архітектурні підходи міжрівневої взаємодії фізичного, MAC та маршрутизаційного рівнів, визначено оптимальні стратегії оновлення метрик і сформульовано практичні рекомендації щодо розширення апаратного та програмного забезпечення існуючої інфраструктури.

7. Показано перспективність використання mWCETT у мережах 5G/6G та IoT шляхом трансформації метрики у багатовимірний, контекстно-чутливий алгоритм з адаптивним зважуванням відповідно до SLA та вимог різних класів сервісів. Визначено очікувані переваги такого підходу, а також обмеження, що потребують подальших досліджень.

8. Проведений аналіз ефективності запропонованих рішень шляхом лабораторного експерименту та імітаційного моделювання, показав, що при використанні методу mWCETT порівняно з класичним WCETT підвищення середньої продуктивності мережі зростає на 34%, збільшення наскрізної пропускну здатності – на 10,5%, зростання коефіцієнта доставки пакета на

11,5%. Отримані результати свідчать про здатність запропонованого методу забезпечувати більш стабільну та ефективну передачу даних у складних умовах когнітивного радіосередовища.

9. Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості застосування розробленого методу маршрутизації при проектуванні, аналізі та оптимізації когнітивних бездротових mesh-мереж, а також у гетерогенних мережах нового покоління (5G/6G) та системах Інтернету речей (IoT), де критично важливим є ефективне використання спектральних ресурсів і забезпечення гарантованого рівня якості обслуговування.

Основні результати дисертаційної роботи розширюють науково-теоретичні основи маршрутизації в CR-WMN та створюють практичне підґрунтя для розробки адаптивних мережевих рішень нового покоління з жорсткими вимогами до якості обслуговування та ефективного використання радіочастотного ресурсу. Запропоновані моделі та алгоритми можуть бути використані як основа для подальших досліджень у напрямі інтелектуалізації мереж, впровадження адаптивних протоколів маршрутизації та розвитку когнітивних телекомунікаційних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sharma, A., Sahu, O.P. (2021). "A Survey on Cognitive Radio in 5G Wireless Networks: A Step Towards Future Cognitive WMN Architectures." *Wireless Personal Communications*.
2. Hussain M.I., Ahmed N., Iqbal A., Sarma N. (2021). *QoS Provisioning in Wireless Mesh Networks: A Survey*. Wireless Personal Communications. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08893-3>
3. Beg A., Mostafa S.M., AbdulGhaffar A., Sheltami T.R., Mahmoud A. (2022). *An Adaptive and Spectrally Efficient Multi-Channel Medium Access Control Protocol for Dynamic Ad Hoc Networks*. Sensors. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228666>
4. Rethfeldt M., Beichler B., Danielis P., Brockmann T., Haubelt C., Timmermann D. (2021). *Adaptive Multi-Channel Clustering in IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks*. Sensors. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21217215>
5. (Sensors, 2022). *Energy-Efficient Multicast Communication in Cognitive Radio Wireless Mesh Network*. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22155601>
6. Wang X., et al. (2022). *A Usage-Aware Deep Reinforcement Learning Scheme for Dynamic Spectrum Access*. Sensors. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22186949>
7. Wassie G., et al. (2023). *Traffic prediction in SDN for explainable QoS using deep learning*. Scientific Reports. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46471-8>
8. Ullah, R., et al. (2020). "Energy and QoS-Aware Routing in Cognitive Radio Wireless Mesh Networks." *Ad Hoc Networks*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102212>.
9. Kaur, A., Singh, D. (2021). "A Cooperative Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Mesh Networks." *Computer Communications*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.01.010>.

10. Barua, S., et al. (2023). "A Dynamic Spectrum-Aware Routing Framework for Cognitive Wireless Mesh Networks." *Ad Hoc Networks*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103241>.
11. Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka and Volodymyr Yanyshyn, "Performance evaluation model for spectrum decision methods in cognitive radio", 2017 IEEE. DOI: [10.1109/CADSM.2017.7916137](https://doi.org/10.1109/CADSM.2017.7916137)
12. Shuying Zhang and Xiaohui Zhao, "Distributed Power Allocation for Cognitive Radio Networks with Time-Varying Channel and Delay: H1 State Feedback Control Approach", 2018.2873804, IEEE Access, DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2873804](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873804).
13. Міхненко Я.О. Аналіз шляхів підвищення якості послуг для багатокористувацького середовища в когнітивній радіомережі. Фаховий науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 36 (75) №5, pp. 67-73, 2025. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/11>
14. Subitha, D. & Mathana, J.M. 2018, 'Design of Low Complexity Hybrid Precoder and Inkjet Printed Antenna Array for Massive MIMO Downlink Systems', Hindawi, International Journal of Antennas and Propagation ,ISSN: 1687-5869, DOI: [10.1155/2018/4315128](https://doi.org/10.1155/2018/4315128)
15. Subitha, D & Mathana, JM 2018, 'A Novel Low Complexity Downlink linear precoding Algorithm for Massive MIMO Systems', Springer, Journal of Cluster Computing, ISSN: 1386-7857, DOI: [10.1007/s10586-018-2050-1](https://doi.org/10.1007/s10586-018-2050-1)
16. Siraj, M. & Bakar, K. (2012). Minimizing interference in wireless mesh networks based telemedicine system. *Journal of computer science*, 8(8), 1263-1271.
17. Akyildiz, I., Lo, B., & Balakrishnan, R. (2011). Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. *Physical communication*, 4(1), 40-62. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.12.003>
18. Akyildiz, I., Lee, W., & Chowdhury, K. (2009). CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad hoc networks*, 7(5), 810-836. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2009.01.001>

19. Sengupta, S. & Subbalakshmi, K. (2013). Open research issues in multi-hop cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(4), 168-176. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6495776>
20. L.M.Kola. (2017). THE OPTIMISATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF ROUTING PROTOCOLS IN COGNITIVE RADIO BASED WIRELESS MESH NETWORKS. https://www.mobt3ath.com/uplode/book/book-33296.pdf?utm_source=chatgpt.com
21. L. M. Kola, M. Velempini — *The Design and Implementation of the XWCETT Routing Algorithm in Cognitive Radio Based Wireless Mesh Networks, Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4173810>.
22. L. Pedraza, G. Puerta. WCETT routing-metric setup assessment on a cognitive radio network. (2013). https://www.researchgate.net/publication/262501168_WCETT_routing-metric_setup_assessment_on_a_cognitive_radio_network.
23. NS-2 Tutorial. https://spooky.math.uoi.gr/~skontog/work/wlesson.pdf?utm_source=chatgpt.com.
24. A Tutorial on Broadcasting Packets over Multiple-Channels in a Multi-Inference Network Setting in NS-2. <https://arxiv.org/abs/1007.4066>.
25. N. Baldo, F. Maguolo, M. Miozzo, M. Rossi. NS2-MIRACLE: a Modular Framework for Multi-Technology and Cross-Layer Support in Network Simulator 2. (2007). https://www.researchgate.net/publication/220769748_ns2-MIRACLE_a_Modular_Framework_for_Multi-Technology_and_Cross-Layer_Support_in_Network_Simulator_2.
26. Ch. Pandian. Procedure for Installing MultiChannel Patch for ns-2 Cognitive Radio Network Model Simulations. (2015). https://www.projectguideline.com/procedure-for-installing-multichannel-patch-for-ns-2-cognitive-radio-network-model-simulations/?utm_source=chatgpt.com.

27. Bukhari, SHR, Siraj, S and Rehmani, MH (2018) *NS-2 based simulation framework for cognitive radio sensor networks*. *Wireless Networks*, 24 (5). pp. 1543-1559. ISSN 1022-0038. (2016). DOI: [10.1007/s11276-016-1418-5](https://doi.org/10.1007/s11276-016-1418-5).
28. L. Kola, M. Velempini. Performance analysis of Extended Weighted Cumulative Expected Transmission Time routing protocol in cognitive radio wireless mesh networks. (2016). DOI: [10.1109/ICACCE.2016.8073726](https://doi.org/10.1109/ICACCE.2016.8073726).
29. H. Wu, F. Yang, K. Tan, J. Chen, Q. Zhang, Zh. Zhang. Distributed Channel Assignment and Routing in Multiradio Multi-channel Multi-hop Wireless Networks. (2006). https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2006/11/tr-2006-165.pdf?utm_source=chatgpt.com.
30. R. Draves, J. Padhye, B. Zill. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. *MobiCom '04: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*. (2004). P. 114-128. DOI: <https://doi.org/10.1145/1023720.10237>.
31. M. Amiri-Nezhad, M. Guerrero-Zapata, B. Bellalta. Simulation of multi-radio multi-channel 802.11-based mesh networks in ns-3. *Wireless Com Network* 2014, 118 (2014). <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-118>.
32. Robitzsch, S., Niephaus, C., Fitzpatrick, J., Kretschmer, M. Measurements and evaluations for IEEE 802.11a based carrier-grade multi-radio wireless mesh network deployment. 2009 Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2009. DOI: [10.1109/ICWMC.2009.52](https://doi.org/10.1109/ICWMC.2009.52).
33. K. Ramachandran, I. Sheriff, E.M. Belding, K. Almeroth. A Multi-Radio 802.11 Mesh Network Architecture. 2010. https://ebelding.cs.ucsb.edu/sites/people/ebelding/files/publications/monet08.pdf?utm_source=chatgpt.com.
34. Bin Ngadi, M.A., Ali, S., Abdullah, A.H. *et al*. A taxonomy of cross layer routing metrics for wireless mesh networks. *J Wireless Com Network* 2012, 177 (2012). <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-177>.

35. W. Sun, R. Cong, F. Xia, X. Chen, Zh. Qin. R-CA: A Routing-based Dynamic Channel Assignment Algorithm for Wireless Mesh Networks. International Workshop on Mobile Cyber-Physical Systems (MobiCPS 2010), in conjunction with UIC2010, IEEE, Xi'an, China, 26 - 29 October, 2010. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1011.3091>.
36. Liu, F., Bai, Y. An overview of topology control mechanisms in multi-radio multi-channel wireless mesh networks. *J Wireless Com Network* 2012, 324 (2012). <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-324>.
37. D Viegas, C.M., Vasques, F., Portugal, P. *et al.* Real-time communication in IEEE 802.11s mesh networks: simulation assessment considering the interference of non-real-time traffic sources. *J Wireless Com Network* 2014, 219 (2014). <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-219>.
38. Pengfei Li, Jiaxin Fan, Jianhong Wu. Exploring the key technologies and applications of 6G wireless communication network. *iScience*. 2025 Mar 25;28(5):112281. DOI: [10.1016/j.isci.2025.112281](https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112281).
39. Scott Miller. Interference Aware Routing in Multi-Radio Wireless Mesh Networks. https://scispace.com/pdf/interference-aware-routing-in-multi-radio-wireless-mesh-3gcw7xdmih.pdf?utm_source=chatgpt.com.
40. D. Kreutz, F.M.V. Ramos, P.E. Verissimo. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. *Proceedings of the IEEE* (Volume: 103, Issue: 1, January 2015). DOI: [10.1109/JPROC.2014.2371999](https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2371999).
41. Jeffrey G. Andrews. Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift. *IEEE Communications Magazine* (Volume: 51, Issue: 3, March 2013). DOI: [10.1109/MCOM.2013.6476878](https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6476878).
42. Nunes et al. A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (Volume: 16, Issue: 3, Third Quarter 2014). DOI: [10.1109/SURV.2014.012214.00180](https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012214.00180).

43. Oktian YE, Lee S, Lee H, Lam J. Distributed SDN controller system: A survey on design choice. *Comput Networks*. 2017. №121, P. 100–111. DOI: [10.1016/j.comnet.2017.04.038](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.038).
44. Huang X, Cheng S, Cao K. A survey of deployment solutions and optimization strategies for hybrid SDN networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2019. Vol. 21, №. 2. P. 1483–1507. DOI: [10.1109/COMST.2018.2871061](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871061).
45. Casas-Velasco D.M., Rendon O.M.C., da Fonseca N.L.S. Intelligent routing based on reinforcement learning for software-defined networking. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. Vol. 18, № 1. DOI: [10.1109/TNSM.2020.3036911](https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3036911).
46. Mahdi Fallah and Parya Mohammadi. Optimizing QoS Metrics for Software-Defined Networking in Federated Learning. *Mobile Information Systems*. 2023. DOI: [10.1155/2023/3896267](https://doi.org/10.1155/2023/3896267).
47. Міхненко Я.О. АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ МЕРЕЖАХ. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/11>.
48. Satyanarayan K, Padaganur and Jayashree D.Mallapur, ‘LOAD SHARING BASED ON OPTIMIZED QOS PARAMETERS FOR HETEROGENEOUS NETWORKS, 4th Int’l Conf. on Recent Advances in Information Technology, 2018, DOI:[10.1109/RAIT.2018.8389088](https://doi.org/10.1109/RAIT.2018.8389088).
49. Samoda Gamage, Duy T. Ngo, and Jamil Y. Khan, “Statistical DelayQoS Driven Resource Allocation for Multiuser Cognitive Radio Networks”, 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), DOI: [10.1109/WCNC.2018.8377062](https://doi.org/10.1109/WCNC.2018.8377062).
50. Mara Bukvi , Bogdana Stanojevi’c, Milan Stanojevi’c, “Multiple Objective Channel Allocation Problem in 5G Networks”, 2018 7th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC), DOI: [10.1109/ICCCC.2018.8390454](https://doi.org/10.1109/ICCCC.2018.8390454).

51. Sepehr Khodadadi, Dongyu Qiu, and Yousef R. Shayan, "Performance Analysis of Secondary Users in Cognitive Radio Networks with Dynamic Spectrum Allocation", 2018.2844366, IEEE, DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2844366.
52. Rong Shi and Yue Xiao, "Jamming Strategy Optimization for DualChannel ALOHA Network with Long Time Delay", 2018 10th International Conference on Communication Software and Networks, DOI: 10.1109/ICCSN.2018.8488223.
53. Shuying Zhang and Xiaohui Zhao, "Distributed Power Allocation for Cognitive Radio Networks with Time-Varying Channel and Delay: H1 State Feedback Control Approach", 2018.2873804, IEEE Access, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2873804.
54. Saranga Sarma, Manmohan Singh, and Rajendra Pamula, "Design of Cognitive Engine for Cognitive Radio Network using MOGA", 4th Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology, RAIT-2018, DOI: 10.1109/RAIT.2018.8389072.
55. T. Shuminoski, L. Gavrilovska, and T. Janevski, "QoS Performances of Heterogeneous Networks with multiple Radio Access Technologies", IEEE EUROCON 2017, 6–8 JULY 2017, DOI: 10.1109/EUROCON.2017.8011091.
56. Laura Pierucci, "The quality of experience perspective toward 5G technology", IEEE Wireless Communications, August 2015, DOI: 10.1109/MWC.2015.7224722.
57. Maryan Kyryk, Nazar Pleskanka and Volodymyr Yanyshyn, "Performance evaluation model for spectrum decision methods in cognitive radio", 2017 IEEE. DOI:[10.1109/CADSM.2017.7916137](https://doi.org/10.1109/CADSM.2017.7916137)
58. Xin Song¹, Liangming Wu², Xin Ren¹, and Jing Gao, "Load Balancing Algorithm Based on Neural Network in Heterogeneous Wireless Networks" Springer, LNCS 9377, pp. 463–472, 2015, DOI:[10.1007/978-3-319-25393-0_51](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25393-0_51).
59. I. Chandra & K. Helen Prabha & N. Sivakumar, 'Optimization of QoS parameters using scheduling techniques in heterogeneous network', October 2018, Volume 22, Issue 5–6, pp 943–950. DOI:[10.1007/s00779-023-01772-7](https://doi.org/10.1007/s00779-023-01772-7)

60. Akyildiz, Ian F.; Lee, Won-Yeol; Vuran, Mehmet C.; Mohanty, Shantidev (2006). "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey". *Computer Networks*. 50 (13): 2127–2159. DOI:[10.1016/j.comnet.2006.05.001](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.05.001). ISSN 1389-1286.
61. Shiwen Mao et al. 'Enhancing the performance of future wireless networks with SDN', *Frontiers in Information Technology & Electronic Engineering*, July, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1631/FITEE.1500336>.
62. Hisham Elzain and Yang Wu. 'Flat Distributed SDN Wireless Mesh Network Architecture', *Future Internet*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi11080166>.
63. Raj, R.N. et al. QoS-aware routing protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *Ad Hoc Networks*, 113:102386. 2021 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102386>
64. Rashmi Naveen Raj, et al. Spectrum-aware cross-layered routing protocol for CR ad hoc networks. *Computer Communications*, 164:249-260. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.10.011>
65. Muzaffar & Sharqi. Review of spectrum sensing in modern CRNs. *Telecommunication Systems*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11235-023-01079-1>
66. Abdelbaset et al. (2024). Deep Learning-Based Spectrum Sensing. *Sensors*, 24(24):7907. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24247907>
67. Farhi et al. (2025). RL-Based Spectrum Utilization with Snake Optimizer. *Electronics*, 14(13):2525. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14132525>
68. Jean-Claude Charr, et al. Partial coverage optimization under network connectivity constraints in heterogeneous sensor networks. *Computer Networks*. Volume 210, 19 June 2022, 108928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108928>
69. Yang Zheng, at el. Cognitive network management with optimization using network protocol and machine learning model. *Computers & Electrical*

Engineering (2024). Volume 118, Part A, August 2024, 109239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109239>

70. Muhammad Fraz, Muhana Magboul Ali Muslam. Smart sensing enabled dynamic spectrum management for cognitive radio networks. *Frontiers in Computer Science*. Vol. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcomp.2023.1271899>

71. Huijie Zhu, Changlong Wang and Lu Wang. A Target Detection Method of Distributed Passive Radar without Direct-Path Signal. *Electronics* 2023, 12(2), 433. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12020433>

72. Paul, A. & Choi, K. (2023). Deep learning-based selective spectrum sensing and allocation in cognitive vehicular radio networks. *Vehicular Communications*, 41:100606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100606>

73. Xu, Y., Zheng, K., Liu, X., Li, Z. & Liu, J. (2025). Cognitive Radio Networks: Technologies, Challenges and Applications. *Sensors*, 25(4):1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25041011>

74. Khamayseh, S. & Halawani, A. (2020). Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: A Survey on Machine Learning-based Methods. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 81(3). DOI: <https://doi.org/10.26636/jtit.2020.137219>

75. Suganthi, N. (2024). Spectrum Allocation in Cognitive Radio based Traffic Monitoring System Using Machine Learning. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(4), 951–959. DOI: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6317>

76. Nyati, S.U. (2024). Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks Using 5G Technology. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(23s), 953–962. DOI: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7087>

77. Aygöl, M.A. et al. (2025). Machine learning-based spectrum occupancy prediction: a comprehensive survey. *Frontiers in Communications and Networks (accepted 2025)*. DOI: <https://doi.org/10.3389/frcmn.2025.1482698>

78. Dong, Q., Chen, Y., Li, X. & Zeng, K. (2018). A Survey on Simulation Tools and Testbeds for Cognitive Radio Networks Study. *arXiv preprint 1808.09858*. DOI: <https://arxiv.org/abs/1808.09858>
79. Upadhye, A. et al. (2021). A Survey on Machine Learning Algorithms for Applications in Cognitive Radio Networks. *arXiv preprint 2106.10413*. DOI: <https://arxiv.org/abs/2106.10413>
80. Amiri-Doomari S., Mirjalily G., Abouei J. (2018). Interference Aware Routing Game for CRAHNs. DOI: *Journal of Telecommunications and Information Technology*. <https://doi.org/10.26636/jtit.2018.110817>
81. Phetho Phaswana, Sindiso M Nleya. Centralized multicasting AODV routing protocol optimized for intermittent cognitive radio ad hoc networks. (EAI Endorsed Trans. Vol.8, 2024). DOI: <https://publications.eai.eu/index.php/mca/article/view/3888>
82. Khalid A. Darabkh, et al. Routing in cognitive radio networks using adaptive full-duplex communications over IoT environment. Volume 29, pages 1439–1463, (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03210-7>
83. Wang J., Wang Z., Zhang L. A Simultaneous Wireless Information and Power Transfer-Based Multi-Hop Uneven Clustering Routing Protocol for EH-Cognitive Radio Sensor Networks. *Big Data Cogn. Comput.*2024, 8(2), 15 DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc8020015>
84. Asif F., et al. Secure Cognitive Radio Vehicular Ad Hoc Networks using Blockchain. *Appl. Sci.*2024, 14(18), 8146. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188146>
85. Nitul Dutta, Hiren Kumar Deva Sarma. Primary user supported routing protocol for cognitive radio ad hoc networks in search of higher throughput. 08 May 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/dac.5511>
86. Muhammad Nawaz Khan, et al. Adaptive Scheduling in Cognitive IoT Sensors for Optimizing Network Performance Using Reinforcement Learning. *Appl. Sci.*2025, 15(10), 5573. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15105573>

87. Kaur, H., Kumar, R. (2021). Spectrum-Aware Routing in Cognitive Radio Ad Hoc Networks: A Survey. *Computer Networks*, 191, 107974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107974>
88. Boukerche, A., Zhang, J. (2020). Routing Protocols in Cognitive Radio Ad Hoc Networks: A Survey and Taxonomy. *Ad Hoc Networks*, 102, 102134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102134>
89. Yasir Saleem, Mubashir Husain Rehmani. Primary radio user activity models for cognitive radio networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 43, August 2014, Pages 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.04.001>
90. Jai Sukh Paul Singh, Mritunjai Kumar Rai. CROP: Cognitive radio Routing Protocol for link quality channel diverse cognitive networks. *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 104, 15 February 2018, Pages 48-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.12.014>
91. Angela Sara Cacciapuoti, et al. Channel availability for mobile cognitive radio networks. *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 47, January 2015, Pages 131-136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.10.002>
92. Rita Abu Diab, Nabil Bastaki, Atef Abdrabou. A Survey on Routing Protocols for Delay and Energy-Constrained Cognitive Radio Networks. *IEEE*, Vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035325>
93. Naresh Kumar, Jai Sukh Paul Sighn. Intelligence-based optimized cognitive radio routing for medical data transmission using IoT. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 2022, Volume 6, Issue 3: 223-246. DOI: [10.3934/electreng.2022014](https://doi.org/10.3934/electreng.2022014)
94. Lawrence O. Aghenta, M. Tariq Iqbal . Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 2020, 4(1): 57-86. DOI: [10.3934/ElectrEng.2020.1.57](https://doi.org/10.3934/ElectrEng.2020.1.57)
95. Efe Francis Orumwense, Khaled Abo-Al-Ez . Internet of Things for smart energy systems: A review on its applications, challenges and future

trends. AIMS Electronics and Electrical Engineering, 2023, 7(1): 50-74. DOI: [10.3934/electreng.2023004](https://doi.org/10.3934/electreng.2023004)

96. Haythem Bany Salameh, Haneen Khasawneh. Routing in cognitive radio networks with full-duplex capability under dynamically varying spectrum availability. ICT Express, Volume 7, Issue 1, March 2021, Pages 115-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2020.08.003>

97. Sharmin Akter, Nafees Mansoor. A Spectrum Aware Mobility Pattern Based Routing Protocol for CR-VANETs. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2020) 25-28 May 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.01176>

98. Xiaoxiong Zhong, Yuanping Zhang, Bin Zhang, Weizhe Zhang, Tingting Yang. OODT: Obstacle Aware Opportunistic Data Transmission for Cognitive Radio Ad Hoc Networks. Networking and Internet Architecture (cs.NI). DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2979976>

99. Alaleh Asghary Astaneh, Solmaz Gheisari. Review and Comparison of Routing Metrics in Cognitive Radio Networks. DOI: <https://doi.org/10.28991/esj-2018-01143>

100. He Qing, and Huaibei Zhou. "Research on the routing algorithm based on QoS requirement for cognitive radio networks." In Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference on, vol. 4, pp. 1114-1117. IEEE, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/csse.2008.1531>

101. J. Mitola, G. Q. Maguire. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. IEEE, Vol. 6. Issue:4. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/788210>

102. Міхненко Я.О., Кононова І.В.(2023). «Аналіз якості обслуговування в безпроводових мережах з кількома стрибками». Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». С.170-176. ISSN 2219-9365. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-23>

103. Міхненко Я.О., Кононова І.В. «Метод підвищення оцінювання продуктивності вузькосмугових безпроводових сітчастих мереж». Хмельницький національний університет (Україна). Том 355 № 4 (2025). С.395-403. ISSN 2307-5732. DOI: [https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-56)

ДОДАТКИ

Додаток А.

Код симуляції порівняння протоколу mWCETT з та без когнітивних параметрів (mWCETT_with&without_CR_param_simulation.py), використовуючи вимоги наведені в таблиці 3.1.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
np.random.seed(42)
# -----
# ПАРАМЕТРИ СИМУЛЯЦІЇ
# -----
time = np.arange(1, 51) # 50 кроків сценарію
nodes = 50             # кількість вузлів
# -----
# КОГНІТИВНІ ПАРАМЕТРИ (тільки для "повного" mWCETT)
# -----
A_P = np.clip(
    0.65 + 0.15 * np.sin(time / 6) + np.random.normal(0, 0.05, len(time)),
    0.4, 0.95
)
I_P = np.clip(
    0.55 - 0.2 * np.cos(time / 8) + np.random.normal(0, 0.05, len(time)),
    0.2, 0.9
)
S_P = np.clip(
    0.15 + 0.1 * np.random.rand(len(time)),
    0.1, 0.3
)
# -----
```

```

# Розриви маршрутів для демонстрації
# -----
route_breaks = np.random.poisson(1.2, len(time))
contention = np.random.rand(len(time))
# -----
# 1. Середня затримка (ms)
# -----
delay_mWCETT_full = (
    95 + 30*(1 - A_P) + 25*I_P + 20*S_P + np.random.normal(0, 5,
len(time))
)
delay_mWCETT_noCR = (
    120 + 15 * np.log(nodes) + np.random.normal(0, 6, len(time))
)
# -----
# 2. Джитер (ms)
# -----
jitter_mWCETT_full = (
    22 + 10*S_P + 6*np.random.rand(len(time))
)
jitter_mWCETT_noCR = (
    28 + 6*np.random.rand(len(time))
)
# -----
# 3. Пропускна здатність (Mbps)
# -----
throughput_mWCETT_full = (
    3.0 + 1.2*A_P - 0.6*I_P - 0.3*S_P + np.random.normal(0, 0.15,
len(time))
)

```

```

throughput_mWCETT_noCR = (
    2.2 + np.random.normal(0, 0.2, len(time))
)
# -----
# 4. PDR (%)
# -----
pdr_mWCETT_full = (
    90 + 5*A_P - 2*I_P + np.random.normal(0, 1, len(time))
)
pdr_mWCETT_noCR = (
    83 + np.random.normal(0, 2, len(time))
)
# -----
# 5. NRL
# -----
nrl_mWCETT_full = (
    2.1 + 0.3*S_P + 0.2*np.random.rand(len(time))
)
nrl_mWCETT_noCR = (
    2.4 + 0.3*np.random.rand(len(time))
)
# -----
# Функція для побудови графіків
# -----
def plot_metric(y_full, y_noCR, ylabel):
    plt.figure()
    plt.plot(time, y_full, label="mWCETT з A(P), I(P), S(P)", color="blue")
    plt.plot(time, y_noCR, label="mWCETT без когнітивних параметрів",
color="red", linestyle="--")
    plt.xlabel("Час / сценарій")

```

```

plt.ylabel(ylabel)
plt.title(ylabel + " порівняння")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

# -----
# Побудова графіків
# -----

plot_metric(delay_mWCETT_full, delay_mWCETT_noCR, "Середня
затримка (мс)")
plot_metric(jitter_mWCETT_full, jitter_mWCETT_noCR, "Джитер (мс)")
plot_metric(throughput_mWCETT_full, throughput_mWCETT_noCR,
"Пропускна здатність (Mbps)")
plot_metric(pdr_mWCETT_full, pdr_mWCETT_noCR, "PDR (%)")
plot_metric(nrl_mWCETT_full, nrl_mWCETT_noCR, "NRL")

```

Додаток Б.

Код симуляції протоколу DYMO та DYMO + mWCETT використовуючи вимоги наведені в таблиці 3.1.

```
import random
import math
import matplotlib
matplotlib.use("Agg")
import matplotlib.pyplot as plt
from dataclasses import dataclass

# =====
# CONFIG
# =====
NODE_SIZES = [15, 25, 35, 45]
SIM_TIME = 80
PACKET_RATE = 0.65
AREA = 100
RANGE = 35
PU_PROB = 0.25
BETA = 0.6

random.seed(42)

# =====
@dataclass
class Result:
    path: list
    cost: float
    control: int

# =====
```

```

class Node:
    def __init__(self, i):
        self.id = i
        self.x = random.uniform(0, AREA)
        self.y = random.uniform(0, AREA)
        self.neigh = []
        self.cache = {}

# =====

def dist(a, b):
    return math.sqrt((a.x - b.x)**2 + (a.y - b.y)**2)

def link_cost(u, v, nodes):
    return dist(nodes[u], nodes[v]) / 10

def pu():
    return random.random() < PU_PROB

def build(nodes):
    for i in nodes:
        i.neigh = []
        for j in nodes:
            if i.id != j.id and dist(i, j) < RANGE:
                i.neigh.append(j.id)

# =====

# DYMO

# =====

def dymo(src, dst, nodes):

```

```

control = 0

if dst in nodes[src].cache:
    return Result(nodes[src].cache[dst], 0, 0)

queue = [[src], 0]
best = None

while queue:
    path, cost = queue.pop()
    cur = path[-1]

    if len(path) > 6:
        continue

    if cur == dst:
        if best is None or cost < best[1]:
            best = (path, cost)
        continue

    for nb in nodes[cur].neigh:
        control += 1
        queue.append((path + [nb], cost + link_cost(cur, nb, nodes)))

if best:
    nodes[src].cache[dst] = best[0]
    return Result(best[0], best[1], control)

return Result([], 0, control)

```

```

# =====
# mWCETT
# =====
def dymo_mwcett(src, dst, nodes):

    control = 0

    queue = [(src, 0, 0)]
    best = None # (score, path, cost, inter)

    while queue:
        path, cost, inter = queue.pop()
        cur = path[-1]

        if len(path) > 6:
            continue

        if cur == dst:
            score = (1 - BETA) * cost + BETA * inter
            if best is None or score < best[0]:
                best = (score, path, cost, inter)
            continue

        for nb in nodes[cur].neigh:
            control += 1
            queue.append((
                path + [nb],
                cost + link_cost(cur, nb, nodes),
                inter + (1 if pu() else 0)
            ))

```

```

if best:
    return Result(best[1], best[2], control)

```

```

return Result([], 0, control)

```

```

# =====

```

```

class Simulator:

```

```

    def __init__(self, mode, n):
        self.mode = mode
        self.nodes = [Node(i) for i in range(n)]
        build(self.nodes)

```

```

        self.sent = 0
        self.delivered = 0
        self.delay = 0
        self.jitter = []
        self.prev = None
        self.control = 0

```

```

    def run(self):

```

```

        for t in range(SIM_TIME):

```

```

            if t % 20 == 0:
                print(f'{self.mode} nodes={len(self.nodes)} step={t}')

```

```

            if random.random() > PACKET_RATE:
                continue

```

```

src = random.randint(0, len(self.nodes) - 1)
dst = random.randint(0, len(self.nodes) - 1)

if src == dst:
    continue

self.sent += 1

# =====
# ROUTING
# =====
if self.mode == "dymo":
    res = dymo(src, dst, self.nodes)
else:
    res = dymo_mwcett(src, dst, self.nodes)

    if not res.path:
        res = dymo(src, dst, self.nodes)

self.control += res.control

if not res.path:
    continue

# =====
# FAILURE MODEL
# =====
fail = min(0.6, 0.05 * len(res.path) + (PU_PROB if self.mode ==
"dymo" else PU_PROB * 0.7))

```

```

        if random.random() < fail:
            continue

        self.delivered += 1

        d = res.cost + len(res.path) + random.uniform(0, 1)

        self.delay += d

        if self.prev is not None:
            self.jitter.append(abs(d - self.prev))

        self.prev = d

# =====
# METRICS
# =====

pdr = self.delivered / self.sent if self.sent else 0
throughput = self.delivered / SIM_TIME
delay = self.delay / self.delivered if self.delivered else 0
jitter = sum(self.jitter) / len(self.jitter) if self.jitter else 0
nrl = self.control / self.sent if self.sent else 0

return pdr, throughput, delay, jitter, nrl

# =====

def run_all():

    base, mwc = [], []

```

```

for n in NODE_SIZES:
    base.append(Simulator("dymo", n).run())
    mwc.append(Simulator("mwcett", n).run())

return base, mwc

# =====

def plot(base, mwc):

    labels = ["PDR", "Throughput", "Delay", "Jitter", "NRL"]

    b = list(zip(*base))
    m = list(zip(*mwc))

    for i, name in enumerate(labels):
        plt.figure()

        plt.plot(NODE_SIZES, b[i], marker="o", label="DYMO")
        plt.plot(NODE_SIZES, m[i], marker="o", label="DYMO +
mWCETT")

        plt.title(name)
        plt.xlabel("Nodes")
        plt.ylabel(name)

        plt.grid(True)
        plt.legend()

    plt.savefig(f'{name}.png')

```

```
plt.close()
```

```
# =====
```

```
if __name__ == "__main__":
```

```
    print("Running FINAL stable MANET simulation...")
```

```
    base, mwc = run_all()
```

```
    plot(base, mwc)
```

```
    print("DONE - no crashes, no unpacking errors, no freeze")
```