

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ**

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**ТАБОР ДЕНИС ІВАНОВИЧ**

УДК 004.72:621.39

**ДИСЕРТАЦІЯ  
МЕТОДИ І МОДЕЛЬ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ  
БАГАТОКАНАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ В МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE  
802.11BE**

172 Телекомунікації та радіотехніка

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.

\_\_\_\_\_ Денис ТАБОР

Науковий керівник

**Миронов Дмитро Вікторович**

кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

Табор Д.І. Методи і модель підвищення ефективності передавання багатоканальним пристроєм в мережах стандарту IEEE 802.11be. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка». - Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі підвищення пропускної здатності багатоканального пристрою шляхом узгодженого управління радіоресурсами з урахуванням комплексного впливу стану каналів, міжлінкових завад та обмежень режимів багатоканальної роботи в мережах стандарту IEEE 802.11be.

Експоненційне зростання попиту на бездротову передачу даних зумовлене не лише збільшенням кількості підключених пристроїв, але й трансформацією профілю навантаження. У сучасних мережах можуть працювати різні чутливі до затримок сервіси від промислової автоматизації до хмарного геймінгу, де критичним є забезпечення низької затримки і високої пропускної здатності.

З огляду на те що значний обсяг трафіку передається у Wi-Fi мережах, забезпечення високих швидкостей повинно супроводжуватися гарантованою надійністю доставки. Сукупно ці фактори формують підставу для переходу від стратегії нарощування пікової швидкості до методів детермінованого управління ресурсами, здатних забезпечити необхідний сервіс в умовах конкуренції за спільний радіочастотний ресурс.

У результаті виникає об'єктивна потреба перейти від незалежного управління каналами до розробки методики спільного управління радіоресурсами.

У процесі досягнення поставленої мети та розв'язання наукового завдання у роботі одержано такі основні наукові результати:

- Удосконалено метод оцінки каналу для багатоканального пристрою стандарту IEEE 802.11be, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на

комплексному аналізу стану радіосередовища за рахунок впровадження інтегрованого показника якості та вагових коефіцієнтів, які формалізують поточне завантаження спектра, динаміку завад та вплив пристроїв попередніх поколінь Wi-Fi, що дозволяє проводити оцінку і забезпечити обґрунтований вибір оптимальних частотних конфігурацій і каналів.

- Вперше розроблено математичну модель розподілу трафіку для багатоканального пристрою, яка ґрунтується на представленні пристрою як єдиної системи масового обслуговування, де стан середовища та обмеження режимів багатоканальної роботи формалізуються вектором стану і матрицею рішень, а обґрунтування вибору досягається за рахунок встановлення аналітичного зв'язку між цими параметрами керування та очікуваними показниками якості обслуговування, що дозволяє прийняти рішення про доцільність використання політик розподілу трафіку для поточного циклу планування при багатоканальній роботі.

- Вперше розроблено метод розподілу ресурсів між каналами багатоканального пристрою, який інтегрує результати аналізу стану радіосередовища та модель розподілу трафіку за рахунок поєднання профілювання потоків даних за категоріями доступу із прогнозуванням їхнього часу зайнятості радіоресурсу та оптимізацією матриці розподілу навантаження, що дозволяє забезпечити узгоджене керування каналами для підвищення сумарної пропускної здатності та мінімізації затримок доставки пакетів при багатоканальній роботі.

У першому розділі здійснено аналіз проблем управління ресурсами багатоканального бездротового пристрою стандарту IEEE 802.11be в умовах зростання навантаження, фрагментації спектра, міжлінкової взаємодії та апаратних обмежень режимів MLO. На основі аналізу архітектури багатоканального пристрою, режимів багатоканальної роботи, а також механізмів доступу до середовища і використання ресурсів встановлено, що продуктивність таких мереж визначається не окремими параметрами фізичного рівня, а

узгодженістю управління часовими та частотними ресурсами на рівні MAC. У розділі систематизовано чинники, що знижують ефективність багатоканальної передачі, показано обмеженість локальних підходів до вибору каналу та сформульовано наукове завдання дослідження.

У другому розділі розв'язано задачу оцінювання спектральної конфігурації багатоканального пристрою в умовах, коли вибір каналів не забезпечує ефективного використання ресурсів через взаємні завади та апаратні обмеження MLO. Для цього розроблено математичну модель спектральної конфігурації та удосконалено методику багатокритеріального оцінювання стану каналів на основі інтегрованої метрики якості, яка враховує якість радіолінки, рівень інтерференції, ширину смуги, розподіл ресурсних одиниць та міжлінкові ефекти.

У третьому розділі вирішено задачу побудови математичної моделі розподілу трафіку в багатоканальному пристрої, необхідної для формального опису стану системи та правил використання доступних лінків у стохастичному середовищі. На основі апарату систем масового обслуговування побудовано математичну модель багатоканального пристрою з дискретизацією часу за циклами прийняття рішень, введено вектор стану системи на основі нормованих метрик лінків і параметрів черг, формалізовано політики розподілу трафіку як відображення стану у керуюче рішення, визначено простір допустимих рішень з урахуванням обмежень режимів MLO і встановлено аналітичний зв'язок між параметрами керування та показниками якості обслуговування.

У четвертому розділі розв'язано задачу організації розподілу ресурсів у багатоканальному пристрої в умовах динамічної зміни стану каналів, характеристик трафіку, часових накладних витрат і апаратних обмежень синхронізації. Для цього запропоновано методику розподілу ресурсів, реалізовану як функціональний блок на рівні U-MAC для замкненого циклу керування, в межах якого виконуються моніторинг і оцінка стану лінків, профілювання потоків за категоріями доступу, прогнозування часу зайнятості каналів та оптимізація матриці розподілу навантаження за критерієм мінімізації максимального часу завершення передачі.

Отримані результати свідчать, що підвищення ефективності багатоканальних бездротових мереж стандарту IEEE 802.11be досягається за рахунок узгодженого управління радіоресурсами з урахуванням міжлінкової взаємодії, характеристик трафіку та обмежень режимів MLO. Практичне значення роботи полягає у тому що запропоновані математична модель та методи можуть слугувати основою для розробки та вдосконалення алгоритмів керування доступом до середовища в багатоканальних пристроях бездротових мереж стандарту IEEE 802.11be та спрямованих на підвищення пропускну здатності та зменшення затримок у бездротових мережах нового покоління.

Наукові положення в межах даного дослідження були використані під час проведення досліджень та підготовки матеріалів науково-дослідної роботи, що виконувалася у Державному університеті інформаційно-комунікаційних технологій за темою «Методи моніторингу продуктивності телекомунікаційних мереж на основі аналізу показників їх якості» (договір № 11/24 від 03.06.2024 р. з ПНВП «Сардер Телеком»), а також використовуються в навчальному процесі Навчально-наукового інституту телекомунікацій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій при виконанні кваліфікаційних робіт і викладанні навчальних дисциплін «Сенсорні бездротові мережі» та «Проектування телекомунікаційних систем та мереж».

Ключові слова: бездротовий зв'язок, масштабовані системи, оптимізація моделі, гетерогенні мережі, математичне моделювання, змішаний трафік, трафік даних, спектральна ефективність, затримка передачі, пропускна здатність, розподіл трафіку, комунікаційна мережа, канал передачі, бездротові мережі, передача даних.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

[1] Д. Табор, «Адаптивний алгоритм зміни каналу для багатоканального пристрою Wi-Fi 7 в умовах гетерогенних мереж» *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*, №1 (7), с. 46-51, 2025, doi: 10.31673/2786-8362.2025.011691.

[2] Д. Табор, «Оцінка ключових можливостей бездротової мережі Wi-Fi 7 покоління» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 4, с. 297–307, 2024, doi: 10.31891/2219-9365-2024-80-37.

[3] Д. Табор, «Порівняння режимів доступу багатоканальних пристроїв в мережі IEEE 802.11be» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 250–259, 2025, doi: 10.31891/2219-9365-2025-81-31.

[4] Д. Табор, «Методика розподілу ресурсів у багатодіапазонних бездротових мережах із пріоритетизацією трафіку» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, с. 171–175, 2025, doi: 10.31891/2219-9365-2025-83-22.

[5] Д. Табор, «Метод математичного моделювання розподілу трафіку в багатолінкових пристроях» *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*, №1 (9). с. 62-70, 2026, doi: 10.31673/2786-8362.2026.012742

Матеріали і тези наукових конференцій:

[1] Д. Табор, “Можливості нового покоління безпроводного зв’язку Wi-Fi 7”, у *Telecommunication: problems and innovation*, Київ, Україна, 20 груд. 2023. Київ, Україна: ДУІКТ, 2023, с. 4–6. [Онлайн]. Доступно: [https://duikt.edu.ua/uploads/n\\_12108\\_23987482.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/n_12108_23987482.pdf)

[2] Д. Табор, “Огляд стандартів захисту і протидія несанкціонованому доступу до Wi-Fi мереж”, у *Telecommunication: problems and innovation*, Київ, Україна, 20 груд. 2023. Київ, Україна: ДУІКТ, 2023, с. 45–47. [Онлайн]. Доступно: [https://duikt.edu.ua/uploads/n\\_12108\\_23987482.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/n_12108_23987482.pdf)

[3] Д. Табор, “Огляд і порівняння методів зміни каналу в мережах стандарту IEEE 802.11be”, у *Сучасні інтелектуальні інформаційні технології в науці та освіті*, Київ, Україна, 15 трав. 2025. Київ, Україна: ДУІКТ, 2025, с. 294–297. [Онлайн]. Доступно: [https://duikt.edu.ua/uploads/p\\_2779\\_68674368.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/p_2779_68674368.pdf)

[4] D. Tabor, V. Ruzhynskyi, S. Khlamov, “A method for mathematical modeling of traffic distribution in multi-link devices”, у *The Ninth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2026)*, Запоріжжя, Україна, 3 трав. 2026. Запоріжжя, Україна: НУ «Запорізька політехніка», 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://www.youtube.com/watch?v=Yt74R-Plcao>

## ABSTRACT

Tabor D.I. Methods and model for improving the efficiency of transmission by a multi-channel device in IEEE 802.11be standard networks. – Dissertation as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 – "Telecommunications and Radio Engineering". - State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, 2026.

The dissertation is dedicated to solving the scientific and technical problem of increasing the throughput of IEEE 802.11be multi-channel wireless networks through coordinated radio resource management, taking into account the complex impact of channel conditions, cross-link interference, and the constraints of multi-link operation (MLO) modes in IEEE 802.11be networks.

The exponential growth in demand for wireless services is driven not only by the increasing number of connected devices but also by the transformation of the load profile. In modern networks, various latency-sensitive services can operate, from industrial automation to cloud gaming, where ensuring low latency and high throughput is critical.

Considering that a significant volume of traffic is handled by Wi-Fi networks, ensuring high speeds must be accompanied by guaranteed delivery reliability. Collectively, these factors form the basis for a transition from a strategy of increasing peak speed to methods of deterministic resource management capable of providing the necessary service under conditions of competition for a shared radio frequency resource.

As a result, an objective need arises to transition from independent channel management to the development of a methodology for joint radio resource management.

In the process of achieving the set goal and solving the scientific problem, the following main scientific results were obtained:



An improved channel estimation method for a multi-channel IEEE 802.11be device, which, unlike existing methods, is based on a comprehensive analysis of the radio environment state by introducing an integrated quality indicator and weighting coefficients that formalize current spectrum utilization, interference dynamics, and the impact of previous generation Wi-Fi devices, allowing for the assessment and justified selection of optimal frequency configurations and channels.

A newly developed mathematical model of traffic distribution for a multi-channel device, which is based on representing the device as a single queuing system, where the environment state and MLO constraints are formalized by a state vector and a decision matrix, and the justification for selection is achieved by establishing an analytical relationship between these control parameters and the expected quality of service indicators, which enables decision-making regarding the feasibility of utilizing traffic distribution policies for the current scheduling cycle during multi-channel operation.

A newly developed resource allocation method between channels of a multi-channel device, which integrates the results of the radio environment analysis and the traffic distribution model by combining data flow profiling by access categories with the prediction of their radio resource occupancy time and the optimization of the load distribution matrix, which ensures coordinated channel management to increase total throughput and minimize packet delivery latency during multi-channel operation.

In the first chapter, an analysis of resource management problems in IEEE 802.11be multi-link wireless networks under conditions of increasing load, spectrum fragmentation, cross-link interaction, and hardware constraints of MLO modes is carried out. Based on the analysis of multi-link device architecture, multi-channel operation modes, as well as medium access mechanisms and resource utilization, it is established that the performance of such networks is determined not by individual physical layer parameters, but by the consistency of time and frequency resource management at the MAC layer. The chapter systematizes factors reducing multi-channel transmission efficiency, demonstrates the limitations of local approaches to channel selection, and formulates the scientific task of the research.

In the second chapter, the problem of evaluating the spectral configuration of a multi-channel device under conditions where channel selection fails to provide efficient resource utilization due to mutual interference and hardware MLO constraints is solved. For this purpose, a mathematical model of spectral configuration was developed, and a methodology for multi-criteria channel state evaluation was improved based on an integrated quality metric that considers radio link quality, interference level, bandwidth, resource unit allocation, and cross-link effects.

In the third chapter, the problem of constructing a mathematical model for traffic distribution in a multi-link device, necessary for the formal description of the system state and the rules for using available links in a stochastic environment, is solved. Based on queuing theory, a mathematical model of a multi-link device with time discretization by decision cycles was built, a system state vector based on normalized link metrics and queue parameters was introduced, traffic distribution policies were formalized as a mapping of the state to a control decision, the space of feasible decisions considering MLO constraints was determined, and an analytical relationship between control parameters and quality of service indicators was established.

In the fourth chapter, the problem of organizing resource allocation in multi-link networks under conditions of dynamic changes in channel states, traffic characteristics, time overheads, and hardware synchronization constraints is solved. For this, a resource allocation methodology is proposed, implemented as a functional block at the U-MAC level for a closed control loop, within which link state monitoring and evaluation, flow profiling by access categories, channel occupancy time prediction, and load distribution matrix optimization based on the criterion of minimizing the maximum transmission completion time are performed.

The obtained results indicate that increasing the efficiency of IEEE 802.11be multi-channel wireless networks is achieved through coordinated radio resource management, taking into account cross-link interaction, traffic characteristics, and MLO mode constraints. The practical significance of the work lies in the fact that the proposed mathematical model and methods can serve as a basis for developing and

improving medium access control algorithms in multi-channel devices of IEEE 802.11be wireless networks, aimed at increasing throughput and reducing latency in next-generation multi-link wireless networks.

The scientific provisions within this study were utilized during research and preparation of materials for the scientific research work carried out at the State University of Information and Communication Technologies on the topic "Methods for monitoring the performance of telecommunication networks based on the analysis of their quality indicators" (Agreement No. 11/24 dated 03.06.2024 with PE "Sarder Telecom"), and are also used in the educational process of the Educational and Scientific Institute of Telecommunications at the State University of Information and Communication Technologies when completing qualification works and teaching the academic disciplines "Wireless Sensor Networks" and "Design of Telecommunication Systems and Networks".

Keywords: wireless communication, scalable systems, model optimization, heterogeneous networks, mathematical modeling, mixed traffic, data traffic, spectral efficiency, transmission latency, throughput, traffic distribution, communication network, transmission channel, wireless networks, data transmission.

## LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

Scientific publications presenting the main research findings of the dissertation:

[1] D. Tabor, “An Adaptive Channel Switching Algorithm for a Multi-Channel Wi-Fi 7 Device in Heterogeneous Networks” *Scientific Notes of the State University of Information and Communication Technologies*, № 1 (7), pp. 46–51, 2025, doi: 10.31673/2786-8362.2025.011691.

[2] D. Tabor, “Evaluation of Key Capabilities of the 7th Generation Wi-Fi Wireless Network” *Measurement and Computing Technology in Technological Processes*, № 4, pp. 297–307, 2024, doi: 10.31891/2219-9365-2024-80-37.

[3] D. Tabor, “Comparison of Access Modes for Multi-Channel Devices in the IEEE 802.11be Network,” *Measurement and Computing Technology in Technological Processes*, №1, pp. 250–259, 2025, doi: 10.31891/2219-9365-2025-81-31.

[4] D. Tabor, “Resource Allocation Methodology in Multi-Band Wireless Networks with Traffic Prioritization,” *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, №3, pp. 171–175, 2025, doi: 10.31891/2219-9365-2025-83-22.

[5] D. Tabor, “A Method for Mathematical Modeling of Traffic Distribution in Multi-Link Devices,” *Scientific Notes of the State University of Information and Communication Technologies*, № 1 (9). pp. 62-70, 2026, doi: 10.31673/2786-8362.2026.012742

Conference Proceedings and Abstracts:

[1] D. Tabor, “Capabilities of the New Generation of Wireless Communication Wi-Fi 7,” in *Telecommunication: Problems and Innovation*, Kyiv, Ukraine, Dec. 20, 2023. Kyiv, Ukraine: DUKT, 2023, pp. 4–6. [Online]. Available: [https://duikt.edu.ua/uploads/n\\_12108\\_23987482.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/n_12108_23987482.pdf) (in Ukrainian).

[2] D. Tabor, “Overview of Security Standards and Countermeasures Against Unauthorized Access to Wi-Fi Networks,” in *Telecommunication: Problems and Innovation*, Kyiv, Ukraine, Dec. 20, 2023. Kyiv, Ukraine: DUKT, 2023, pp. 45–47.

[Online]. Available: [https://duikt.edu.ua/uploads/n\\_12108\\_23987482.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/n_12108_23987482.pdf) (in Ukrainian).

[3] D. Tabor, “Overview and Comparison of Channel Switching Methods in IEEE 802.11be Networks,” in *Modern Intelligent Information Technologies in Science and Education*, Kyiv, Ukraine, May 15, 2025. Kyiv, Ukraine: DUKT, 2025, pp. 294–297.

[Online]. Available: [https://duikt.edu.ua/uploads/p\\_2779\\_68674368.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/p_2779_68674368.pdf) (in Ukrainian).

[4] D. Tabor, V. Ruzhynskyi, S. Khlamov, “A method for mathematical modeling of traffic distribution in multi-link devices”, in Ninth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2026), Zaporizhzhia, Ukraine, 3 May 2026. Zaporizhzhia, Ukraine: NU “Zaporizhzhia Polytechnic”, 2026. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Yt74R-Plcao>

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	16
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.11BE .....	22
1.1. Еволюція бездротових локальних мереж та вичерпання екстенсивних методів підвищення продуктивності .....	22
1.2. Архітектура та принципи функціонування багатоканального режиму роботи у стандарті IEEE 802.11be .....	24
1.3. Аналіз режимів роботи багатоканального пристрою.....	30
1.4. Систематизація факторів, що призводять до зниження ефективності багатоканальної передачі.....	36
1.5. Огляд існуючих методів управління радіоресурсами в бездротових локальних мережах .....	44
1.6. Постановка задачі дослідження.....	46
1.7. Висновки до розділу 1 .....	47
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	49
2.1. Класифікація метрик оцінювання стану частотного каналу в бездротових мережах стандарту IEEE 802.11 .....	49
2.2. Аналіз методів оцінки і вибору каналу в корпоративних системах керування бездротовим доступом.....	51
2.3. Формалізація задачі вибору каналу в однолінкових мережах та її обмеження .....	56
2.4. Опис спектральної конфігурації багатоканального пристрою.....	58
2.5. Вплив міжлінкових залежностей на ефективну пропускну здатність .....	60
2.6. Постановка задачі глобальної оптимізації спектральної конфігурації для MLO.....	62
2.7. Метод оцінювання спектральної конфігурації багатоканального пристрою.....	63

2.8. Висновки до розділу 2 .....	68
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ТРАФІКУ В БАГАТОКАНАЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ.....	70
3.1. Обґрунтування вимог до математичної моделі та формалізація підходів до керування розподілом трафіку.....	70
3.2. Опис об'єкта керування та вектора стану системи на основі нормованих метрик лінків і параметрів черг .....	71
3.2.1. Модель багатоканального пристрою .....	71
3.2.2. Вектор стану системи.....	73
3.3. Математичне представлення рішення розподілу трафіку .....	75
3.3.1 Простір допустимих рішень з урахуванням обмежень режимів роботи багатоканальної операції .....	77
3.3.2 Політика розподілу як відображення стану у рішення.....	79
3.4. Аналітичний зв'язок між рішенням і результатами через оцінку пропускну здатності .....	81
3.5. Висновки до розділу 3 .....	87
РОЗДІЛ 4. МЕТОД РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	89
4.1. Концепція методики розподілу ресурсів .....	89
4.2. Оптимізація розподілу трафіку з урахуванням апаратних обмежень синхронізації .....	92
4.3. Верифікація ефективності методики розподілу ресурсів шляхом порівняння з базовими методами.....	95
4.4. Висновки до розділу 4 .....	104
ВИСНОВКИ .....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	108
ДОДАТКИ .....	121

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

IEEE - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

WLAN - бездротова локальна мережа (Wireless Local Area Network)

MLO - багатоканальна операція (Multi-Link Operation)

MLD - багатоканальний пристрій (Multi-Link Device)

SLD - однолінковий пристрій (Single-Link Device)

STA - станція (Station)

AP - точка доступу (Access Point)

SAP - точка доступу до сервісу (Service Access Point)

MAC - керування доступом до середовища (Medium Access Control)

PHY - фізичний рівень (Physical Layer)

DL - низхідна передача (Downlink)

UL - висхідна передача (Uplink)

CCA - оцінювання зайнятості каналу (Clear Channel Assessment)

EDCA - розширений розподілений доступ до каналу (Enhanced Distributed Channel Access)

CSMA/CA - множинний доступ з контролем несучої та уникненням колізій (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

AIFS - міжкадровий інтервал арбітражу (Arbitration Inter-Frame Space)

CW - вікно конкуренції (Contention Window)

TXOP - інтервал можливості передачі (Transmit Opportunity)

STR - одночасне передавання та приймання (Simultaneous Transmit and Receive)

NSTR - неодноразове передавання та приймання (Non-Simultaneous Transmit and Receive)

MLSR - багатоканальна робота з одним радіоінтерфейсом (Multi-Link Single-Radio)



EMLSR - розширена багатоканальна робота з одним радіоінтерфейсом  
(Enhanced Multi-Link Single-Radio)

TID - ідентифікатор трафіку (Traffic Identifier)

AC - категорія доступу (Access Category)

PSD - спектральна щільність потужності (Power Spectral Density)

EHT - надвисока пропускна здатність (Extremely High Throughput)

OFDMA - ортогональний множинний доступ з частотним розділенням  
(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

RU - ресурсна одиниця (Resource Unit)

MRU - множинна ресурсна одиниця (Multiple Resource Unit)

U-SIG - універсальне сигнальне поле (Universal Signal)

RSSI - індикатор рівня прийнятого сигналу (Received Signal Strength Indicator)

SINR - відношення сигналу до інтерференції та шуму (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)

CSI - інформація про стан каналу (Channel State Information)

MCS - схема модуляції та кодування (Modulation and Coding Scheme)

SNR - відношення сигналу до шуму (Signal-to-Noise Ratio)

QAM - квадратурна амплітудна модуляція (Quadrature Amplitude Modulation)

MU-MIMO - багатокористувацька багатовходова/виходова система  
(Multi-User Multiple Input Multiple Output)

RTA - застосунки реального часу (Real-Time Applications)

PPDU - блок даних протоколу фізичного рівня (Physical Protocol Data Unit)

DIFS - розподілений міжкадровий інтервал (Distributed Inter-Frame Space)

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку бездротових локальних мереж характеризується зростанням обсягів трафіку, підвищенням щільності розгортання точок доступу та посиленням вимог до сервісів, чутливих до затримки і стабільності передачі даних.

У попередніх поколіннях Wi-Fi (4/5/6) приріст продуктивності досягався екстенсивним шляхом за рахунок розширення смуг, переходу на складнішу модуляцію та збільшення кількості просторових потоків. Проте в неліцензованому спектрі зростання номінальної швидкості на фізичному рівні вже не забезпечує пропорційного збільшення реальної пропускної здатності. Фундаментальним рішенням стало запровадження в новому поколінні Wi-Fi 7 багатоканальної роботи (Multi-Link Operation, MLO), завдяки якій багатоканальні пристрої можуть одночасно використовувати кілька ліній зв'язку в різних діапазонах (2,4/5/6 ГГц), агрегувати їх, динамічно балансувати навантаження або дублювати пакети.

Це можливо завдяки розділенню рівня доступу до середовища (MAC) на загальний для всіх каналів та окремі підрівні для кожного каналу. Відповідно, вибір необхідного інтерфейсу для передачі на фізичний рівень перетворюється на задачу наскрізної координації, де продуктивність залежить від алгоритмів інтелектуального розподілу трафіку.

Аналіз наукових досліджень показує, що для об'єктивної оцінки реальної пропускної здатності в мережах нового покоління необхідне створення вдосконалених аналітичних інструментів для точного моделювання протоколів доступу до середовища. Водночас стоїть задача розроблення комплексних причинно-наслідкових моделей технічної діагностики та радіомоніторингу, які б дозволяли на основі емпіричних вимірювань швидко прогнозувати придатність бездротового каналу для передачі трафіку під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів. Окрім цього, значна увага науковців приділена створенню динамічних політик балансування навантаження, здатних адаптивно перерозподіляти

інформаційні потоки між доступними радіоінтерфейсами залежно від миттєвого рівня перевантаженості каналів.

Основні проблеми, що зумовлюють актуальність дослідження, такі:

- стрімке зростання щільності пристроїв та обсягів трафіку, що призводить до перевантаженості неліцензованого спектра;
- проблема сумісності, справедливого доступу до каналу та деградації продуктивності під час спільної роботи пристроїв Wi-Fi 7 із пристроями попередніх поколінь (Wi-Fi 4/5/6);
- внутрішні завади при багатоканальній роботі, що обмежують можливості одночасного приймання та передавання через вплив між сусідніми радіоінтерфейсами.

Отже, постає науково-технічна задача, що полягає у розробці та удосконаленні моделей і методів управління ресурсами бездротової мережі, які, на відміну від існуючих, враховують комплексний вплив стану каналів, міжлінкових завад та обмежень режимів багатоканальної роботи в мережах стандарту IEEE 802.11be

**Метою дослідження** є підвищення ефективності передавання багатоканальним пристроєм шляхом розробки методів і моделей управління, що забезпечують максимізацію сумарної пропускну здатності та мінімізацію середньої затримки доставки пакетів у мережах стандарту IEEE 802.11be.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- Провести аналіз архітектури багатоканального пристрою та мереж стандарту IEEE 802.11be для систематизації факторів, що впливають на ефективність роботи [1, 2].
- Провести аналіз методів оцінювання стану каналу для багатоканальної роботи.
- Розробити модель, що дозволить проводити оцінку ефективності розподілу трафіку між каналами в багатоканальному пристрої.

- Розробити метод розподілу ресурсів, спрямований на підвищення продуктивності передачі даних для багатоканального пристрою стандарту IEEE 802.11be.

- Експериментально перевірити ефективність запропонованого методу шляхом імітаційного моделювання та порівняти її з існуючими підходами.

**Об’єкт дослідження** - процес розподілу трафіку та ресурсів між каналами багатоканального пристрою у мережах стандарту IEEE 802.11be.

**Предмет дослідження** - методи і моделі управління для максимізації сумарної пропускної здатності та мінімізації середньої затримки доставки пакетів.

**Методи дослідження** - системного аналізу, багатокритеріального аналізу, методи теорії прийняття рішень в умовах стохастичної невизначеності, методи теорії ймовірностей та математичної статистики, методи теорії масового обслуговування, методи комбінаторної оптимізації та евристичного пошуку, а також методи імітаційного моделювання на базі таких інструментів, як MATLAB з використанням модуля WLAN Toolbox.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у наступному:

- Удосконалено метод оцінки каналу для багатоканального пристрою стандарту IEEE 802.11be [3], який, на відміну від існуючих, ґрунтується на комплексному аналізі стану радіосередовища за рахунок впровадження інтегрованого показника якості та вагових коефіцієнтів, які формалізують поточне завантаження спектру, динаміку завад та вплив пристроїв попередніх поколінь Wi-Fi, що дозволяє проводити оцінку та забезпечити обґрунтований вибір оптимальних частотних конфігурацій і каналів.

- Вперше розроблено математичну модель розподілу трафіку для багатоканального пристрою [4], яка ґрунтується на представленні пристрою як єдиної системи масового обслуговування, де стан середовища та обмеження режимів багатоканальної роботи формалізуються вектором стану і матрицею рішень, а обґрунтування вибору досягається за рахунок встановлення

аналітичного зв'язку між цими параметрами керування та очікуваними показниками якості обслуговування, що дозволяє прийняти рішення про доцільність використання політик розподілу трафіку для поточного циклу планування при багатоканальній роботі.

– Вперше розроблено метод розподілу ресурсів між каналами багатоканального пристрою [5], який інтегрує результати аналізу стану радіосередовища та модель розподілу трафіку за рахунок поєднання профілювання потоків даних за категоріями доступу із прогнозуванням їхнього часу зайнятості радіоресурсу та оптимізацією матриці розподілу навантаження, що дозволяє забезпечити узгоджене керування каналами для підвищення сумарної пропускної здатності та мінімізації затримок доставки пакетів при багатоканальній роботі.

Наукові положення в межах даного дослідження були використані під час проведення досліджень та підготовки матеріалів науково-дослідної роботи, що виконувалася у Державному університеті інформаційно-комунікаційних технологій за темою «Методи моніторингу продуктивності телекомунікаційних мереж на основі аналізу показників їх якості» (договір № 11/24 від 03.06.2024 р. з ПНВП «Сардер Телеком»), а також використовуються в навчальному процесі Навчально-наукового інституту телекомунікацій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій при виконанні кваліфікаційних робіт і викладанні навчальних дисциплін «Сенсорні бездротові мережі» та «Проектування телекомунікаційних систем та мереж».

### **Структура та обсяг дисертаційної роботи**

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів та висновків до них, а також бібліографії, що містить 107 посилань на 11 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 122 сторінки, з них 111 сторінок основного тексту, 26 малюнків, 4 таблиці.

# **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.11BE**

## **1.1. Еволюція бездротових локальних мереж та вичерпання екстенсивних методів підвищення продуктивності**

Експоненційне зростання попиту на бездротові послуги зумовлене не лише збільшенням кількості підключених пристроїв, яка, за оцінками, досягла 19,5 млрд у 2023 році [6], але й трансформацією профілю навантаження [7]. У сучасних мережах можуть працювати різні чутливі до затримок сервіси від промислової автоматизації до хмарного геймінгу, де критичним є забезпечення затримки менше 5 мс [8, 9, 10], а передача відео 8K вимагає пропускну здатності до 20 Гбіт/с [11]. Враховуючи, що до 63% мобільного трафіку використовується у Wi-Fi мережах, забезпечення високих швидкостей повинно супроводжуватися гарантованою надійністю доставки [12]. Сукупно ці фактори формують підставу для переходу від стратегії нарощування пікової швидкості до методів детермінованого управління ресурсами [10], здатних забезпечити необхідний сервіс в умовах конкуренції за спільний радіоресурс.

Еволюція стандартів IEEE 802.11 від 802.11n що підтримував пропускну здатність до 600 Мбіт/с через 802.11ac (до 6,9 Гбіт/с) до 802.11ax (до 9,6 Гбіт/с) супроводжувалася екстенсивним зростанням ширини каналів та порядків модуляції [13, 14]. Проте при переході до нового покоління Wi-Fi 7, який впроваджено на стандарті IEEE 802.11be акцент зміщується, хоча стандарт підтримує пропускну здатність понад 40 Гбіт/с, пріоритетом стає підтримка застосунків реального часу (Real-Time Applications, RTA). Така зміна є індикатором вичерпання простого масштабування, оскільки у неліцензованому спектрі зростання ширини смуги та кількості просторових потоків наштовхується на обмеження співіснування та фрагментації спектра. Тому продуктивність системи визначається не лише можливостями фізичного рівня (Physical layer, PHY), а й узгодженістю механізмів управління доступом (Medium Access Control, MAC).

Для подолання дефіциту ресурсів було використано діапазон 6 ГГц, що надав додаткові 1200 МГц спектра та уможливив використання надшироких каналів 320 МГц [15, 16]. Однак для даного діапазону введені обмеження за спектральною щільністю потужності (Power Spectral Density, PSD), що робить неефективним використання вузьких каналів [17]. Наявність трьох діапазонів (2.4/5/6 ГГц) дала можливість впровадження технології агрегування декількох каналів, а саме багатоканальних операцій (Multi-Link Operation, MLO). Це підтверджує необхідність застосування інтенсивних методів управління спектром, де продуктивність розглядається як результат глобальної оптимізації часово-частотних ресурсів, а не як властивість окремої спектральної конфігурації [18].

Перехід до багатоканальних архітектур у бездротових мережах (Wireless Local Area Network, WLAN) стандарту IEEE 802.11be пов'язується з інтеграцією MLO як фундаментального механізму координації кількох радіоінтерфейсів в межах одного або декількох логічних приєднань. Така зміна зумовлена не лише технічними, а й експлуатаційними передумовами, зокрема зростанням щільності публічних точок доступу, кількість яких за оцінками збільшилася у чотири рази з 2018 року до більше ніж 600 млн у 2023 [19, 20].

У такому формулюванні MLO не є розширенням фізичного рівня (PHY), а змінює логіку управління ресурсами через архітектурний поділ на рівні Upper MAC та Lower MAC. Це надає багатоканальному пристрою (Multi Link Device, MLD) можливість динамічно розподіляти трафік між лінками або дублювати пакети для підвищення надійності, адаптуючись до стану середовища, наприклад, асиметричної зайнятості каналів. Отже, впровадження MLO створює підґрунтя для систематизації факторів, що визначають продуктивність у багатоканальному режимі, з обов'язковим урахуванням взаємодії з традиційними однолінковими пристроями (Single Link Device, SLD), спільна робота з якими може суттєво впливати на ефективність мережі в гетерогенних сценаріях [21].

## **1.2. Архітектура та принципи функціонування багатоканального режиму роботи у стандарті IEEE 802.11be**

Архітектурна модель MLD у стандарті IEEE 802.11be визначається як логічна сутність, що об'єднує кілька станцій (Station, STA) або точок доступу (Access Point, AP) під єдиною точкою доступу до сервісу (Service Access Point, SAP) на рівні управління доступом до середовища (Medium Access Control, MAC) [16]. Така архітектура створює основу для координації радіоінтерфейсів у межах одного пристрою, дозволяючи використовувати всі доступні частотні діапазони для балансування навантаження, агрегації смуг та одночасної передачі даних у напрямках від AP до STA (Downlink, DL) та від STA до AP (Uplink, UL). Проте, централізація управління на рівні Upper MAC робить продуктивність системи залежною не від фізичних параметрів окремого каналу, а від ефективності алгоритмів спільного доступу та взаємодії лінків в умовах гетерогенного середовища, де співіснують MLD та SLD.

Фізичний рівень (PHY) сучасних бездротових мереж базується на використанні неліцензованих діапазонів 2.4 та 5 ГГц, а також на інтеграції діапазону 6 ГГц, який суттєво розширює доступну ємність спектра, уможливлуючи використання каналів шириною до 320 МГц. В таких умовах ключовим аспектом стає не лише наявність частотного ресурсу, а й механізми його дискретизації та правила конкурентного доступу. Згідно зі стандартом 802.11be, базовим елементом для оцінки зайнятості середовища (CCA) та ініціації передачі залишається первинний канал шириною 20 МГц, стан якого визначає можливість використання вторинних підканалів та розширення смуги пропускання.

На рівні MAC у IEEE 802.11be багатоканальність реалізується через розділення функцій на спільний Upper MAC та набір незалежних Lower MAC для кожного лінка (Рис. 1.1 [16]). Upper MAC в MLD відповідає за керування чергами, класифікацію трафіку (TID-to-Link mapping, TID) і вибір лінка для передавання, тоді як кожен лінк виконує власну процедуру доступу до середовища передачі (EDCA/CSMA/CA) з окремими параметрами часу відстрочок передачі (AIFS, CW



і лічильником backoff). У результаті один MLD фактично запускає кілька паралельних процесів змагання за TXOP, що може зменшувати час очікування доступу, але водночас створює ризик переваги над однолінковими вузлами та накладає вимоги координації між лінками. Тому продуктивність MLO на MAC-рівні визначається політикою узгодження доступу (наприклад, зв'язування або призупинення backoff на інших лінках під час активного TXOP), а також підтримкою обмежень STR/NSTR і специфіки MLSR, де один радіоінтерфейс потребує керованого перемикавання між каналами із врахуванням затримки переходу. Для AP це перетворює планування ресурсів на задачу спільної оптимізації де потрібно одночасно обирати лінк для кожної передачі, формувати TXOP та розподіляти ресурси OFDMA/MU-MIMO так, щоб мінімізувати сумарні затримки і накладні витрати сигналізації при збереженні справедливості співіснування з SLD.

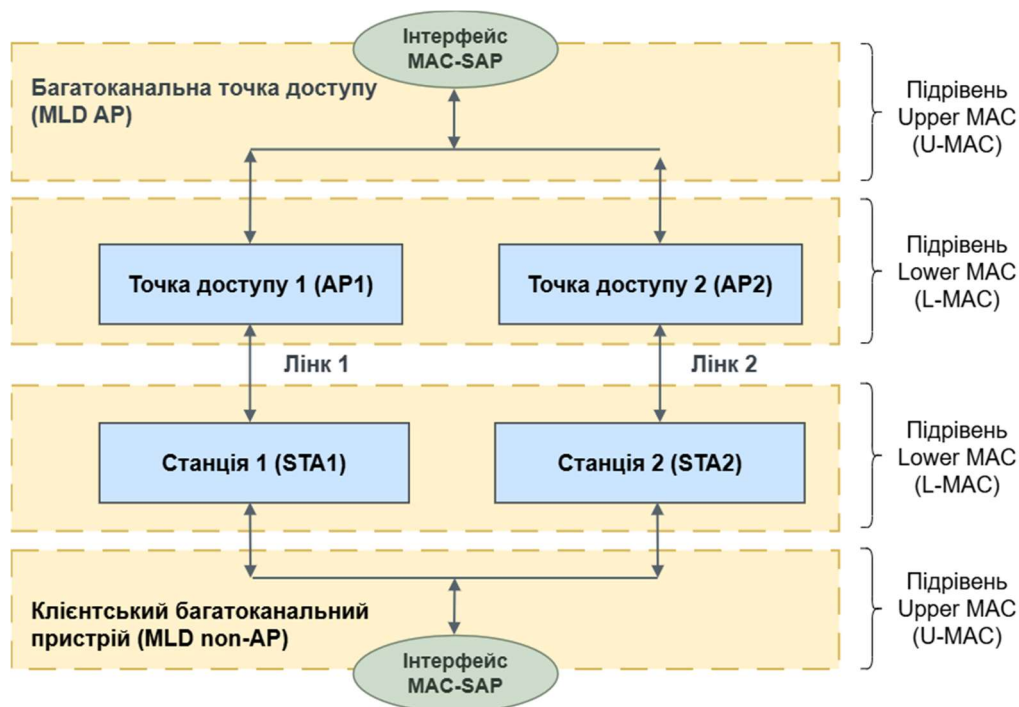


Рис. 1.1 Схема багатоканального пристрою і взаємодії між рівнями

У межах MLD реалізовано єдину точку доступу до сервісу (MAC-SAP) для рівня LLC, що створює технічні передумови для агрегації трафіку та його динамічного розподілу між лінками без модифікації протоколів мережевого рівня. Механізм прив'язки потоків до ресурсів реалізується через процедуру TID-

to-Link mapping, де ідентифікатори трафіку (TID) асоціюються з конкретним набором лінків для передачі.

Ієрархія каналів реалізується через агрегацію базових підканалів шириною 20 МГц у ширші конфігурації 40/80/160 та 320 МГц. Таке розширення смуги суттєво ускладнює простір можливих спектральних конфігурацій, роблячи управління спектром критичним фактором продуктивності. На практиці фізична пропускна здатність визначається не номінальним номером каналу, а сукупністю фактично доступних частотних блоків у момент передачі, що вимагає розмежування понять номінальної та ефективної ширини смуги.

В правилах об'єднання каналів (channel bonding) якщо вторинний канал 20 МГц зайнятий, то блокується використання всієї ширшої смуги (наприклад, 80 МГц), навіть якщо інші підканали вільні [22]. Для вирішення цієї задачі у сучасних стандартах, зокрема IEEE 802.11be, застосовується механізм відсікання преамбули (preamble puncturing). Він дозволяє виконувати передачу в широкій смузі, виключаючи (пропускаючи) окремі зайняті підканали 20 МГц, де не передається преамбула і не виділяються ресурсні одиниці. Даний механізм може застосовуватися, коли частина спектра зайнята завадами або заблокована адміністративно.

Механізм виключення описується через бітові маски (bitmaps) у полі U-SIG або ЕНТ Operation element, де «1» позначає активний підканал, а «0» - виключений. Цей підхід масштабується на канали шириною до 320 МГц, проте для каналів до 160 МГц крок пропуску становить 20 МГц, тоді як для 320 МГц у певних режимах гранулярність може становити 40 МГц.

Пропускання преамбули дозволяє сформувати «ефективну ширину смуги», використовуючи лише доступні фрагменти спектра. Це забезпечує гнучкість у щільних розгортаннях, дозволяючи уникнути примусового переходу на вузькі канали (наприклад, 20 МГц) через локальні вузькосмугові завади.

Пропускна здатність РНУ є функцією параметрів доступної ширини смуги пропускання та досяжного відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). У межах еволюції стандартів IEEE 802.11 збільшення номінальних швидкостей

досягається масштабуванням саме цих складових, підвищенням порядку квадратурної амплітудної модуляції (QAM), розширенням смуги каналу та нарощуванням кількості просторових потоків. При цьому приріст від розширення смуги має лінійну складову щодо збільшення швидкості передачі даних, однак супроводжується логарифмічним зниженням SNR, де кожне подвоєння ширини каналу призводить до зростання рівня теплового шуму на 3 дБ. Це означає, що для підтримки тієї ж зони покриття при розширенні смуги необхідне пропорційне збільшення потужності, тому на практиці збільшення ширини каналу забезпечує вигоду у корисній швидкості лише на помірних відстанях, де рівень прийнятого сигналу суттєво перевищує поріг чутливості приймача.

Якісна складова каналу (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR) безпосередньо визначає допустимий набір схем модуляції та кодування (Modulation and Coding Scheme, MCS) [23], оскільки підвищення щільності сузір'я вимагає експоненційного зростання SNR на приймачі. Для високих порядків модуляції це обмеження є критичним, якщо для 1024-QAM у 802.11ax мінімальний поріг SNR становить близько 32 - 34 дБ, то для 4096-QAM у 802.11be ця вимога зростає до понад 43 дБ [24]. Такий високий рівень сигналу є нетиповим для реальних сценаріїв без використання ефективного формування променя (Beamforming), що призводить до зменшення ефективної зони покриття для індексу MCS. Отже, корисна швидкість PHY визначається компромісом між смугою, яку фізично вдається агрегувати, та MCS, який залишається стійким при поточному SINR, що вимагає адаптивних механізмів керування ресурсами.

У технології OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) частотний ресурс каналу дискретизується на множину ресурсних одиниць (Resource Units, RU), які формуються групуванням ортогональних піднесучих. Згідно зі стандартом, тривалість передавання є фіксованою для всіх RU в межах одного кадру, а точка доступу динамічно розподіляє RU між станціями. Розміри RU в IEEE 802.11ax та 802.11be варіюються від 26 до  $2 \times 996$  тонів, де RU242, RU484, RU996 та  $RU2 \times 996$  відповідають спектральним смугам 20, 40, 80 та 160

МГц. Ієрархія RU є вкладеною, що дозволяє ділити широкі канали на менші блоки, однак у IEEE 802.11ax діє обмеження, за яким одній станції може бути призначено лише один RU. Що призводить до системної втрати спектральної ефективності (padding overhead) у сценаріях з малою кількістю користувачів [24]. Для вирішення цієї задачі в IEEE 802.11be введено механізм Multi-RU (MRU), який дозволяє агрегувати кілька розрізнених блоків спектра для одного клієнта, що змінює підхід до управління ресурсами від простого вибору каналу до комбінаторної оптимізації розподілу тонів.

Це перетворює багатокomпонентний частотний ресурс на гнучкий об'єкт управління, де ключовим завданням є мінімізація накладних витрат на сигналізацію допустимих комбінацій. Згідно зі специфікаціями стандарту, MRU формуються як об'єднання суміжних RU в межах чітко визначених меж, наприклад, «малі» MRU, такі як 52+26 тонів або 106+26 тонів, утворюються виключно в межах 20-МГц блоку [16]. Для ширших смуг визначено «великі» MRU, зокрема комбінація 484+242 тони, яка застосовується у випадках, коли в каналі 80 МГц один 20-МГц підканал вилючається через завади. Аналогічно, для смуги 160 МГц вводиться MRU 996+484 тони, що дозволяє продовжувати передачу при блокуванні 40-МГц сегмента [25]. У підсумку, перехід до MRU в IEEE 802.11be розширює простір рішень для планувальника доступу, перетворюючи задачу розподілу ресурсів з вибору каналу на комбінаторну оптимізацію розміщення тонів.

На основі аналізу специфікацій встановлено, що керований частотний ресурс у IEEE 802.11be не зводиться до вибору номера частотного каналу, а є багатовимірним вектором параметрів, що включає ширину смуги, бітову маску виключення преамбули та схему розподілу RU/MRU [26]. Звідси випливає, що математична модель системи повинна включати: доступний набір спектральних конфігурацій, правила агрегації піднесучих у MRU та метрики ефективності, що зв'язують обрану конфігурацію з доступною пропускнуою здатністю.

У SLD доступ до середовища регламентується процедурою CSMA/CA, в основі якої лежить алгоритм двійкової експоненціальної відстрочки (Binary

Exponential Backoff). Після детектування вільного середовища протягом інтервалу DIFS станція ініціалізує лічильник backoff випадковим значенням з інтервалу  $[0, CW - 1]$  і декрементує його у кожному слоті простою, якщо середовище стає зайнятим, відлік «заморожується». Передача ініціюється при досягненні лічильником нуля, а колізія виникає при одночасному початку передачі кількома станціями. Після невдалої спроби розмір вікна конкуренції  $CW$  (Contention Window) подвоюється до досягнення  $CW_{max}$ . Зі зростанням кількості активних станцій та інтенсивності трафіку система переходить у режим насичення, де пропускна здатність стабілізується на рівні, значно нижчому за фізичну швидкість, через зростання ймовірності колізій та накладних витрат на доступ. Саме ця властивість робить ефективність MAC-рівня «вузьким місцем» у щільних сценаріях, нівелюючи вигоду від використання високих порядків модуляції.

Поняття можливості передачі (TXOP) визначається як часовий інтервал, протягом якого станція, що отримала доступ до середовища, має право ініціювати одну або декілька послідовностей обміну кадрами. У межах TXOP дозволяється передача агрегованих блоків даних (A-MPDU), що дозволяє нівелювати накладні витрати на доступ, наприклад, при розмірі кадру 1470 байт пропускна здатність може становити лише 30% від каналної швидкості без агрегації [27]. Механізм дозволяє обробляти відмови окремих передач (Block ACK) без необхідності ініціювати новий цикл змагання. При цьому процедура backoff, що виконується всередині діючого TXOP для відновлення після колізії, розглядається як частина поточної можливості передачі. Для коректного моделювання часових умов старт TXOP прив'язується до перевірки вільності середовища протягом інтервалу DIFS/AIFS, що дозволяє аналітично розділити процес конкурентного доступу та процес корисного використання каналу, який для відеопотоків може динамічно адаптуватися залежно від рівня перевантаження.

### 1.3. Аналіз режимів роботи багатоканального пристрою

Відповідно до описаної вище архітектури MLD, класифікація режимів MLO проводиться на основі фізичної здатності пристрою до одночасності операцій, що визначає складність реалізації радіотракту та процедур MAC. MLD поділяються на пристрої з одним та з кількома повноцінними інтерфейсами, здатними функціонувати паралельно, що визначає, чи є багатоканальність формою часового мультиплексування (TDM) між каналами, чи повноцінною паралельною роботою лінків.

Режим MLSR (Multi-Link Single Radio) використовується для однолінкових пристроїв де одночасне використання кількох лінків є неможливим, оскільки єдиний радіомодуль повинен перемикатися між частотними діапазонами, що унеможливорює паралельні передачі (Рис. 1.2).

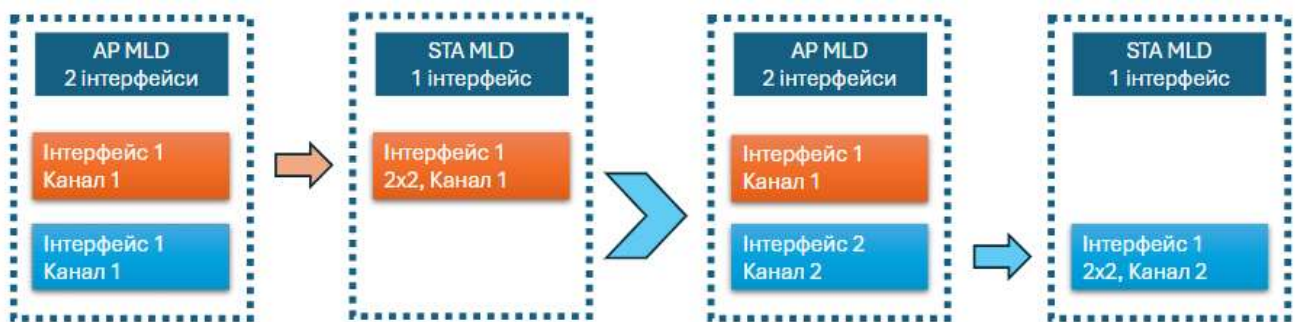


Рис. 1.2 Схема прийому-передачі між MLD в режимі MLSR

Режим EMLSR (Enhanced Multi-Link Single Radio) впроваджується як компромісне рішення для однолінкових MLD (Рис. 1.3), де MLO працює за рахунок одночасного моніторингу кількох лінків із подальшим швидким перемиканням основного радіомодуля на необхідний канал. У термінах механізму це означає, що MLD здатен одночасно виконувати оцінку зайнятості каналу (CCA) та прийом обмеженого набору керуючих кадрів на двох і більше каналах, перемикаючи антенну конфігурацію на активний канал після отримання початкового кадру (Initial Control Frame). На практиці реалізація EMLSR часто спирається на архітектуру з основним радіо та допоміжним скан-радіо, де точки доступу в складі AP MLD виконують процедуру EDCA незалежно по кожному діапазону, а після завершення backoff ініціюють EMLSR через передачу,

наприклад, кадру MU-RTS. Критичне апаратне обмеження полягає в тому, що скан-радіо є функціонально спрощеним і не розраховане на демодуляцію високих схем MCS, тому для обміну даними необхідне переналаштування основного радіо на вибраний лінк. Таке переналаштування потребує часу на операції PHY/MAC і в стандарті IEEE 802.11be враховується як затримка перемикання в діапазоні 16 - 256 мкс, що перевищує інтервал SIFS (16 мкс) і компенсується додаванням MAC padding у початковий керуючий кадр для забезпечення коректної синхронізації [28].

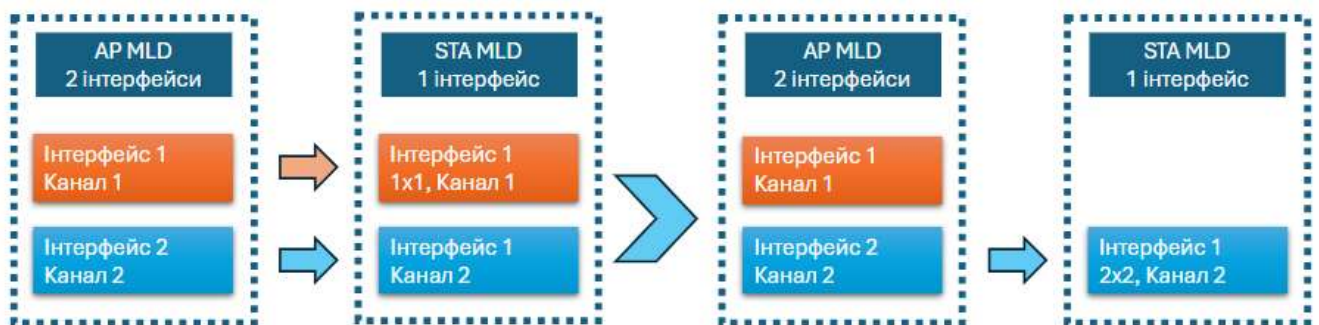


Рис. 1.3 Схема прийому-передачі між MLD в режимі EMLSR

Для багатоканального пристрою із кількома радіоінтерфейсами (MLMR) канали можуть бути активними одночасно (проте фундаментальна класифікація базується на здатності до одночасної передачі (Рис. 1.4) та прийому (Рис. 1.5)), що розділяє режими функціонування на STR (Simultaneous Transmit and Receive) та NSTR (Non-STR).

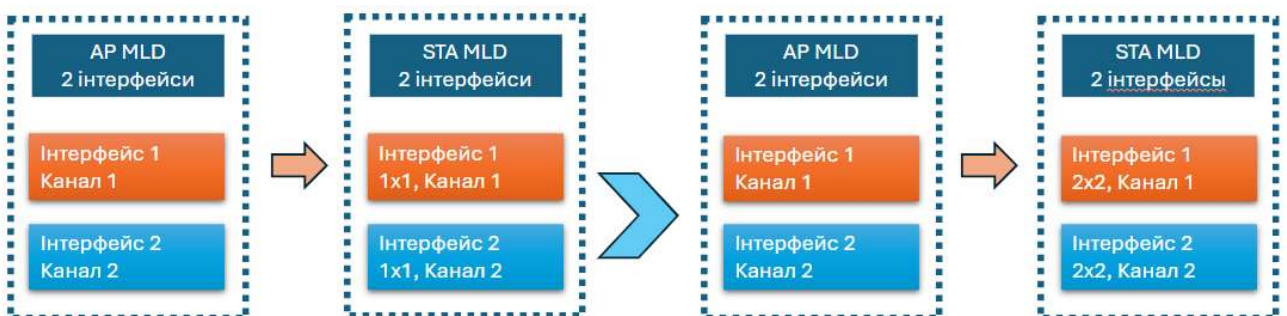


Рис. 1.4 Схема передачі між MLD в режимі MLMR



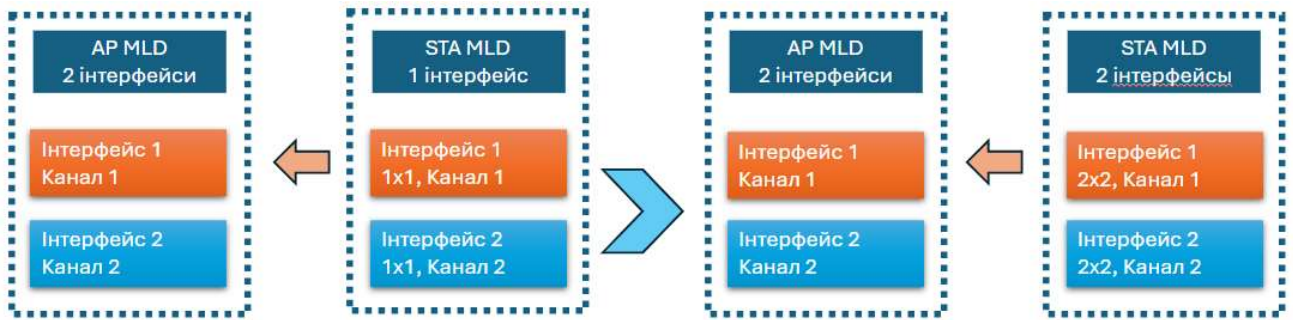


Рис. 1.5 Схема прийому між MLD в режимі MLMR

У режимі NSTR забороняється ситуація, коли на парі активних лінків відбуваються різноспрямовані операції тобто передача на одному та прийом на іншому (Рис. 1.6), оскільки це призводить до виникнення внутрішньосистемних завад (IDC), здатних блокувати приймальний тракт власною передачею. Тому при паралельній передачі фрейма PPDU (Physical Layer Protocol Data Unit) на один NSTR-пристрій стандарт IEEE 802.11be вимагає застосування механізму вирівнювання часу завершення кадрів (PPDU End Time Alignment), щоб гарантувати, що процедура підтвердження (ACK/BlockACK) не накладеться на активну передачу на суміжному каналі.

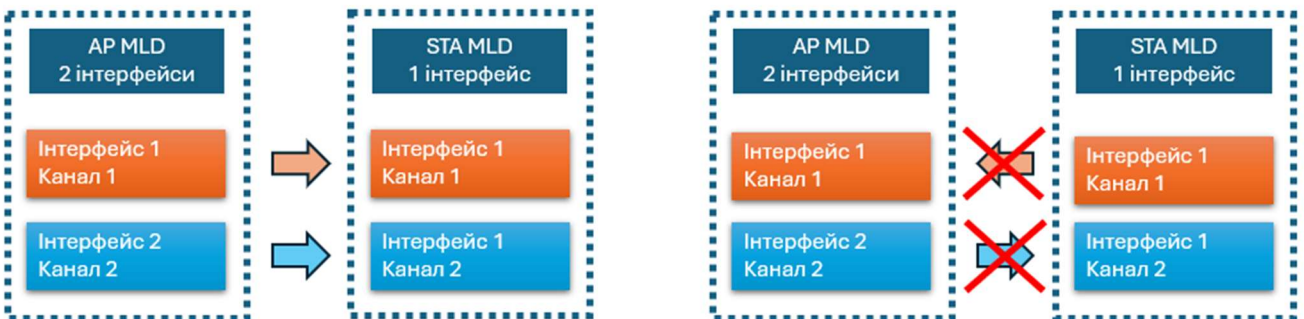


Рис. 1.6 Схема прийому-передачі між MLD в режимі NSTR

Ця вимога регламентує, що різниця між моментами завершення одночасно переданих PPDU не повинна перевищувати 8 мкс. Таким чином, режим NSTR накладає на підсистему планування корельовані міжлінкові обмеження, що безпосередньо впливає на тривалість доступного TXOP та стратегії агрегації пакетів.

Режим STR, натомість, допускає повністю асинхронні операції передачі та прийому на різних інтерфейсах одного MLD (Рис. 1.7), однак це досягається за



рахунок підвищених вимог до апаратної ізоляції радіотрактів. Для уникнення внутрішньопристроєвої інтерференції типу Uplink-to-Downlink режим STR вимагає забезпечення достатнього частотного рознесення між активними каналами або застосування вискоелективних методів самозаглушення, що на рівні реалізації означає використання складних RF-фільтрів. Типовим інженерним прикладом є конфігурація з використанням двох каналів 80 МГц у різних діапазонах (наприклад, 5 ГГц та 6 ГГц) із мінімальним частотним рознесенням 160 МГц, що демонструє трансформацію задачі розподілу каналів у задачу забезпечення електромагнітної сумісності. У контексті моделювання це означає, що EMLSR вносить накладні витрати на перемикання (Switching Delay), NSTR вводить обмеження синхронізації завершення передач, а STR переносить основне навантаження на забезпечення частотного рознесення.

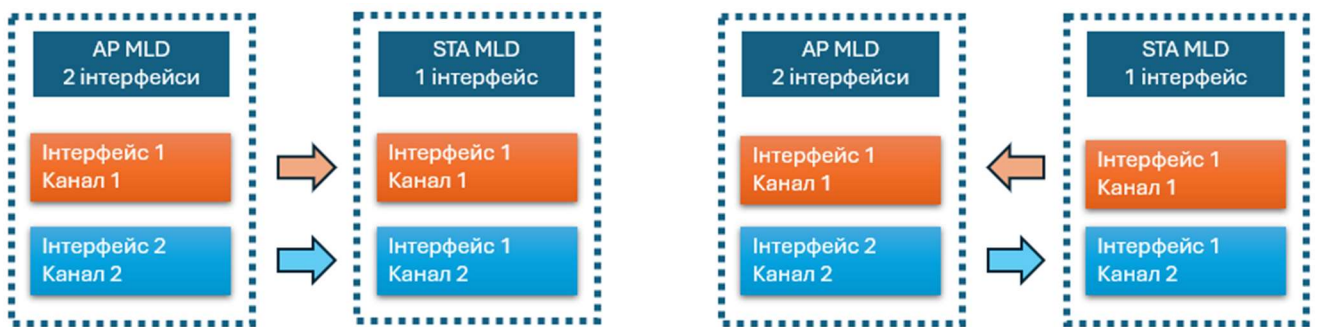


Рис. 1.7 Схема прийому-передачі між MLD в режимі STR

У MLD часові обмеження є наслідком фізичної колокації кількох радіоінтерфейсів на одній платформі та їх взаємного впливу. Ключовим фізичним механізмом, що змушує узгоджувати події на різних лінках, є витік енергії (Power Leakage) з передавального тракту в приймальний [29]. У дослідженнях, присвячених STR, зазначено, що шум від такого витоку для близько розташованих частот може на порядки перевищувати рівень корисного сигналу, тому одночасна передача і прийом не рекомендується [30]. Відповідно, можливість реалізації режиму STR залежить не лише від наявності кількох трансиверів, а й від спектральної відстані між ними, рівня позасмугових випромінювань та динамічного діапазону приймача.

На рівні протоколу фізичні обмеження NSTR трансформуються у вимоги синхронізації, зокрема у процедури вирівнювання моментів початку та завершення передач (PPDU Alignment) між лінками. Для усунення ситуацій, коли UL-передача на одному лінку блокує коректну оцінку стану середовища (CCA) на іншому через внутрішньосистемну інтерференцію (IDC), застосовується вирівнювання початку передавання коли одночасні UL-кадри ініціюються синхронно, щоб уникнути хибного детектування зайнятості каналу. Для нівелювання завад від службових відповідей, таких як BlockAck, застосовується вирівнювання завершення передавання, коли часові межі PPDU та очікуваних підтверджень узгоджуються між лінками. У стандарті це регламентується вимогою, що різниця часу завершення не повинна перевищувати 8 мкс, а початок передачі на другому лінку має відбутися не пізніше ніж через 4 мкс відносно межі слоту. Таким чином, у MLO правила синхронізації виступають інструментом безпосереднього мінімізації внутрішньосистемних завад і забезпечення коректності процедур CCA/ACK.

Логіка процедури відстрочки (backoff) в MLD фундаментально відрізняється від SLD тим, що локальне завершення лічильника на одному інтерфейсі не гарантує автоматичного початку передачі і рішення залежить від стану суміжного лінка та режиму роботи пристрою (STR/NSTR). Для AP MLD логіка прийняття рішення після досягнення нульового значення backoff на одному з лінків визначається поточним станом інших лінків MLD. Якщо суміжний лінк доступний для передачі, станція ініціює обмін даними. Якщо ж цей лінк зайнятий сторонньою активністю, процедура передачі на даному лінку призупиняється і лічильник backoff «заморожується». Якщо ж на іншому лінку вже триває передача DL-кадру іншому адресату, передача дозволяється, проте якщо адресат той самий (NSTR), застосовується примусове вирівнювання часу завершення. Це створює пряму стохастичну залежність між лінками на етапі ініціації TXOP і робить поведінку backoff фактично умовною відносно міжлінкового контексту.

Для клієнтських пристроїв (non-AP MLD) у режимі NSTR залежність є ще критичнішою де досягнення нуля лічильником backoff на одному лінку

призводить до його «заморожування» до моменту, поки лічильник на іншому лінку також не досягне нуля (Рис. 1.8 [31]). Якщо під час фази очікування будь-який із каналів стає зайнятим, процедура на лінку, що очікує, негайно перезапускає backoff. Лише після синхронного досягнення нуля ініціюється одночасна UL-передача з вирівнюванням старту, що безпосередньо пов'язує процес конкуренції з вимогами синхронізації. Додатково, навіть без явного блокування правилами NSTR, взаємодія виникає через фізичну неможливість коректного прослуховування одного каналу під час активності на іншому, що змушує призупиняти відлік backoff на час власної передачі. У проєкті IEEE 802.11be це також формалізовано через процедури відновлення синхронізації доступу (Medium Sync Recovery), коли після втрати синхронізації потрібен новий цикл backoff.

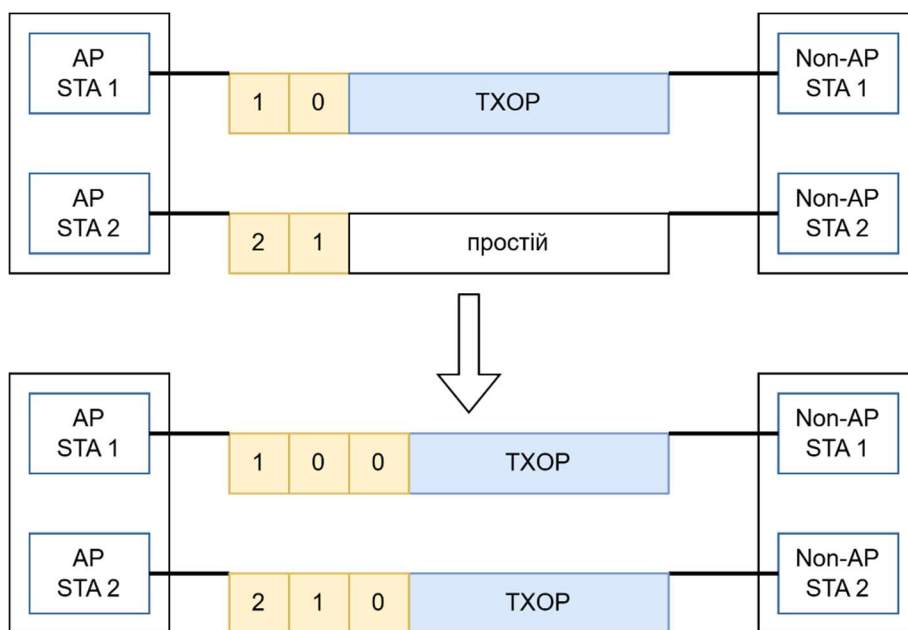


Рис. 1.8 Процедура вирівнювання кадрів початку передачі в режимі NSTR

Експериментальні дослідження ефективності різних реалізацій MLO [32, 33], зокрема режимів з одним радіоінтерфейсом та декількома лінками (Multi-Link Single-Radio, MLSR) та з кількома радіоінтерфейсами та декількома лінками (Multi-Link Multi-Radio, MLMR), демонструють залежність результатів від рівня навантаження мережі. Встановлено, що потенціал MLMR, який забезпечує одночасну передачу, максимально розкривається в ізольованих або слабо навантажених мережах. Натомість, в умовах середнього та високого

навантаження, режим MLSR може виявлятися ефективнішим для мінімізації затримок при збереженні справедливості доступу по відношенню до конкуруючих однолінкових вузлів. Це підкреслює критичність проблеми співіснування, оскільки взаємодія MLD з класичними механізмами доступу потребує детальної систематизації факторів впливу. З іншого боку, оцінки затримок у MLO для ненасиченого трафіку підтверджують доцільність переходу від SLD до MLD-архітектури. Доведено, що MLO дозволяє утримувати 95-й перцентиль затримки на прийнятному рівні навіть при зростанні навантаження, тоді як однолінковий режим (Single-Link Operation, SLO) демонструє неконтрольоване зростання затримок [20]. У цьому контексті подальший аналіз методів управління ресурсами фокусується на впорядкуванні таких факторів як рівень зайнятості каналів, ймовірність колізій та режим використання інтерфейсів.

Отже, у математичній моделі системи повинні бути явно задані міжлінкові обмеження одночасності та правила взаємозалежності процедур backoff/TXOP. Це безпосередньо обґрунтовує необхідність спільного розгляду часових та частотних ресурсів як єдиного об'єкта керування, що визначає постановку задачі розподілу ресурсів багатоканального пристрою.

#### **1.4. Систематизація факторів, що призводять до зниження ефективності багатоканальної передачі**

Використання MLO створює задачу управління спектром, де вибір каналу перестає бути одновимірною задачею для окремої підсистеми базових станцій (Basic Service Set, BSS) і перетворюється на задачу комбінаторної оптимізації для вектора лінків. Навіть за фіксованого набору ортогональних частотних ресурсів простір можливих станів мережі розширюється експоненційно зі збільшенням кількості лінків та AP, оскільки глобальна конфігурація є сукупністю рішень по кожному інтерфейсу. В літературі ця задача класифікується як NP-складна [34], де прямий перебір всіх варіантів є обчислювально неможливим через величезну кількість комбінацій частотних смуг і каналів. Така комбінаторна складність означає, що управління ресурсами не може обмежуватися локальним вибором

найменш завантаженого каналу, а вимагає узгодження рішень між лінками одного MLD з урахуванням обмежень сумісної роботи в часі та допустимості одночасних передач.

У сучасних підходах до управління ресурсами виділяються два домінуючі напрямки, це розподілені евристики та централізовані методи оптимізації. Для щільних WLAN найбільш розповсюдженою залишається евристика вибору найменш завантаженого каналу (Least Congested Channel Selection, LCCS), проте її некоординована природа призводить до субоптимального розподілу ресурсів у масштабах мережі [35]. Натомість централізовані підходи, що застосовують методи симульованого відпалу (Simulated Annealing), розфарбовування графів (Graph Coloring) або лінійного програмування, демонструють вищу ефективність за рахунок глобальної мінімізації інтерференції. А у контексті MLO додатково виникає задача асоціації та розподілу радіолінків [36].

Зокрема, у роботах з оптимізації мереж Wi-Fi 7 пропонується архітектура з контролером AP, який реалізує алгоритми Radio Resource Management на основі критерію пропорційної справедливості [37]. Такий алгоритм ітеративно оновлює призначення лінків для кожної станції, враховуючи історичні дані про пропускну здатність та стан каналів, що дозволяє досягти виграшу в продуктивності до 45% порівняно з жадібними алгоритмами [38]. Окрема група досліджень фокусується на плануванні TXOP, в якому розглядаються режими асинхронного доступу, де кожен лінк використовує незалежну процедуру EDCA [39], та синхронного доступу, де AP координує момент старту передач на агрегованих лінках для зменшення ймовірності колізій та накладних витрат на конкуренцію в умовах високої щільності пристроїв [40].

У режимі STR гіпотеза про статистичну незалежність лінків є справедливою лише за умови відсутності суттєвої внутрішньосистемної інтерференції (IDC), проте для практичних реалізацій STA-MLD ця умова часто порушується через фізичну близькість антен, коли передача на одному інтерфейсі блокує прийом на іншому. У експериментальних дослідженнях доведено, що витік енергії між каналами може перевищувати поріг детектування (-62 дБм), що робить

асинхронну роботу неможливою без дороговартісної фільтрації [41]. Саме тому клієнтські пристрої non-AP MLD змушені переходити до режиму NSTR, який вводить обов'язкові механізми часового вирівнювання, щоб уникнути колізій із кадрами підтвердження Block ACK. Це призводить до парадоксальної ситуації, коли рішення, локально оптимальне для одного лінка (наприклад, вибір каналу з меншим навантаженням), стає неефективним у глобальному сенсі через синхронізацію та залежність початку TXOP на одному лінку від стану іншого. Більше того, незалежний підхід до управління лінками не гарантує покращення QoS: експериментально зафіксовано, що при асиметричній зайнятості каналів режим MLO-STR може збільшувати 95-й перцентиль затримки на 112% порівняно з однолінковим режимом через субоптимальний розподіл пакетів у черги [42].

Систематизація факторів [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49] (Табл. 1.1), що детермінують продуктивність багатоканального пристрою, є критичною передумовою для розробки методів оптимізації пропускної здатності. До ключових проблем, що знижують ефективність MLO, відносять спектральну неефективність через фрагментацію, зростання ймовірності колізій внаслідок розсинхронізації лічильників backoff та зниження пропускної здатності через накладні витрати режиму NSTR. Кожен із зазначених факторів має пряму кореляцію з механізмами доступу, а їх нівелювання вимагає переходу від локальних евристик до спільних алгоритмів управління, наприклад, для режиму NSTR втрати пропускної здатності порівняно з ідеальним STR можуть складати до 40% у насичених сценаріях через вимушені простої каналів [31].

Табл. 1.1 Фактори деградації та зниження ефективності MLO у мережах Wi-Fi 7

Фактор	Механізм виникнення	Вплив на MLO
Внутрішньопристрійова інтерференція	Недостатня радіочастотна ізоляція між близько розташованими приймально-передавальними трактами в межах MLD під час одночасної роботи в різних смугах частот.	Вимушене використання режиму NSTR замість STR, що вимагає синхронізації початку/завершення передач на всіх лінках. Це унеможливує повнодуплексну роботу, збільшує затримки доступу до середовища та може вимагати додаткового вирівнювання кадрів, знижуючи ефективну пропускну здатність.
Асиметрія стану каналів	Значна різниця в миттєвих характеристиках лінків MLO-з'єднання, таких як рівень завад, завантаженість (об'єм трафіку конкуруючих пристроїв) або якість сигналу (SNR).	Порушення порядку надходження пакетів. Більш швидкі або вільні лінки доставляють пакети раніше, ніж повільніші. Це призводить до їхнього накопичення в буфері перевпорядкування на приймачі, збільшення джиттеру, виникнення блокування HOL (Head-of-Line blocking) та потенційних втрат через переповнення буфера.
Субоптимальне планування пакетів	Використання спрощених або неефективних евристичних алгоритмів у для розподілу потоку даних між доступними лінками без врахування їхнього динамічного стану.	Неефективне використання агрегованої смуги пропускання. Надсилання трафіку на перевантажений або зашумлений лінк може призвести до того, що загальна продуктивність MLO стане нижчою, ніж при роботі як SLO.

Фактор	Механізм виникнення	Вплив на MLO
Співіснування із застарілими пристроями	Робота MLD в одному частотному середовищі з пристроями попередніх стандартів (Wi-Fi 4/5/6)	Непередбачувані передачі застарілих пристроїв, що працюють за CSMA/CA, підвищують ймовірність колізій та змушують MLD скидати лічильники відстрочки. Це ускладнює для MLD захоплення середовища на кількох лінках одночасно та знижує загальну ефективність.
Фрагментація спектру	Наявність локальних вузькосмугових завад або зайнятості окремих 20-МГц підканалів у широкій смузі (160/320 МГц), що унеможлиблює її безперервне використання.	Неможливість використання максимальної ширини каналу. Хоча технологія Preamble Puncturing дозволяє "вирізати" зайняті підканали, це ускладнює планування RU, збільшує службові витрати на сигналізацію і може призводити до зниження спектральної ефективності.
Затримки перемикання в режимі EMLSR	Час, необхідний для EMLSR для переходу з режиму прослуховування кількох лінків до активного режиму передачі/прийому на одному з них після отримання тригера від точки доступу.	Виникнення фіксованої апаратної затримки (від 16 до 256 мкс), яка стандартизована як EMLSR Transition Delay. Для запобігання втрати контролю над каналом (TXOP) точка доступу змушена подовжувати передачу службових кадрів або даних, що збільшує службові накладні витрати.
Штрафи за синхронізацію доступу в NSTR	Апаратне обмеження режиму NSTR, яке вимагає початку передачі на обох лінках практично одночасно, щоб уникнути IDC.	Лінк, який першим завершив відлік випадкової відстрочки та отримав право на передачу, змушений чекати на інший лінк, який все ще очікує. Це призводить до невикористаних TXOP і втрати ефективної пропускної здатності.
Накладні витрати на сигналізацію	Збільшення обсягу службового трафіку, необхідного для координації роботи кількох лінків. Це включає обмін кадрами	У щільних мережах службовий трафік може займати значну частку ефірного часу, знижуючи частку, доступну для передачі корисних даних. Крім того,



Фактор	Механізм виникнення	Вплив на MLO
	BlockAck для кожного лінку, повідомлення про стан каналу, узгодження параметрів роботи MLD тощо.	блокування лінка в очікуванні підтвердження ACK з іншого може створювати простої.

Фрагментація спектра виникає внаслідок складності узгодженого розподілу частотних ресурсів між розрізненими лінками. У MLO кожен інтерфейс може оперувати в окремих радіодіапазонах, що призводить до неефективного використання сумарного спектрального ресурсу, наприклад, блокування первинного 20-МГц підканалу може унеможливити використання широкої смуги 80/160 МГц, змушуючи систему переходити на вузькосмугову передачу [50]. Це знижує загальну енергоефективність, оскільки робота в широких каналах без їх повного завантаження призводить до непропорційного зростання споживаної потужності. У сценаріях з високою щільністю пристроїв кількість доступних ортогональних каналів стає обмежуючим фактором, перетворюючи задачу розподілу ресурсів на NP-складну задачу комбінаторної оптимізації. Для MLO це означає необхідність врахування не лише миттєвого стану кожного каналу, а й перехресного впливу навантаження суміжних лінків, оскільки локальна оптимізація без урахування глобальної конфігурації мережі унеможлиблює досягнення максимуму пропускної здатності.

Колізії можуть бути спричинені асинхронністю лічильників відстрочки backoff у багатоканальному пристрою. У традиційному алгоритмі CSMA/CA кожна станція управляє власним лічильником незалежно, що дозволяє автономно оцінювати стан середовища та ініціювати передачу. Однак для MLO виникає проблема взаємозалежності де передача на одному інтерфейсі, навіть за наявності вільного каналу на іншому, призводить до блокування приймання через внутрішньосистемну інтерференцію. Якщо процедури доступу не синхронізовані, виникає ефект, коли станція не здатна детектувати зайнятість каналу під час активності на суміжному лінку, що призводить до колізій або помилок декодування ACK-кадрів. Для пристроїв які працюють в режимі NSTR

ця задача ускладнюється необхідністю заморожування лічильників backoff на всіх лінках під час будь-якої передачі, що вимагає впровадження складних процедур синхронізації доступу для уникнення блокування.

Також режим NSTR вводить обмеження на доступність каналів. У цьому режимі MLD здатний використовувати кілька лінків лише за умови синхронного завершення процедури backoff на всіх задіяних інтерфейсах. Це створює додаткові часові затримки, оскільки швидший лінк змушений очікувати звільнення повільнішого лінка або завершення його лічильника, що призводить до простоювання частотного ресурсу. В результаті, навіть за фізичної наявності кількох каналів, фактично доступний час для передачі обмежується найгіршим із каналів.

Зазначені обмеження призводять до системного зниження спектральної ефективності, оскільки розподілені ресурси не можуть бути оптимально використані через проблему блокування. Концепція одночасної різноспрямованої передачі, реалізована в режимі STR, дозволяє нівелювати ці втрати та максимізувати пропускну здатність, проте вимагає значної апаратної ізоляції та частотного рознесення для придушення перехресних завад, що є технічно складним завданням для мобільних пристроїв з обмеженим енергобюджетом. У цьому контексті ключовою задачею стає пошук балансу між часом очікування синхронізації та доступністю лінків, що визначає інтегральну продуктивність системи в умовах гетерогенного навантаження [51].

У рамках аналізу продуктивності Wi-Fi 7 мереж, критично важливим є врахування низки факторів, що детермінують ефективність використання радіоресурсу. Одним із фундаментальних аспектів, який потребує уваги, є спектральна неефективність внаслідок фрагментації спектра. Часто для оптимізації доступу використовуються вузькі канали, однак в умовах насичених мереж це призводить до субоптимального використання доступної смуги, створюючи додаткові накладні витрати на управління. Застосування MLO дозволяє агрегувати кілька розрізнених частотних каналів, проте у разі, коли

канали не обрані оптимально або некоректно агреговані, виникають проблеми із синхронізацією доступу, що знижує інтегральну продуктивність системи.

Крім того, важливою проблемою є колізії, спричинені асинхронністю лічильників відстрочки backoff на різних інтерфейсах. У багатоканальному пристрої, де кожен лінк оперує власним лічильником для процедури EDCA, відсутня гарантія, що передача на всіх лінках розпочнеться в оптимальний момент часу [52]. Відсутність централізованої синхронізації може призводити до ефекту коли один лінк ініціює передачу даних, не детектуючи, що суміжний лінк у тій самій мережі зайнятий або заблокований через внутрішньосистемні завади. Це провокує зниження сумарної пропускної здатності та неконтрольоване зростання затримок, що є критичним для RTA [53].

Ще одним фактором є обмеження, пов'язані з режимами NSTR. Хоча стандарт IEEE 802.11be декларує підтримку MLO, для пристроїв NSTR DL та UL-передача є фізично неможливою через витік потужності між каналами, що створює бар'єри для максимізації пропускної здатності. Для забезпечення ефективної роботи таких пристроїв необхідні спеціалізовані алгоритми, що враховують вимоги синхронізації моментів початку і завершення передач, а також мінімізацію ймовірності колізій між афілійованими лінками.

З цього випливає що рішення щодо розподілу ресурсів мають прийматися узгоджено для множини лінків, з урахуванням сумісності режимів роботи та взаємного впливу процедур backoff/TXOP на досягну корисну пропускну здатність.

Тобто всі описані вище вимоги обґрунтовують необхідність розробки математичної моделі для відтворюваної оцінки ефектів співіснування та методів розподілу ресурсів для досягнення приросту продуктивності.

### **1.5. Огляд існуючих методів управління радіоресурсами в бездротових локальних мережах**

Як розглянуто вище, екстенсивний приріст фізичної швидкості за рахунок розширення смуги пропускання до 320 МГц та ускладнення схем модуляції до 4096-QAM не гарантує еквівалентного приросту корисної пропускної здатності у реальному середовищі [54]. Це зумовлено тим, що фактична продуктивність мережі визначається ефективністю використання радіоресурсу на рівні MAC, де значну частку часу займають накладні витрати та процедури конкуренції. Аналіз джерел свідчить, що в архітектурі MLO корисність кожного окремого лінка стає функцією від стану всієї багатоканальної системи та змінюється під впливом апаратних обмежень.

Ключовим фактором, що ускладнює управління ресурсами багатоканального пристрою, є внутрішньопристроєва інтерференція. Що виникає через недостатню електромагнітну ізоляцію між радіотрактами одного пристрою, коли потужність випромінювання на одному передавальному інтерфейсі створює "витік енергії" на вхід приймача іншого інтерфейсу. Доведено, що рівень шумів, індукованих власною передачею в суміжному каналі (особливо при малому частотному рознесенні, наприклад, між каналами 5 ГГц і 6 ГГц), може на порядки перевищувати рівень корисного сигналу, що надходить від точки доступу, роблячи одночасний прийом неможливим [29, 30]. При цьому традиційна схема управління, де параметри (канал, ширина, час старту) обираються незалежно для кожного інтерфейсу за локальними метриками (RSSI, Channel Load), системно призводить до субоптимального використання ресурсів і так званої «спектральної неефективності». Механізми уникнення інтерференції змушують пристрій в режимі NSTR утримуватися від передачі на вільних каналах, чекаючи синхронізації з найбільш завантаженим лінком, що в умовах насиченого трафіку може знижувати сумарну пропускну здатність нижче рівня, який міг би забезпечити навіть одноканальний пристрій в ідеальних умовах. А також, ізольована оптимізація лінків ігнорує кореляцію завад та ефекти взаємного блокування [55]. Особливо це проявляється при використанні широких каналів в

яких згідно з правилами доступу, зайнятість первинного 20-МГц підканалу блокує передачу у всій смузі 80, 160 або 320 МГц, навіть якщо інші підканали вільні. Хоча впровадження OFDMA та preamble puncturing у Wi-Fi 7 дозволяє частково вирішити цю задачу через гнучкий розподіл RU, ефективність цих методів безпосередньо залежить від узгодженого планування.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу встановлено необхідність переходу від локальної оптимізації параметрів окремих лінків до узгодженого підходу. У такій постановці багатоканальний пристрій розглядається як єдиний об'єкт керування із внутрішніми стохастичними залежностями, де рішення про початок передачі на одному інтерфейсі приймається з урахуванням стану черг, лічильників backoff та спектральних умов на всіх доступних інтерфейсах MLD.

В багатоканальному пристрої рішення щодо використання частотного ресурсу (вибір частотного діапазону, ширини каналу, конфігурації підканалів та розподілу ресурсних одиниць RU/MRU) та рішення щодо використання часового ресурсу (параметри доступу EDCA, логіка backoff, синхронізація TXOP та вирівнювання PPDU) є взаємозалежними і не можуть обґрунтовано прийматися ізольовано. В умовах реальних обмежень режимів STR/NSTR/EMLSR будь-яка спроба оптимізувати лінки незалежно ігнорує факт появи взаємних блокувань, внутрішньопристроєвих завад та конкуренції за спільні часові можливості передачі. Через це MLO часто не реалізує потенціал агрегування пропускну здатності, а в окремих випадках асиметричного навантаження може навіть погіршувати затримку порівняно з однолінковим режимом.

Отже, існує об'єктивна потреба у розв'язанні задачі спільного керування радіоресурсами MLO, яке забезпечує вибір сумісних спектральних конфігурацій та узгоджену синхронізацію доступу між лінками. Таке управління повинно базуватися на математичній моделі, що враховує матрицю взаємного впливу лінків та апаратні обмеження, щоб максимізація сумарної корисної пропускну здатності та мінімізація затримок досягалася не на рівні окремого радіоінтерфейсу, а на рівні всієї багатоканальної системи MLD.

## 1.6. Постановка задачі дослідження

Виконаний аналіз показав, що у багатоканальному пристрої продуктивність визначається не лише наявністю широких смуг і гнучких частотних механізмів, а тим, чи узгоджені між собою рішення щодо частотної конфігурації та часової доступності передач у межах одного MLD і в оточенні суміжних мереж. Встановлено, що частотний ресурс у Wi-Fi 7 є ієрархічним і керованим на рівні елементів OFDMA, проте в MLO цей ресурс фактично реалізується лише за умови сумісності з режимами STR, NSTR та EMLSR і з процедурою доступу до середовища, яка породжує часові втрати через конкуренцію і взаємні блокування лінків [56]. Отже, локальні рішення, прийняті незалежно для кожного лінка, не забезпечують максимуму сумарної корисності, оскільки ігнорують міжлінкові обмеження, кореляцію завад і необхідність синхронізації доступу.

Тому виникає науково-технічне завдання переходу від незалежного управління каналами до спільного управління радіоресурсами, що формує задачі дослідження:

- Провести аналіз архітектури багатоканального пристрою та мереж стандарту IEEE 802.11be для систематизації факторів, що впливають на ефективність роботи.
- Провести аналіз методів оцінювання стану каналу для багатоканальної роботи.
- Розробити модель, що дозволить проводити оцінку ефективності розподілу трафіку між каналами в багатоканальному пристрої.
- Розробити метод розподілу ресурсів, спрямований на підвищення продуктивності передачі даних для багатоканального пристрою стандарту IEEE 802.11be.
- Експериментально перевірити ефективність запропонованого методу шляхом імітаційного моделювання та порівняти її з існуючими підходами.

Подальша робота спрямована на побудову математичної моделі, розробку методів розподілу радіочастотних ресурсів та експериментальну перевірку

ефективності шляхом імітаційного моделювання з порівнянням із наявними підходами.

### **1.7. Висновки до розділу 1**

Встановлено, що сучасний етап розвитку технологій WLAN характеризується зміною парадигми від екстенсивного нарощування пікових швидкостей до забезпечення детермінованих показників якості обслуговування. Показано, що впровадження фізичних механізмів, таких як розширення смуги до 320 МГц та модуляція 4096-QAM, хоча і збільшує потенційну пропускну здатність, проте не гарантує лінійного приросту корисної швидкості у реальних умовах експлуатації. Обмежувальним фактором виступає ефективність управління ресурсами на рівні MAC, де значну частку часу займають накладні витрати на конкурентний доступ та обслуговування з'єднань.

В результаті систематизації факторів, що впливають на продуктивність MLO, виявлено, що ключові проблеми мають не локальний, а системний характер. Наприклад, незалежне управління окремими радіоінтерфейсами в межах одного MLD є неефективним через явище внутрішньої інтерференції. Це явище накладає обмеження на режими роботи (STR/NSTR), вимагаючи синхронізації моментів початку та завершення передач для уникнення блокування приймальних трактів власним випромінюванням.

Також критичною проблемою є спектральна фрагментація при використанні надшироких каналів, коли локальні вузькосмугові завади можуть блокувати використання всього частотного ресурсу. Існуючі методи доступу, що базуються на незалежних процедурах backoff для кожного лінка, в умовах MLO призводять до ефекту «глухоти», неузгоджених колізій та вимушених простоїв каналів, що нівелює переваги агрегації частот. Аналіз показав, що локальні рішення щодо вибору каналу або моменту передачі, прийняті без урахування стану суміжних лінків MLD, можуть призводити до погіршення інтегральних показників затримки та пропускну здатності порівняно з однолінковими системами.

На підставі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність переходу від незалежного управління окремими інтерфейсами до методики спільного

розподілу радіоресурсів, тому наукова проблема полягає у відсутності математичних моделей та методів, які б враховували матрицю взаємного впливу лінків, апаратні обмеження режимів MLO та специфіку багатоканального доступу.



## **РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ**

### **2.1. Класифікація метрик оцінювання стану частотного каналу в бездротових мережах стандарту IEEE 802.11**

У мережах стандарту IEEE 802.11be керування ресурсами вимагає прийняття рішень у просторі з накладеними частотними, часовими та топологічними обмеженнями. Це включає вибір смуги частоти, визначення моментів доступу до середовища та оцінку можливості передачі для конкретної пари вузлів. Для таких рішень необхідна оцінка стану каналу, проте відповідні метрики не мають однозначного змісту, оскільки можуть стосуватися різних аспектів поняття «канал», що робить їх коректне зіставлення неможливим.

Тому оцінювання стану каналу повинно спиратися на метрики, які однозначно прив'язані до механізму спостереження (регуляторні та апаратні обмеження, процедури PHY/MAC-оцінювання середовища, статистика передавання на лінку). Доцільно не зводити різноманітні спостереження в один показник, а впорядкувати метрики за тим, що саме вони описують. Це забезпечує коректну інтерпретацію вимірювань і відокремлює частотні обмеження від локальної зайнятості середовища та від властивостей конкретного з'єднання між пристроями. Відповідно, пропонується класифікація метрик оцінювання стану каналу за об'єктом оцінювання, зокрема за частотним ресурсом, станом середовища доступу та якістю радіолінки (Рис.2.1).



Рис.2.1 Класифікація метрик оцінки стану каналу

При класифікації каналу як виділеної смуги частот канал розглядається як дискретна ділянка частотного діапазону, яка описується центральною частотою, шириною смуги та набором регуляторних і апаратних обмежень (наприклад, процедури DFS та вимоги до керування потужністю для частини каналів у діапазоні 5 ГГц). Результатом оцінювання на цьому рівні є формування множини дозволених для використання каналів, серед яких надалі здійснюється пошук найкращого варіанту. Важливо зазначити, що включення каналу до цієї множини не є показником якості передачі даних, а лише визначає допустиму множину варіантів для алгоритмів вищих рівнів.

При класифікації каналу як спільному ресурсі у заданій точці простору, доступ до якого регламентований у часі, де канал розглядається не за наявності частотної смуги, а на фізичній можливості отримати доступ до радіоресурсу в умовах конкурентного використання, яку визначають механізми MAC-рівня та процедура оцінки вільного каналу (CCA). У спрощеному вигляді CCA класифікує стан середовища як «зайнято» (busy) або «вільно» (idle) [57]. Статистична обробка цих станів за інтервал спостереження  $T$  дозволяє отримати міру зайнятості каналу:

$$\eta = \frac{T_{\text{busy}}}{T} \quad (2.1)$$

де  $T_{\text{busy}}$  - сумарний час, коли канал визначений як зайнятий.

Ця величина кількісно описує інтенсивність конкуренції за право передачі з погляду конкретного вузла. Вона не розрізняє, чи викликана зайнятість кадрами сусідніх BSS, внутрішньосистемною інтерференцією або випромінюванням джерел, що не належать до стандарту 802.11, проте вона прямо пов'язана з ймовірністю затримок у процедурі CSMA/CA. Алгоритми класу LCCS (Least Congested Channel Selection) спрямовані на мінімізацію  $\eta$ , тобто на вибір каналу з найменшим часом очікування доступу.

При класифікації каналу як радіолінк між конкретною парою передавач - приймач (AP - STA) оцінювання спрямоване не на стан радіоресурсу, а на якість поширення сигналу для заданої просторової конфігурації. Використовуються метрики фізичного рівня, зокрема RSSI (Received Signal Strength Indicator) та SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio), а також похідні оцінки на основі CSI (Channel State Information) [58, 59]. На відміну від  $\eta$ , ці параметри визначають максимальну теоретичну пропускну здатність через вибір схеми модуляції та кодування (MCS), але самі по собі не гарантують високий рівень успішного отримання доступу до середовища.

## **2.2. Аналіз методів оцінки і вибору каналу в корпоративних системах керування бездротовим доступом**

Метрики, засновані на якості сигналу, формуються на фізичному рівні через оцінку енергетичних параметрів прийнятого сигналу [60]. Базовою є RSSI, яка відображає середню прийняту потужність у заданій смузі. Для OFDMA-систем її коректно подавати як оцінку сумарної потужності на піднесучих. Узагальнено це можна записати виразом:

$$\text{RSSI} = k \cdot \sum_{i=1}^N |y_i|^2 \quad (2.2)$$

де  $y_i$  - комплексні значення прийнятих символів на  $i$ -й піднесучій, а  $k$  - калібрувальна константа приймача. Більш інформативною метрикою є SINR, яку можна представити як:

$$\text{SINR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{interference}} + P_{\text{noise}}} \quad (2.3)$$

де  $P_{\text{signal}}$  оцінюється під час прийому преамбули кадру, а сума завад і шуму визначається як фоновий рівень у періоди відсутності корисного сигналу. Ці величини безпосередньо пов'язані з досяжними MCS та ефективною швидкістю на фізичному рівні.

Метрики, засновані на оцінці завад, кількісно характеризують вплив сторонніх передавачів або джерел завад. Наприклад, середня потужність інтерференції в каналі за інтервал спостереження (за умови вимірювання в періоди неактивності власного передавача):

$$I_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N P_{\text{interf}}(t) \quad (2.4)$$

На практиці в контрольованих мережах це часто інтерпретується як рівень шуму або як індекси, що об'єднують сусідньоканальні завади. Також використовуються дискретні індикатори на основі сканування кадрів управління (наприклад, кількість унікальних BSS як наближена оцінка щільності мереж) та спектральні індикатори.

Метрики, засновані на завантаженні радіоресурсів, оцінюють рівень конкуренції за ресурс. Класичним показником є коефіцієнт зайнятості  $\eta$  на основі ССА. Розширені варіанти включають утилізацію ефірного часу та лічильники активності сусідніх мереж. Для стандартів Wi-Fi 6/7 доступні деталізовані статистики розподілу ресурсних блоків OFDMA, проте як універсальна метрика сканування це застосовне переважно за наявності централізованої телеметрії.

Метрики якості обслуговування формуються на MAC-рівні на основі статистики передачі даних, наприклад коефіцієнт втрат кадрів (Frame Loss Ratio, FLR)

$$\text{FLR} = \frac{N_{\text{lost}}}{N_{\text{total}}} \quad (2.5)$$

частота повторних передач (Retry Rate)

$$\text{Retry Rate} = \frac{N_{\text{retry}}}{N_{\text{total}}} \quad (2.6)$$

а також середня затримка доставки кадру [61]. Дані метрики враховують вплив завад, конкуренції та параметрів фізичного рівня, проте вони мають затримку реакції та оцінюються лише за наявності достатнього обсягу трафіку.

Інтегровані метрики комбінують кілька різномірних показників у єдину скалярну оцінку:

$$M_{\text{composite}} = f(m_1, m_2, \dots, m_k) \quad (2.7)$$

де  $f$  задає правило агрегації. У практичних реалізаціях найчастіше використовуються нормалізація та зважені лінійні комбінації:

$$M = \sum_{i=1}^k w_i \cdot \tilde{m}_i \quad (2.8)$$

де  $\tilde{m}_i$  означає нормалізоване значення  $i$ -ї метрики. Ключовою складністю є вибір вагових коефіцієнтів  $w_i$ , який може здійснюватися емпірично або адаптивно.

У підсумку, наведена класифікація є достатньою для задач вибору оптимального каналу, охоплюючи метрики лінка, завад, завантаження та результативності. Це розрізнення є основою для аналізу реалізації алгоритмів у провідних виробників обладнання, які поєднують різні класи метрик на різних рівнях прийняття рішень.

Для ілюстрації параметрів, що використовуються під час оцінювання стану каналу, наведено інтерфейс інструмента діагностики з обладнання MikroTik «Wireless Snooper» (Рис.2.2). Де відображено поточне радіооточення в зоні роботи точки доступу за сукупністю спостережуваних характеристик, серед яких: частотна належність каналу, завантаженість середовища (Of Traf. %), наявність активних мереж і клієнтських станцій, а також рівень прийнятого сигналу.

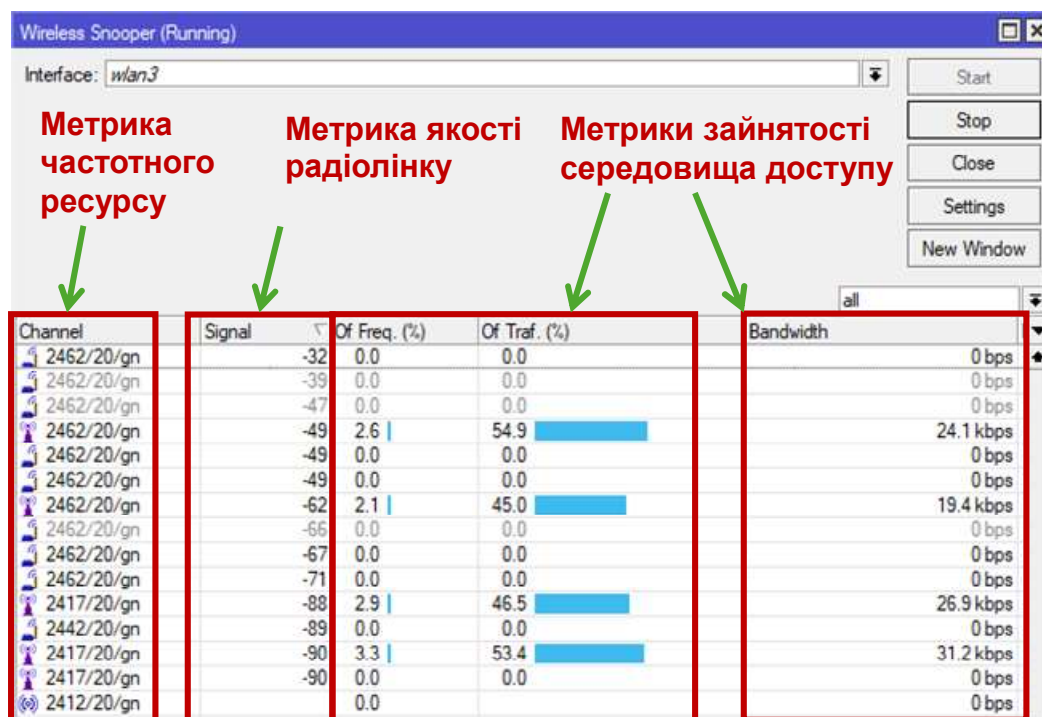


Рис.2.2 Параметри оцінки стану каналу інструментом Wireless Snooper (MikroTik)

У корпоративних системах алгоритми оцінки та вибору каналів зазвичай реалізовані як закриті пропрієтарні механізми, проте аналіз технічної документації дозволяє виділити характерні підходи.

Для HPE Aruba (Aruba Networks) характерною є технологія Adaptive Radio Management (ARM) [62, 63]. Точки доступу збирають радіочастотні метрики, на основі яких обчислюються показники покриття та інтерференції для кожного доступного каналу, що є основою для вибору оптимального каналу та рівня потужності передачі.

У рішеннях Cisco застосовується концепція Radio Resource Management (RRM) з алгоритмом Dynamic Channel Assignment [64]. Рішення приймається централізовано на рівні RF-групи. Використовується метрика вартості, яка є функцією від рівня інтерференції, шуму та порогової чутливості, а також може враховувати навантаження на мережу. Для ідентифікації джерел завад, що не належать до Wi-Fi, використовується технологія спектрального аналізу CleanAir [65].

Виробник Ruckus (CommScope) використовує підхід ChannelFly, орієнтований на оцінку ємності каналів [66, 67]. Точки доступу виконують періодичний моніторинг каналів, оцінюють потенційну продуктивність на основі історичних даних та перемикаються на інший канал, якщо прогнозується суттєве покращення пропускної здатності. Фонове сканування також враховує наявність сусідніх мереж.

У системі Ubiquiti (UniFi) реалізовано інструмент Channel AI у складі контролера UniFi Network Application [68]. Він аналізує радіооточення та формує рекомендації щодо оптимального частотного плану для всієї мережі, з метою мінімізації переривання обслуговування клієнтів під час зміни конфігурації.

Узагальнена порівняльна характеристика розглянутих підходів наведена в (Табл. 2.1).

Табл. 2.1 Порівняльна характеристика технічних підходів до автоматичного вибору каналу

Виробник / Технологія	Ключові метрики оцінки	Архітектура управління	Особливості реалізації
HPE Aruba ARM	Метрики покриття та інтерференції (похідні від SNR/Noise)	Гібридна: збір метрик на AP, застосування політик локально або централізовано	Оптимізація пари канал/потужність на основі інтегрованих індексів
Cisco RRM / DCA	Метрика вартості: інтерференція + шум + поріг чутливості (+ навантаження)	Централізована на рівні RF-групи	Оптимізація плану каналів для групи AP, мінімізація метрики вартості
Ruckus ChannelFly	Оцінка ємності (capacity-based) + фонові індикатори зайнятості	Децентралізована на рівні AP (з можливістю політик контролера)	Статистичний аналіз ємності, використання історичних даних, фонове зондування
Ubiquiti UniFi Channel AI	Аналіз середовища + рекомендації для мережі	Централізована через UniFi Controller	Формування глобальних рекомендацій для всіх AP у розгортанні

Аналіз даних таблиці свідчить про різну розстановку акцентів між оцінкою завад, якості лінка та кінцевої продуктивності. Проте незалежно від специфіки метрик, вони слугують вхідними даними для процедур управління спектром.

Базовим рівнем є вибір каналу для окремої точки доступу. Це локальна оптимізаційна задача:

$$c^* = \underset{c \in C}{\operatorname{argmin}} F(c) \quad (2.9)$$

де цільова функція  $F(c)$  залежить від обраних критеріїв. Таке рішення приймається ізольовано і може бути ефективним у розріджених мережах, однак у щільних розгортаннях часто призводить до субоптимальних станів через ігнорування взаємного впливу вузлів.

Наступним рівнем є призначення каналів для групи вузлів. Оптимізується вектор каналів  $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  для  $n$  точок доступу з метою максимізації глобальної цільової функції мережі. На цьому рівні працюють централізовані архітектури, де контролер може оцінити матрицю взаємних завад і сформувати узгоджений частотний план.

Третій рівень передбачає динамічну адаптацію у часі. Цей механізм відповідає за корекцію конфігурації у відповідь на зміни середовища. Критичним аспектом є баланс між чутливістю системи та її стабільністю для уникнення частих перемикань. Для цього застосовуються механізми гістерезису та часові обмеження на повторну зміну каналу.

### **2.3. Формалізація задачі вибору каналу в однолінкових мережах та її обмеження**

У класичному випадку однолінкової роботи пристрій у кожен момент часу використовує лише один канал із множини доступних у певному діапазоні. Позначимо через  $C$  множину таких каналів, а через  $T_{\text{obs}}$  - інтервал спостереження, протягом якого накопичується статистика. Для кожного каналу  $c \in C$  формуються кількісні оцінки стану радіоресурсу і якості лінка, на основі яких далі приймається рішення про вибір каналу [12].



У загальному вигляді задачу вибору каналу в SLD можна сформулювати як пошук  $c^* = \operatorname{argmax}_{c \in \mathcal{C}} Q(c)$ , де  $Q(c)$  - скалярна функція якості, що узагальнює результати вимірювань для каналу  $c$ . Різноманіття існуючих методів полягає у тому, які саме характеристики радіосередовища включаються до  $Q(c)$  і яким чином вони агрегуються [69]. Для цього використаємо наступні характеристики у вигляді величин, які можуть бути виміряні безпосередньо у процесі сканування:

$\rho(c)$  - частка часу, протягом якого канал перебуває у зайнятому стані;

$I(c)$  - агрегована потужність інтерференції/шуму у каналі (виміряна або оцінена на основі спостережуваних передавачів та перекриття);

$S(c)$  - показник якості корисного лінка, наприклад усереднене SINR або прогнозована фізична швидкість.

У даному класі підходів канал розглядається як часовий ресурс, за який конкурують кілька передавачів, що використовують механізм CSMA/CA. У цьому випадку основною метрикою є частка часу, протягом якого фізичний рівень детектує активність у каналі [70]:

$$\rho(c) = \frac{1}{T_{\text{obs}}} \int_0^{T_{\text{obs}}} \mathbb{1}_{\text{busy}}(t, c) dt, \quad (2.10)$$

де  $\mathbb{1}_{\text{busy}}(t, c) = 1$ , якщо у момент  $t$  канал  $c$  визначено як зайнятий (наприклад, за CCA), і  $\mathbb{1}_{\text{busy}}(t, c) = 0$  інакше. Величина  $\rho(c)$  безпосередньо пов'язана з імовірністю того, що станція зможе ініціювати передачу без додаткових відстрочок, а отже, з очікуваною затримкою доступу до середовища (у наближеному сенсі, без деталізації впливу backoff/NAV). У практичних реалізаціях вимірювання  $\rho(c)$  здійснюється на основі CCA-перевірок, які виконуються під час пасивного сканування каналів [71]. Найпростіший варіант функції якості ґрунтується лише на цій характеристиці:  $Q_{\text{air}}(c) = 1 - \rho(c)$ .

У випадку де канал розглядається як середовище поширення сигналу між AP і STA ключовою характеристикою є швидкість яку можна досягти за рахунок поточних умов поширення та співвідношення SINR. Для каналу  $c$  відповідна величина усереднюється за інтервал спостереження:

$$S(c) = \frac{1}{T_{\text{obs}}} \int_0^{T_{\text{obs}}} \text{SINR}(t, c) dt, \quad (2.11)$$

де  $\text{SINR}(t, c)$  розглядається у лінійній шкалі (або ж відповідне перетворення, виражене у дБ). На основі  $S(c)$  формується функція якості  $Q_{\text{link}}(c) = S(c)$ , або ж використовується прогнозована фізична швидкість, що випливає з таблиць відповідності між SINR і схемами модуляції та кодування [14]. У більш складних системах використовується метрика CSI, яка описує частотно-селективні властивості каналу на піднесучих OFDMA і дозволяє оцінити потенційну пропускну здатність з урахуванням багатопроменевого поширення. Такі підходи особливо ефективні у середовищах, де основним обмежувальним фактором є загасання сигналу або селективність каналу, однак вони можуть приводити до вибору каналів, що на практиці виявляються перевантаженими трафіком.

Тут канал розглядається не ізольовано, а в контексті всієї мережі, у якій одночасно працює кілька точок доступу та клієнтів. У цьому випадку основну роль відіграє сумарний рівень завад [72], створюваних сусідніми передавачами, що можна описати як:

$$I(c) = \sum_{j \in \mathcal{N}} P_j g_j(c), \quad (2.12)$$

де  $\mathcal{N}$  - множина вузлів, що створюють завади у каналу  $c$ ,  $P_j$  - їх потужності, а  $g_j(c)$  - ефективні коефіцієнти загасання/впливу (що можуть включати відстань, згасання, положення приймача, а також фактор спектрального перекриття з каналом  $c$  [73]). На практиці  $I(c)$  також може оцінюватися безпосередньо з вимірювань енергетичного рівня/шумової підлоги у каналі. Функція якості при цьому може задаватися як  $Q_{\text{int}}(c) = -I(c)$ , тобто перевага надається каналам із мінімальним сумарним рівнем інтерференції. У графових моделях мережа подається у вигляді графа, де ваги ребер відображають рівні взаємних завад між вузлами для конкретних каналів [74], що дозволяє формалізувати задачу вибору каналів як задачу оптимізації на графі.

## 2.4. Опис спектральної конфігурації багатоканального пристрою

У пристроях Wi-Fi 7 покоління, як зазначалось, кожен радіоінтерфейс має власний набір доступних каналів і регуляторні обмеження щодо ширини смуги,

використання DFS та максимальної потужності передачі. Така архітектура ускладнює задачу вибору каналу, оскільки рішення повинні ухвалюватись не для одного каналу, а окремо для кожного радіоінтерфейсу. У Wi-Fi 7 ця складність зростає за рахунок запровадження MLO. Це означає, що вибір каналів перестає бути набором незалежних локальних рішень і перетворюється на задачу оптимізації конфігурації спектру для всього багатоканального пристрою.

Кожен діапазон  $b \in \{2,4,5,6\}$  ГГц характеризується власною множиною доступних каналів  $\mathcal{C}_b$ . Крім вибору номера каналу, сучасні системи підтримують різну ширину смуги - 20, 40, 80, 160 і до 320 МГц у діапазоні 6 ГГц. Широки канали формуються шляхом об'єднання кількох 20-МГц підканалів, що можна формально представити як множину  $W(c) \subseteq \mathcal{C}_b$ , де  $W(c)$  - набір підканалів, що утворюють широкосмуговий канал, позначений номером  $c$ . У реальних умовах частина підканалів може бути недоступною через присутність сторонніх систем або регуляторні вимоги, що призводить до використання механізмів, наприклад відсікання преамбули, які дозволяють обмежувати використання частини спектру. У такому випадку ефективна ширина смуги визначається як:

$$B_{\text{eff}}(c) = |W(c)| \cdot 20 \text{ МГц} - B_{\text{punct}}(c), \quad (2.13)$$

де  $B_{\text{punct}}(c)$  - сумарна ширина вилучених підканалів.

Таким чином, навіть для одного радіоінтерфейсу простір можливих рішень включає не лише вибір номера каналу, а й вибір ширини смуги та допустимої підмножини підканалів.

Нехай багатоканальний пристрій використовує множину активних лінків  $\mathcal{L}$ . У загальному випадку  $\mathcal{L}$  може бути як фіксованою (наперед задана кількість активних лінків), так і змінною (допускається вмикання/вимикання лінків у межах MLO залежно від умов). Кожен лінк  $\ell \in \mathcal{L}$  характеризується трійкою  $\ell = (b_\ell, c_\ell, W_\ell)$ , що задає діапазон, номер каналу та набір підканалів.

Для кожного лінка може бути визначена очікувана корисна пропускна здатність  $T_\ell$ , яка залежить від стану та зайнятості каналу [75]:

$$T_\ell = (1 - \rho(c_\ell)) B_{\text{eff}}(c_\ell) \eta_\ell, \quad (2.14)$$

де  $\rho(c_\ell)$  - частка зайнятого часу,

$B_{\text{eff}}(c_\ell)$  - ефективна ширина смуги,

$\eta_\ell$  - спектральна ефективність, що визначається SINR (та відповідною MCS) і може включати узагальнені RHY/MAC накладні витрати у вигляді поправочного множника.

У найпростішому випадку сумарна продуктивність багатоканальної передачі може бути подана як:

$$T_{\text{MLO}} = \sum_{\ell \in \mathcal{L}} T_\ell, \quad (2.15)$$

однак на практиці вона може бути обмежена спільними ресурсами, буферизацією, асиметрією каналів або кореляцією завад між лінками.

У порівнянні з однолінковим випадком, де рішення зводилось до вибору одного каналу  $c \in \mathcal{C}$ , у багатоканальній мережі з MLO необхідно обирати конфігурацію  $l = (\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_{|\mathcal{L}|})$ , де кожен компонент відповідає одному активному лінку. Розмір простору таких конфігурацій зростає комбінаційно:

$$|\Omega| = \prod_{\ell \in \mathcal{L}} |\mathcal{C}_{b_\ell}| \cdot |\mathcal{W}_{b_\ell}|, \quad (2.16)$$

де  $\mathcal{W}_{b_\ell}$  - множина допустимих варіантів об'єднання підканалів у відповідному діапазоні.

Якщо  $\mathcal{L}$  не фіксована, то  $\Omega$  також включає варіанти вибору підмножини активних лінків і апаратні/регуляторні обмеження.

Це означає, що навіть у помірно щільних сценаріях повний перебір можливих конфігурацій стає відносно складним у обчисленні, а отже практичні алгоритми повинні спиратись на ефективні евристичні [76] та узагальнені метрики якості.

## 2.5. Вплив міжлінкових залежностей на ефективну пропускну здатність

Попередньо було показано, що у класичних WLAN оцінювання стану каналу здійснюється на основі однієї з трьох величин. Вибір каналу у таких системах формально зводиться до максимізації відповідної функції якості  $Q(c)$ . Також було показано, що у багатоканальних мережах з MLO рішення повинно прийматися не для одного каналу, а для конфігурації  $l$ , що визначає набір активних лінків. У цьому підрозділі показується, що безпосереднє узагальнення

класичних підходів, коли для кожного лінка  $\ell$  незалежно обирається канал  $c_\ell^*$  за локальним критерієм, не гарантує максимізації сумарної продуктивності  $T_{\text{MLO}}$ .

Розглянемо випадок, коли для кожного лінка  $\ell$  канал обирається за критерієм мінімізації зайнятості:

$$c_\ell^* = \arg\max_{c \in \mathcal{C}_{b_\ell}} (1 - \rho(c)), \quad (2.17)$$

Аналогічно можуть застосовуватися критерії мінімізації інтерференції або максимізації якості лінка:

$$c_\ell^* = \arg\max_{c \in \mathcal{C}_{b_\ell}} (-I(c)), \quad (2.18)$$

$$c_\ell^* = \arg\max_{c \in \mathcal{C}_{b_\ell}} S(c). \quad (2.19)$$

Які мають спільну властивість формувати рішення для кожного лінка окремо, не враховуючи того, як обрані канали взаємодіють між собою у межах багатоканальної передачі.

Нехай пристрій використовує два лінки  $\ell_1$  і  $\ell_2$ , для кожного з яких доступні два можливі канали  $c_a$  і  $c_b$ . Припустимо, що за результатами вимірювань маємо  $\rho(c_a) < \rho(c_b)$ ,  $S(c_a) > S(c_b)$ , тобто канал  $c_a$  локально виглядає кращим за обома критеріями. Тоді незалежний вибір каналу приведе до конфігурації:

$$l_{\text{ind}} = (c_a, c_a). \quad (2.20)$$

Оцінимо сумарну продуктивність для цієї конфігурації за формулою:

$$T_{\text{MLO}} = T_{\ell_1} + T_{\ell_2}. \quad (2.21)$$

Однак припустимо, що при одночасному використанні одного й того самого спектрального ресурсу (наприклад, двох лінків у межах одного діапазону) або за наявності корельованих завад/спільних ресурсних обмежень ефективна зайнятість радіоресурсу зростає, так що для конфігурації  $l_{\text{ind}} = (c_a, c_a)$  фактичні значення  $\rho$  для обох лінків збільшуються:

$$\rho(c_a) \rightarrow \rho(c_a) + \Delta, \quad \Delta > 0. \quad (2.22)$$

Тоді продуктивність кожного лінка зменшується [77]:

$$T_\ell = (1 - \rho(c_a) - \Delta) B_{\text{eff}}(c_a) \eta_\ell. \quad (2.23)$$

Розглянемо альтернативну конфігурацію

$$l_{alt} = (c_a, c_b), \quad (2.24)$$

для якої припустимо, що додаткове збільшення зайнятості не відбувається, а тому

$$T_{\ell_1} = (1 - \rho(c_a)) B_{\text{eff}}(c_a) \eta_{\ell_1}, \quad (2.25)$$

$$T_{\ell_2} = (1 - \rho(c_b)) B_{\text{eff}}(c_b) \eta_{\ell_2}. \quad (2.26)$$

За певних значень параметрів може виконуватись

$$T_{\text{MLO}}(l_{alt}) > T_{\text{MLO}}(l_{ind}), \quad (2.27)$$

попри те, що локально канал  $c_a$  був кращим для кожного лінка окремо. Це означає, що незалежна оптимізація не гарантує знаходження глобального максимуму.

## 2.6. Постановка задачі глобальної оптимізації спектральної конфігурації для MLO

У загальному випадку задача вибору конфігурації каналів у MLO формулюється як:

$$l^* = \operatorname{argmax}_{l \in \Omega} T_{\text{MLO}}(l), \quad (2.28)$$

де  $\Omega$  - множина допустимих комбінацій каналів.

Якщо при цьому для кожного лінка застосовується локальна функція якості  $Q(c)$ , що залежить лише від  $\rho(c), I(c), S(c)$ , то загальна задача зводиться до набору незалежних оптимізацій, що еквівалентно припущенню про відсутність взаємодії між лінками. Проте у реальних мережах таке припущення не виконується через спільне використання радіоресурсу, взаємні завади та необхідність балансування трафіку між лінками [45].

Невідповідність між локальними критеріями і глобальною цільовою функцією обґрунтовує необхідність розроблення інтегрованої методики оцінювання, яка має формувати оцінку не для окремого каналу, а для всієї конфігурації каналів.

У подальшому підході принципово змінюється об'єкт оптимізації порівняно з класичними методами вибору каналу. Якщо для SLD оцінювання здійснюється для окремого частотного каналу  $c \in \mathcal{C}$ , то в MLD об'єктом розгляду стає

спектральна конфігурація багатоканального пристрою, яка визначається вектором  $l = (\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_{|\mathcal{L}|})$ , де кожен компонент  $\ell_k$  задає конкретний лінк разом із вибором діапазону, каналу та набору підканалів. Відповідно, результатом роботи методики є не ранжування окремих каналів, а формування скалярної узагальненої оцінки якості всієї конфігурації  $Q_{\text{cfg}}(l)$ , яка відображає очікувану ефективність багатоканальної передачі з урахуванням часової зайнятості радіоресурсу, рівнів інтерференції та якості кожного з лінків, а також їхньої взаємодії в межах спільної сесії. Таким чином, задача вибору каналів у багатоканальній мережі формулюється не як сукупність незалежних локальних оптимізацій виду  $c^* = \operatorname{argmax} Q(c)$ , а як задача глобальної оптимізації у просторі допустимих спектральних конфігурацій:

$$l^* = \operatorname{argmax}_{l \in \Omega} Q_{\text{cfg}}(l), \quad (2.29)$$

де  $\Omega$  - множина конфігурацій, що задовольняють регуляторним та апаратним обмеженням.

## 2.7. Метод оцінювання спектральної конфігурації багатоканального пристрою

Виходячи з наведеної у попередньому підрозділі постановки задачі, пропонується перехід від оцінювання окремих каналів до формування узагальненої метрики якості всієї спектральної конфігурації багатоканального пристрою. Така конфігурація описується вектором  $l = (\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_{|\mathcal{L}|})$ , де кожен компонент відповідає одному активному лінку та включає вибір діапазону, номера каналу і набору підканалів. Метою методики є побудова скалярної функції  $Q_{\text{cfg}}(l)$ , яка відображає очікувану ефективність багатоканальної передачі для заданої конфігурації з урахуванням як локальних характеристик кожного лінка, так і їхньої взаємодії.

Побудова узагальненої метрики якості спектральної конфігурації багатоканального пристрою повинна виходити з фізичних властивостей радіоканалу та принципів доступу до середовища, закладених у стандартах IEEE 802.11. Зокрема, ефективна пропускна здатність лінка визначається не лише

умовами поширення сигналу, а й можливістю отримати доступ до радіоресурсу в умовах конкуренції з іншими передавачами та рівнем взаємних завад. Це означає, що будь-яка скалярна оцінка конфігурації, яка претендує на використання як цільова функція оптимізації, має відображати щонайменше три групи факторів [78]:

1. Часову доступність радіоресурсу. Навіть за високого відношення сигналу до шуму (SINR) реальна корисна швидкість може бути низькою, якщо передавач більшу частину часу перебуває у стані очікування через зайнятість каналу. Саме тому величина  $\rho(c)$ , що характеризує частку зайнятого часу, безпосередньо входить у вираз для очікуваної пропускну здатності кожного лінка і не може бути проігнорована без втрати адекватності моделі.

2. Якість радіолінка. За однакової зайнятості радіоресурсу різні канали можуть забезпечувати суттєво різні фізичні швидкості через відмінності у загасанні сигналу. Величина  $S(c)$ , що узагальнює SINR або оцінку PHY-швидкості на основі CSI, відображає саме цей аспект і визначає верхню межу досяжної продуктивності лінка.

3. Інтерференцію з боку сусідніх передавачів. У щільних розгортаннях завади визначають не лише миттєве значення SINR, а й характер доступу до середовища, кількість повторних передавань і втрати пакетів. Величина  $I(c)$ , яка агрегує внески сусідніх вузлів або оцінюється з вимірювань енергії у каналі, відображає просторову структуру мережі та спектральні перекриття каналів, а тому є необхідною складовою будь-якої метрики, що претендує на застосування в реалістичних сценаріях. Крім локальних характеристик окремих лінків, у багатоканальних мережах з MLO принципового значення набувають міжлінкові ефекти. Розподіл трафіку між лінками, кореляція завад у різних діапазонах та спільні обмеження на апаратні ресурси означають, що сумарна продуктивність  $T_{\text{MLO}}$  не є простою сумою ізольованих можливостей окремих каналів. Саме тому інтегрована метрика повинна бути визначена не лише як функція окремих  $q_\ell$ , а як функція всієї конфігурації  $\mathbf{l}$ , що враховує їхню взаємодію. Таким чином,



вимоги до інтегрованої метрики безпосередньо впливають із фізичної моделі радіоканалу та механізмів МАС-рівня.

Також, відповідно до наведених вище факторів, інтегрована метрика повинна задовольняти кілька базових вимог.

1. Має враховувати часову доступність радіоресурсу на кожному з лінків через величини  $\rho(c_\ell)$ .

2. Повинна включати оцінку якості радіолінка  $S(c_\ell)$ , що відображає потенційну швидкість передавання.

3. Необхідно враховувати рівень інтерференції  $I(c_\ell)$ , обумовлений роботою сусідніх вузлів або вимірним рівнем енергії у каналі.

4. Враховувати міжлінкові ефекти, зокрема перерозподіл трафіку між лінками та кореляцію завад/спільні ресурсні обмеження.

Для кожного лінка  $\ell$  вводиться локальний показник якості

$$q_\ell = F(\rho(c_\ell), I(c_\ell), S(c_\ell)), \quad (2.30)$$

де функція  $F(\cdot)$  поєднує три базові характеристики в одну числову оцінку.

На рівні всієї конфігурації формується агрегована метрика

$$Q_{\text{cfg}}(l) = G(q_{\ell_1}, q_{\ell_2}, \dots, q_{\ell_{|L|}}), \quad (2.31)$$

де  $G(\cdot)$  - функція агрегування, що відображає спосіб спільного використання лінків у межах MLO-передачі.

Оскільки величини  $\rho(c)$ ,  $I(c)$ ,  $S(c)$  мають різні фізичні розмірності і масштаби, перед об'єднанням вони підлягають нормалізації [79]. Для кожного параметра вводиться відображення у безрозмірний інтервал:

$$\tilde{\rho}(c) \in [0,1], \quad \tilde{I}(c) \in [0,1], \quad \tilde{S}(c) \in [0,1], \quad (2.32)$$

де  $\tilde{x}(c)$  є безрозмірним нормалізованим значенням, а інтерпретація “краще/гірше” для різних метрик враховується під час побудови  $q_\ell$  (зокрема, для метрик типу “менше - краще” використовується інверсія). Зокрема, може використовуватися мін - макс нормалізація:

$$\tilde{x}(c) = \frac{x(c) - \min_{c' \in \mathcal{C}} x(c')}{\max_{c' \in \mathcal{C}} x(c') - \min_{c' \in \mathcal{C}} x(c')}, \quad x \in \{\rho, I, S\}, \quad (2.33)$$

Після цього локальна метрика для лінка може бути подана у вигляді зваженої комбінації:

$$q_\ell = w_\rho(1 - \tilde{\rho}(c_\ell)) + w_I(1 - \tilde{I}(c_\ell)) + w_S\tilde{S}(c_\ell), \quad (2.34)$$

де коефіцієнти  $w_\rho$ ,  $w_I$  та  $w_S$  визначають відносну важливість відповідних факторів (типово  $w_\rho + w_I + w_S = 1$ ).

Ця форма безпосередньо узагальнює класичні підходи в яких при виборі лише одного ненульового коефіцієнта вона вироджується у методи типу LCCS, RSSI-орієнтовані або interference-based схеми.

На відміну від однолінкового випадку, у багатоканальних мережах локальні показники  $q_\ell$  не можуть просто підсумовуватись без урахування взаємодії між лінками. У найпростішому варіанті агрегування може бути адитивним:

$$Q_{\text{cfg}}(\mathbf{l}) = \sum_{\ell \in \mathcal{L}} q_\ell, \quad (2.35)$$

що відповідає припущенню про незалежність лінків, однак для коректного відображення функціонування багатоканальної передачі необхідно введення штрафні функції, які враховують взаємний вплив лінків:

$$Q_{\text{cfg}}(\mathbf{l}) = \sum_{\ell \in \mathcal{L}} q_\ell - \sum_{i < j} \Psi(\ell_i, \ell_j), \quad (2.36)$$

де  $\Psi(\ell_i, \ell_j)$  - штрафна функція, що відображає взаємний вплив лінків, наприклад через корельовані завади, конкуренцію за спільні ресурси або інші міжлінкові обмеження.

Для перевірки змістовної коректності інтегрованої оцінки конфігурації проведемо імітаційне моделювання дволінкової системи зі спільним доступом до середовища. В якій при зростанні навантаження посилюється міжлінкова взаємодія, зростають супровідні втрати продуктивності, а інтегрована оцінка конфігурації відображає зміну реальної сумарної пропускної здатності. На Рис.2.3 наведено залежність інтегрованої оцінки конфігурації та реальної сумарної пропускної здатності від інтенсивності вхідного трафіку. На Рис.2.4 показано зв'язок між інтегрованою оцінкою конфігурації та реальною сумарною пропускною здатністю. На Рис.2.5 наведено залежності штрафу міжлінкової

взаємодії, частоти колізій і середньої затримки від інтенсивності вхідного трафіку.

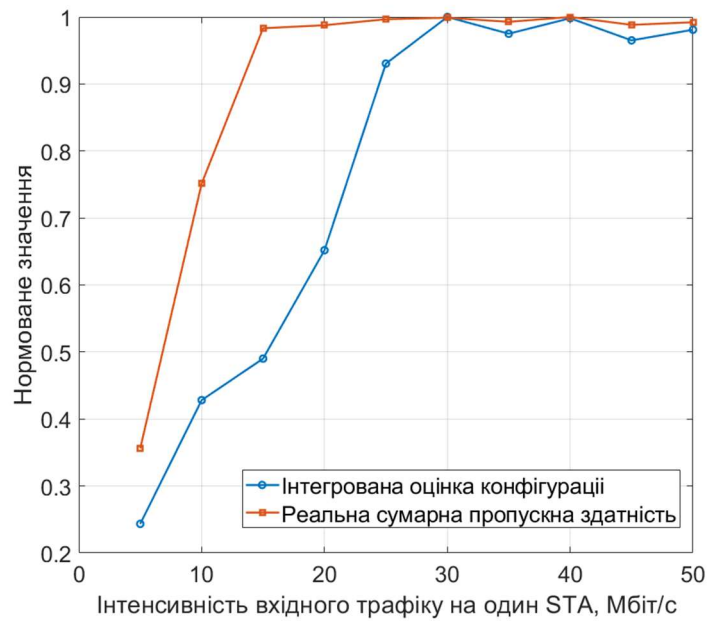


Рис.2.3 Порівняння інтегрованої оцінки конфігурації та реальної сумарної пропускної здатності

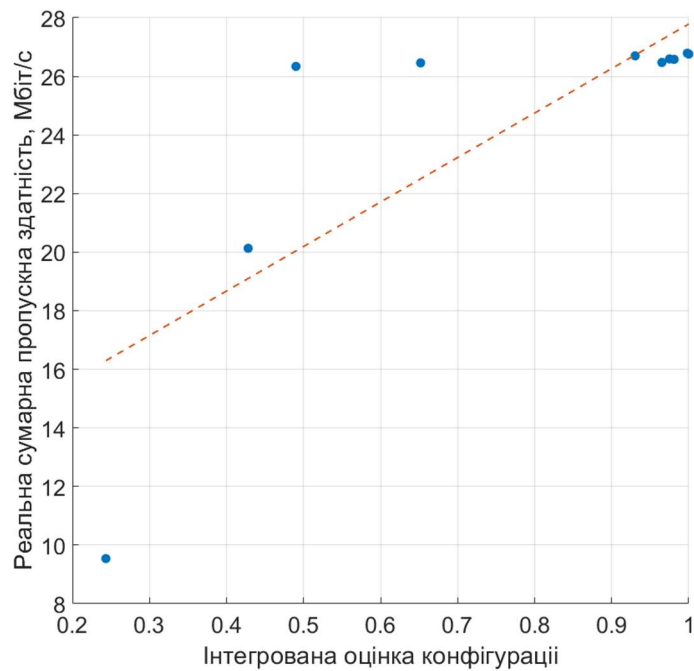


Рис.2.4 Зв'язок між інтегрованою оцінкою конфігурації та реальною сумарною пропускну здатністю

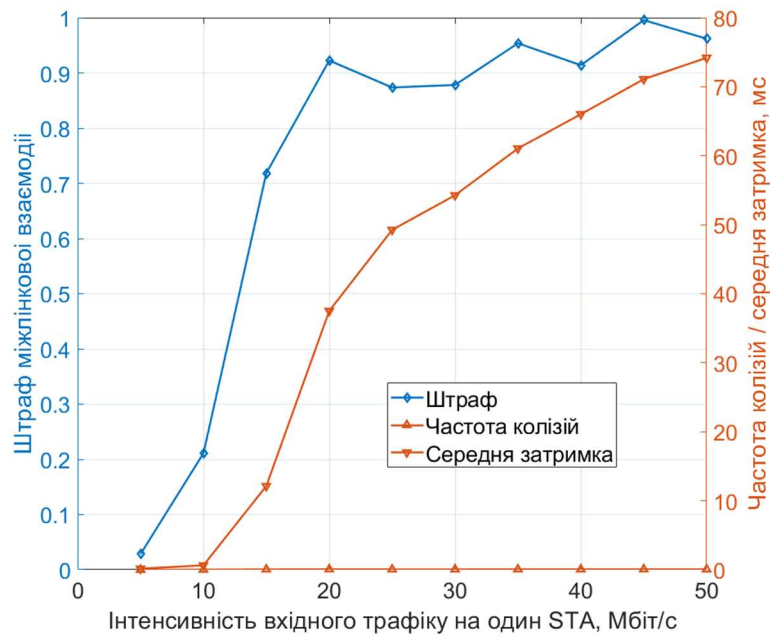


Рис.2.5 Залежність штрафу міжлінійкової взаємодії, частоти колізій і середньої затримки від інтенсивності вхідного трафіку

Результати моделювання показують, що зі збільшенням інтенсивності вхідного трафіку штраф міжлінійкової взаємодії закономірно зростає, а запропонована інтегрована оцінка конфігурації  $Q_{cfg}(l)$  монотонно корелює з реальною сумарною пропускну здатністю. Що підтверджує коректність використання  $Q_{cfg}(l)$  як єдиного скалярного критерію.

## 2.8. Висновки до розділу 2

У другому розділі встановлено, що відомі підходи до оцінювання стану частотного ресурсу в мережах IEEE 802.11 переважно орієнтовані на вибір окремого каналу та не забезпечують адекватного врахування міжлінійкових залежностей, спектральної фрагментації, а також режимних обмежень MLO. В результаті сформовано наукове завдання розроблення методики оцінювання не окремого каналу, а цілісної спектральної конфігурації багатоканального пристрою.

Для розв'язання поставленого завдання формалізовано математичну модель спектральної конфігурації багатоканального пристрою та розроблено інтегровану методику її багатокритеріального оцінювання. Метод базується на нормалізації первинних метрик стану частотного ресурсу, обчисленні локальних

оцінок для окремих лінків та формуванні глобальної оцінки конфігурації з використанням штрафних функцій, що математично відображають взаємний вплив лінків і обмеження режимів роботи MLO.

Отримані результати показують, що зі зростанням інтенсивності вхідного трафіку посилюється міжлінкова взаємодія, що проявляється у зростанні частоти колізій, середньої затримки та штрафу міжлінкової взаємодії. При цьому інтегрована оцінка конфігурації змінюється узгоджено з реальною сумарною пропускною здатністю, а між цими величинами спостерігається стійкий монотонний зв'язок. Це підтверджує змістовну коректність запропонованої інтегрованої оцінки та її придатність для використання як скалярного критерію вибору спектральної конфігурації.

Науковим результатом другого розділу є одержання єдиної скалярної оцінки якості спектральної конфігурації багатоканального пристрою, придатної для подальшої постановки та розв'язання задачі її оптимізації. На відміну від відомих підходів, запропонована метод вперше дозволяє кількісно оцінити не лише ізольовані характеристики окремих каналів, а й ефективність їхньої спільної роботи в межах MLD, синергетично враховуючи ширину смуги, механізми виключення преамбули, просторовий розподіл RU/MRU, міжлінкову інтерференцію та специфічні апаратні обмеження багатоканальної передачі.

## **РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ТРАФІКУ В БАГАТОКАНАЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ**

### **3.1. Обґрунтування вимог до математичної моделі та формалізація підходів до керування розподілом трафіку**

Попередньо було показано що у MLD ефективність передачі даних визначається не лише станом окремих каналів, але й тим, яким чином трафік розподіляється між доступними лінками. Різні політики такого розподілу можуть давати суттєво різні результати навіть за однакових умов середовища [32]. Однак для обґрунтованого вибору між ними необхідний апарат, для їх кількісного порівняння незалежно від того, на які цільові показники орієнтована та чи інша політика.

Безпосереднє порівняння політик розподілу трафіку ускладнюється тим, що вони можуть оперувати різними пріоритетами та по-різному інтерпретувати інформацію про стан лінків [80]. Одні політики надаватимуть перевагу лінкам із найменшою зайнятістю, інші - лінкам із найкращою якістю сигналу, треті - враховуватимуть терміновість потоків. Для коректного зіставлення таких різнорідних підходів потрібна єдина формальна модель, яка б дозволяла описати будь-яку політику в термінах її вхідних даних, правил прийняття рішень та результуючих показників.

Попередньо було розроблено систему метрик для оцінювання стану лінків, які розрізняють частотний ресурс, зайнятість радіоресурсу та якість з'єднання. Ці метрики створюють інформаційну основу, необхідну для прийняття рішень про розподіл трафіку. Однак вони не визначають, як саме ці рішення мають прийматися.

Тому метою даного розділу є побудова математичної моделі розподілу трафіку між каналами в багатоканальній мережі, яка має відповідати низці вимог відповідно до стандарту IEEE 802.11be:

- формалізувати поняття політики розподілу трафіку як відображення стану системи у множину керуючих рішень;

- визначити простір допустимих рішень з урахуванням режимних обмежень MLO;

- забезпечити зв'язок між параметрами політики та аналітичними виразами для пропускну здатності, затримок і дотримання часових обмежень.

Така модель дозволить надалі порівнювати політики розподілу і досліджувати, яким чином різні стратегії управління трафіком впливають на ефективність роботи MLD в залежності від стану каналів та характеристик потоків.

### **3.2. Опис об'єкта керування та вектора стану системи на основі нормованих метрик лінків і параметрів черг**

У контексті задачі оптимізації передачі даних MLD розглядається як система масового обслуговування з керованим розподілом пакетів між кількома лінками, що функціонують у стохастичному середовищі. Керування даним розподілом, здійснюється на рівні Upper MAC як єдиній точці прийняття рішень, тоді як кожен лінк має власні процедури доступу (EDCA/CSMA/CA) і власний стохастичний процес отримання можливості передачі [81].

Також у моделі фіксується дискретизація часу за циклами прийняття рішень. Під дискретним моментом часу  $t$  надалі розуміється початок планувального циклу (початок ТХОР або момент оновлення телеметрії), у який Upper MAC має актуальні оцінки стану лінків і черг та формує керуючу дію для наступного інтервалу. У межах одного такого циклу стан середовища вважається відносно постійним у тому сенсі, що оцінки метрик використовуються як фіксовані параметри для обчислення рішення.

#### **3.2.1. Модель багатоканального пристрою**

Нехай MLD функціонує у частотному просторі, представленому множиною активних лінків  $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, N\}$ , що успішно пройшли процедуру встановлення з'єднання та готові до передачі даних. Це дозволяє виключити з простору рішень недоступні інтерфейси. Поняття «активний лінк» означає не лише факт фізичної наявності радіоінтерфейсу, а й те, що для нього виконані обов'язкові процедурні

умови роботи в MLO, так як узгоджені параметри асоціації, підтверджена можливість участі в передачі та коректне відображення трафіку на лінк відповідно до правил мапінгу. Тому множина  $\mathcal{L}$  є саме множиною кандидатів для планувальника, а не фізичним переліком інтерфейсів пристрою.

Вхідний потік даних описується множиною потоків з непорожніми чергами  $\mathcal{F} = \{f_1, f_2, \dots, K\}$  що мають дані для передачі в поточний момент часу. Це стандартне припущення для планувальників, яке дозволяє фокусуватися лише на нагальних потребах у ресурсах. Якщо деякі потоки тимчасово неактивні, вони не входять у множину кандидатів  $\mathcal{F}$  для поточного рішення, але можуть з'явитися в наступних циклах унаслідок надходження нових пакетів.

Кожен потік  $f_k \in \mathcal{F}$  характеризується послідовністю вимог до якості обслуговування:

$$\psi_k = \{P_k, D_k^{max}, \tau_k\}, \quad (3.1)$$

де:

$P_k$  - пріоритет потоку, відповідно до пріоритету типу трафіку: VO, VI, BE, BK;

$D_k^{max}$  - гранично допустима затримка (Deadline) [53];

$\tau_k$  - тип трафіку, наприклад,  $\tau_k \in \{RTA, Elastic\}$ , що визначає строгість дотримання  $D_k^{max}$ .

Практичний сенс даного набору полягає в наступному:

- пріоритет ( $P_k$ ) визначає відносну важливість потоку при конкуренції за ресурс у термінах механізмів EDCA, дозволяючи планувальнику надавати перевагу потокам вищих категорій доступу;

- допустима затримка ( $D_k^{max}$ ) задає часову межу, на якій оцінюється якість обслуговування;

- тип трафіку ( $\tau_k$ ) необхідний для коректної інтерпретації дедлайнів, для трафіку з часовим обмеженням та без.

У цій постановці під потоком доцільно розуміти логічну чергу Upper MAC, яка відповідає певному ідентифікатору трафіку (TID) або категорії доступу,



прийнятій в реалізації. Це забезпечує узгодження з механізмами пріоритезації IEEE 802.11 та дозволяє надалі вводити правила розподілу між чергами без зміни математичної структури моделі [82].

### 3.2.2. Вектор стану системи

Стан системи в довільний дискретний момент часу  $t$  визначається як комбінація стану середовища передачі та внутрішнього стану черг пристрою. Функціонально це означає, що стан містить усю інформацію, яку Upper MAC використовує для керування:

- наскільки кожен лінк придатний до передачі з точки зору інтегрованих метрик;
- які потоки потребують обслуговування в даний момент;
- які часові вимоги є критичними для цих потоків.

Такий поділ важливий для подальшого визначення політики як відображення зі стану у дію: спочатку формується узагальнений опис системи, а вже потім визначається правило, яке на основі цього опису генерує рішення [83].

Позначимо вектор стану системи як  $S(t)$  [84]. Він складається з:

$$S(t) = \langle X_{links}(t), Q_{traffic}(t) \rangle \quad (3.2)$$

Вектор стану має розглядатись як спостережуваний на початку кожного циклу планування де метрики лінків отримуються з процедур RHY/MAC вимірювання та статистики передачі, а стан черг доступний на підрівні Upper MAC.

Стан кожного лінка  $l \in \mathcal{L}$  описується вектором-стовпчиком нормованих показників  $x_l(t) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$  [85]. Ці метрики отримуються безпосередньо з вимірювань на фізичному та MAC-рівнях, що забезпечує моделювання та зв'язок з фізичним станом каналу:

$$x_l(t) = \begin{bmatrix} \mu_l^{occ}(t) \\ \mu_l^{int}(t) \\ \mu_l^{qual}(t) \\ \delta_l^{restr}(t) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

де:

$\mu_l^{occ}(t)$  - метрика доступності ресурсу (відображає зайнятість каналу);

$\mu_l^{int}(t)$  - метрика завадостійкості;

$\mu_l^{qual}(t)$  - метрика якості сигналу (SNR/MCS);

$\delta_l^{restr}(t)$  - бінарний індикатор обмежень (наприклад, через NSTR конфлікт).

Окремо слід виділити компонент  $\delta_l^{restr}(t)$ . Він вводиться для відображення режимних або топологічних обмежень, які не є плавними метриками якості, а задають апаратну заборону або дозвіл на певні одночасні операції. Прикладом є конфлікт у режимі NSTR, коли для двох лінків одночасна передача/прийом неможлива через внутрішньопристроєву інтерференцію. У такому випадку, навіть якщо  $\mu^{qual}$  є високим для обох лінків, одночасне їх використання заборонене, що відображається в стані явним дискретним індикатором.

Тоді загальний стан усіх каналів подається матрицею розмірності  $4 \times N$ :

$$X_{links}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)] \quad (3.4)$$

Яка дозволяє трактувати стан лінків як єдиний об'єкт для алгоритмів, які працюють з багатьма лінками одночасно, де кожен стовпчик відповідає конкретному лінку, а рядки - типам нормованих характеристик.

Також для прийняття ефективного рішення система повинна враховувати стан черг, який в свою чергу визначається на основі вектора стану трафіку який для множини потоків  $\mathcal{F}$  має вигляд:

$$Q_{traffic}(t) = [q_1(t), \dots, q_K(t)]^T \quad (3.5)$$

де стан окремого потоку  $q_k(t)$  визначається парою параметрів:

$L_k(t)$  - поточна довжина черги потоку  $k$ ;

$T_k^{rem}(t)$  - залишковий час до порушення вимог затримки.

Цей підпростір стану фактично відображає баланс між потребою в обслуговуванні та терміновістю. Параметр  $L_k(t)$  характеризує обсяг даних, що знаходиться в черзі на передачу, а параметр  $T_k^{rem}(t)$  – часовий резерв, де чим менше значення  $T^{rem}$ , тим вузьчий допустимий простір для очікування в черзі та вищий ризик порушення QoS [86]. Параметр  $T_k^{rem}(t)$  обчислюється як функція

від часу надходження головного пакета (Head-of-Line) в черзі та заданої межі затримки.

При цьому параметр  $T_k^{rem}(t)$  визначається залежно від типу трафіку  $\tau_k$ :

$$T_k^{rem}(t) = \begin{cases} D_k^{max} - (t - t_k^{arrival}), & \text{якщо } \tau_k = \text{RTA} \\ \infty, & \text{якщо } \tau_k = \text{Elastic} \end{cases} \quad (3.6)$$

Що дозволяє моделі коректно пріоритезувати потоки з часовими обмеженнями, і якщо для частини потоків часовий параметр не є активним (наприклад, для  $\tau_k = \text{Elastic}$ ), то політика може розглядати ці потоки як такі, що конкурують за ресурс переважно за критеріями обсягу черги  $L_k$  та пріоритету  $P_k$ . Для трафіку з часовими гарантіями ( $\tau_k = \text{RTA}$ ), навпаки, компонент часу стає визначальним аргументом при виборі лінка.

### 3.3. Математичне представлення рішення розподілу трафіку

Базуючись на визначеному векторі стану  $S(t)$ , який включає структурний (хто і де передає) та кількісний (скільки ресурсів виділено) компоненти, планувальник Upper MAC повинен сформулювати рішення, яке визначить конфігурацію передачі на наступний інтервал (TXOP).

Позначимо вектор керуючого рішення в момент часу  $t$  як  $A(t)$ .

1) Першою складовою рішення є визначення комутаційної схеми, тобто розподіл потоків по доступних інтерфейсах. Введемо бінарну матрицю призначень  $X(t)$  розмірністю  $K \times N$  (де  $K = |\mathcal{F}|$  - кількість активних потоків,  $N = |\mathcal{L}|$  - кількість активних лінків [87]):

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,N} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{K,1} & x_{K,2} & \cdots & x_{K,N} \end{pmatrix}, \quad x_{k,l} \in \{0,1\} \quad (3.7)$$

Де елемент  $x_{k,l} = 1$  вказує на те, що пакети  $k$ -го потоку включені до плану передачі для  $l$ -го лінка в поточному циклі. Значення  $x_{k,l} = 0$  означає, що потік не обслуговується даним лінком.

Фізичний зміст рядків і стовпців:

Рядок  $k$ : Вказує, які лінки залучені для обслуговування  $k$ -го потоку. Якщо  $\sum_{l=1}^N x_{k,l} > 1$ , тобто режим агрегації пропускної здатності, коли пакети одного потоку розподіляються між кількома каналами.

Стовпчик  $l$ : Вказує, які потоки обслуговуються на  $l$ -му лінку протягом поточного ТХОР. У межах одного ТХОР ці потоки можуть передаватися як у вигляді агрегованих кадрів A-MPDU, так і послідовно в окремих PPDU, залежно від налаштувань MAC-рівня.

2) Матриця  $X(t)$  визначає лише факт підключення, для повноти керування необхідно визначити обсяг даних, що передається. Введемо матрицю розподілу навантаження  $B(t) \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{K \times N}$ , елементи якої  $b_{k,l}$  визначають кількість інформації, яку заплановано передати з черги  $k$ -го потоку через  $l$ -й лінк:

$$B(t) = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,N} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{K,1} & b_{K,2} & \cdots & b_{K,N} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

де сума по рядку  $\sum_l b_{k,l}$  визначає, наскільки зменшиться черга  $L_k(t)$  після завершення циклу передачі.

Сума по стовпцю  $B_l^{agg} = \sum_k b_{k,l}$  визначає розмір корисного навантаження у кадрі РНУ-рівня на  $l$ -му лінку.

Між матрицями  $X$  та  $B$  існує зв'язок у вигляді  $b_{k,l} > 0 \Rightarrow x_{k,l} = 1$ , тобто, що якщо потік не призначено на лінк ( $x_{k,l} = 0$ ), то обсяг переданих даних тотожно дорівнює нулю ( $b_{k,l} = 0$ ).

3) Третьою складовою рішення є часові параметри доступу. Для кожного лінка необхідно визначити тривалість зарезервованого вікна передачі. Введемо вектор часу:

$$\tau(t) = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]^T \quad (3.9)$$

де  $\tau_l$  - тривалість передачі на  $l$ -му лінку в мікросекундах.

Хоча  $\tau_l$  функціонально залежить від обсягу даних  $B_l^{agg}$  та фізичної швидкості лінка  $R_l(\text{MCS})$ , виділення  $\tau_l$  в окрему змінну керування є необхідним через специфіку MLO, де часто виникає потреба вирівнювання тривалості передач для

синхронних режимів. При цьому величина  $\tau_l$  обмежена зверху максимально допустимою тривалістю ТХОР, яка визначається стандартом для відповідної категорії доступу.

Таким чином, повне рішення планувальника в момент часу  $t$  формалізується як упорядкований кортеж матриць та векторів:

$$A(t) = \langle X(t), B(t), \tau(t) \rangle \quad (3.10)$$

Це визначення дозволяє однозначно інтерпретувати будь-яку політику розподілу трафіку як алгоритм заповнення цих матриць. Наприклад, Load Balancing політика розподілить  $b_{k,l}$  так, щоб мінімізувати різницю завантаження та тривалості  $\tau_l$  між лінками, Ultra-Low Latency політика встановить  $x_{k,l} = 1$  для лінка з найкращим співвідношенням метрик якості сигналу ( $\mu_l^{qual}$ ) та доступності каналу ( $\mu_l^{occ}$ ), ігноруючи ефективність утилізації спектра.

### 3.3.1 Простір допустимих рішень з урахуванням обмежень режимів роботи багатоканальної операції

Сформований керуючий кортеж  $A(t) = \langle X, B, \tau \rangle$  визначає лише бажаний режим роботи. Для того щоб цей план міг бути реалізований фізично без порушення стандартів IEEE 802.11be та виникнення колізій на стороні приймача, він повинен належати простору допустимих рішень  $\mathcal{S}_{feasible}$ .

Обмеження простору рішень визначаються апаратною архітектурою MLD та обраним режимом роботи:

1) Обмежуючим фактором у MLD є внутрішня інтерференція (IDC). Інформація про такі апаратні обмеження, яка у векторі стану, описаному вище, кодується через індикатор  $\delta_l^{restr}$ , на рівні системи агрегується у матрицю сумісності лінків  $C \in \{0,1\}^{N \times N}$ .

Матриця  $C$  є симетричною ( $c_{i,j} = c_{j,i}$ ) і визначається на етапі встановлення з'єднання. Елемент  $c_{i,j}$  визначає можливість одночасної незалежної роботи пари лінків  $i$  та  $j$ :

-  $c_{i,j} = 1$  для STR-пари, передача на  $i$  не заважає прийому на  $j$ .

-  $c_{i,j} = 0$  для NSTR-пари, одночасна різноспрямована активність заборонена.

Відповідно, для будь-якої пари активних лінків  $i, j$ , що задіяні в передачі ( $x_{i,i} \cdot x_{j,j} = 1$ ) і є NSTR-парою ( $c_{i,j} = 0$ ), має виконуватися рівність тривалості TXOP:

$$\forall i, j \in \mathcal{L}: (x_{i,i} \cdot x_{j,j} = 1) \wedge (c_{i,j} = 0) \Rightarrow \tau_i = \tau_j \quad (3.11)$$

щоб фази передачі та фази очікування підтвердження на обох лінках збігалися у часі.

2) Фізична реалізованість рішення вимагає, щоб запланований час  $\tau_l$  був достатнім для передачі запланованого обсягу даних. Для цього мінімально необхідний час  $t_l^{req}$  для передачі корисного навантаження на лінку  $l$  розраховується як:

$$t_l^{req} = \frac{\sum_{k=1}^K b_{k,l}}{R_l(\mu_l^{qual})} + T_{phy\_overhead} \quad (3.12)$$

де  $R_l$  - фізична швидкість передачі, яка визначається на основі метрики якості сигналу (SINR/MCS) з вектора стану  $x_l$ , а  $T_{phy\_overhead}$  - стандартні часові витрати на преамбулу та заголовки. У випадку NSTR-синхронізації загальна тривалість TXOP  $\tau_{sync}$  визначається найповільнішим лінком:

$$\tau_{sync} = \max_{\{l | \text{active NSTR}\}} (t_l^{req}) \quad (3.13)$$

Це призводить до появи накладних витрат на синхронізацію. Для кожного лінка  $l$  в NSTR-групі величина втрат  $\Delta\tau_l$  становить:

$$\Delta\tau_l = \tau_{sync} - t_l^{req} \geq 0 \quad (3.14)$$

3) Якщо підмножина лінків  $\mathcal{L}_{EMLSR} \subset \mathcal{L}$  працює в режимі EMLSR, то в кожен момент часу передача можлива лише по одному з них через наявність лише одного радіомодуля [88]. Це формалізується як обмеження взаємного виключення:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}_{EMLSR}} \mathbb{I}(\sum_{k=1}^K x_{k,l} > 0) \leq 1 \quad (3.15)$$

де  $\mathbb{I}(\cdot)$  - індикаторна функція.

4) Стандарт IEEE 802.11 обмежує складність формування агрегованих кадрів, зокрема, існує ліміт на кількість різних ідентифікаторів трафіку (TID), які можуть

бути об'єднані в одному A-MPDU (зазвичай  $N_{TID}^{max} = 8$ ). Це накладає обмеження на стовпці матриці призначень  $X$ :

$$\forall l \in \mathcal{L}: \sum_{k=1}^K x_{k,l} \leq N_{TID}^{max} \quad (3.16)$$

Підсумовуючи, простір допустимих рішень  $\mathcal{S}_{feasible}$  визначається як множина кортежів  $A(t)$ , для яких одночасно виконуються наступні умови:

- Обрана тривалість TXOP є не меншою за необхідну:  $\tau_l \geq t_l^{req}, \forall l$ .
- Обмеження черг на передачу більше даних, ніж є в наявності:  $\sum_l b_{k,l} \leq L_k(t)$ .
- Сумісність з режимами роботи MLO:  $\tau_i = \tau_j$  для активних пар з  $c_{i,j} = 0$ .
- Виконуються умови взаємного виключення лінків та обмеження кількості потоків.
- Стандартна відповідність:  $\tau_l \leq TXOP_{limit}$ .

Відповідно, будь-яке рішення, що виходить за межі  $\mathcal{S}_{feasible}$ , вважається недійсним.

### 3.3.2 Політика розподілу як відображення стану у рішення

Маючи формалізований вектор стану  $S(t)$  та визначений простір допустимих керувань  $\mathcal{S}_{feasible}$ , задачу управління трафіком у MLD можна звести до визначення правила, яке ставить у відповідність кожній ситуації конкретну керуючу дію. Де політика розподілу трафіку  $\pi$  визначається як функція, що трансформує інформацію про поточний стан системи та набір внутрішніх налаштувань у вектор керування:

$$\pi: \mathcal{S} \times \Omega \rightarrow \mathcal{S}_{feasible} \quad (3.17)$$

де  $\mathcal{S}$  - простір можливих станів, а  $\Omega$  - простір параметрів конфігурації політики.

Зазначимо, на даному етапі не накладається обмежень на внутрішню логіку формування рішення і це може бути як аналітична формула, так і набір евристичних правил або результат роботи нейронної мережі [89]. Головною

вимогою є сформоване рішення  $A$  що належить простору допустимих рішень  $\mathcal{S}_{feasible}$  для будь-якого вхідного стану  $S \in \mathcal{S}$ .

Для подальшого порівняння різних політик розподілу трафіку представимо безпосередньо політику розподілу як універсальну структуру з окремих компонентів:

- вхідні дані які формують вектор стану що відображає динаміку середовища та вимоги трафіку  $S(t) = \langle X_{links}(t), Q_{traffic}(t) \rangle$ ;

- параметри політики ( $\Theta \in \Omega$ ) як набір налаштувань або вагових коефіцієнтів, які визначають поведінку алгоритму. Наприклад, це можуть бути пороги перемикавання лінків, пріоритети черг або коефіцієнти агресивності агрегації. У межах одного експерименту вектор  $\Theta$  вважається константою, що дозволяє досліджувати чутливість системи до зміни налаштувань;

- правило прийняття рішення як алгоритмічне ядро, що виконує перетворення стану системи та параметрів політики на керуючу дію.

Тоді структура політики розподілу можна описати як:

$$A(t) = \pi(S(t); \Theta) \quad (3.18)$$

Що дозволяє сформулювати задачу оптимізації ресурсів як пошук такого вектора  $\Theta$ , який забезпечує найкращі показники ефективності для фіксованої структури правила  $\pi$ .

Оскільки MLD як і будь-який Wi-Fi пристрій, функціонує в умовах певної ймовірності успішної передачі, тому доцільно розширити визначення політики, де в загальному випадку може задаватися як умовний розподіл ймовірностей на просторі допустимих рішень [38]:

$$\pi(A|S; \Theta) = P(A(t) = A \mid S(t) = S) \quad (3.19)$$

У цьому випадку конкретне рішення  $A(t)$  у кожному циклі обирається шляхом семплювання з цього розподілу:

$$A(t) \sim \pi(\cdot | S(t); \Theta) \quad (3.20)$$

Запропонований формалізм  $\pi: S \xrightarrow{\Theta} A$  забезпечує необхідну абстракцію для наступних етапів дослідження. Незалежно від того, чи орієнтується політика на



балансування завантаження, чи на мінімізацію затримок, чи на максимізацію пропускної здатності, вона описується однаковими інтерфейсами входу (стан) та виходу (дія).

### 3.4. Аналітичний зв'язок між рішенням і результатами через оцінку пропускної здатності

Ключовим завданням моделі є прогнозування наслідків прийнятого керуючого рішення  $A(t) = \langle X, B, \tau \rangle$  для стану системи. Оскільки бездротовий канал є стохастичним середовищем, точні значення метрик не можуть бути гарантовані, проте їх математичне сподівання та оцінки ризиків можуть бути виведені аналітично на основі вектора стану  $S(t)$ .

Для коректності розрахунків введемо поняття тривалості поточного циклу планування  $T_{cycle}$ . Оскільки передача на різних лінках відбувається паралельно, але завершується в різний час (або вирівнюється при NSTR), тривалість циклу визначається максимальною тривалістю зарезервованого TXOP серед усіх активних лінків:

$$T_{cycle} = \max_{l \in \mathcal{L}}(\tau_l) + T_{ack} \quad (3.21)$$

де  $T_{ack}$  - час на отримання підтвердження.

Номінальна швидкість фізичного рівня не дорівнює реальній пропускній здатності через помилки передачі [90]. Нехай  $p_l(\mu_l^{qual})$  - ймовірність помилки при прийомі пакету на лінку  $l$ , яка є функцією від метрики якості сигналу.

Тоді математичне сподівання обсягу успішно переданих даних для потоку  $k$  на лінку  $l$  становить [91]:

$$\mathbb{E}[Data_{k,l}] = b_{k,l} \cdot (1 - p_l(\mu_l^{qual})) \quad (3.22)$$

А сумарна очікувана пропускна здатність для потоку  $k$  у поточному циклі визначається як [49]:

$$TH_k(A, S) = \frac{1}{T_{cycle}} \sum_{l \in \mathcal{L}} x_{k,l} \cdot b_{k,l} \cdot (1 - p_l(\mu_l^{qual})) \quad (3.23)$$

Для ілюстрації даної оцінки використаємо систему з двома лінками  $R_1 = 5$  МБ/с (L1) та  $R_2 = 0.5$  МБ/с (L2). Оцінка проводиться для чотирьох стратегій

формування матриці навантаження  $B$  при обсягах черги  $L_k$  від 1 до 20 кБ. Перша стратегія спрямовує весь обсяг черги виключно на перший лінк ( $b_1 = L_k, b_2 = 0$ ). Друга стратегія лише для другого лінка ( $b_1 = 0, b_2 = L_k$ ). Третя стратегія (стохастичний розподіл) моделює непередбачувану поведінку, надсилаючи дані у випадковій пропорції  $b_1 = L_k \cdot p$  та  $b_2 = L_k \cdot (1 - p)$ , де  $p$  є псевдовипадковою величиною в діапазоні від 0.1 до 0.9. Четверта стратегія (пропорційний розподіл) ділить дані строго пропорційно фізичним швидкостям інтерфейсів ( $b_1 = L_k \cdot \frac{R_1}{R_1+R_2}$ ,  $b_2 = L_k \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2}$ ), гарантуючи одночасне завершення передачі  $\tau_1 = \tau_2$ . Відповідний графік оцінок пропускної здатності представлено для режиму STR на Рис. 3.1 та для NSTR на Рис. 3.2.

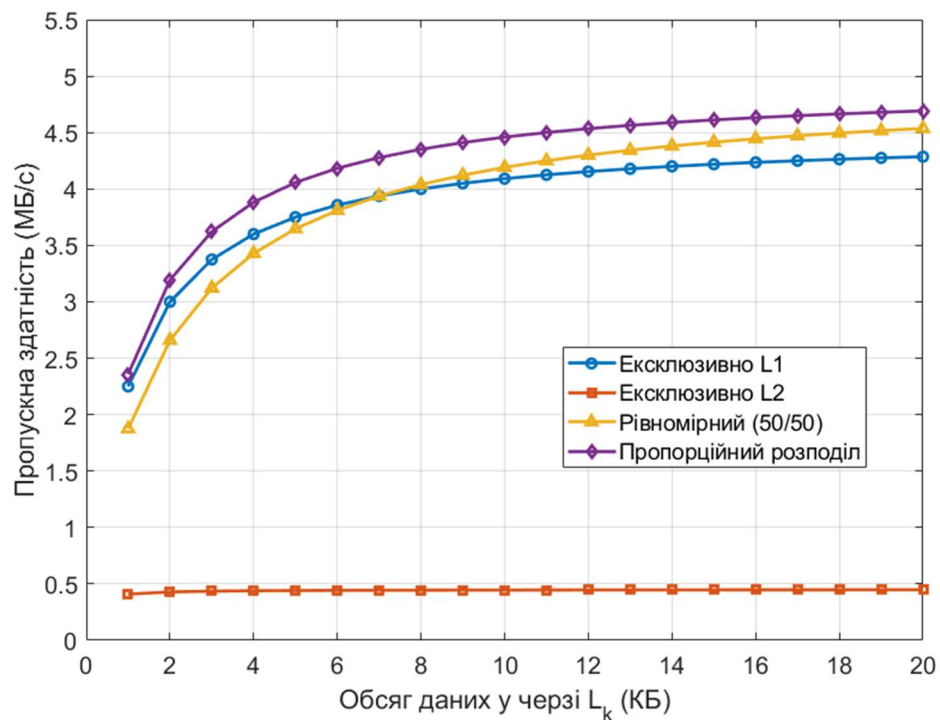


Рис. 3.1 Оцінка пропускної здатності для STR

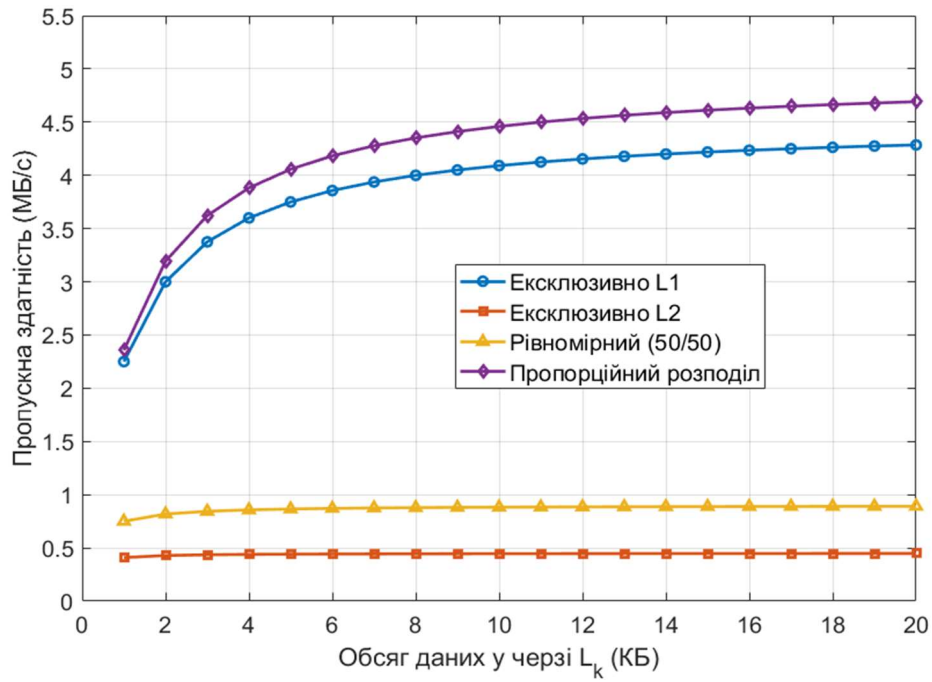


Рис. 3.2 Оцінка пропускної здатності для NSTR

Для подальшого обчислення ймовірності порушення дедлайнів необхідно оцінити очікувану затримку обслуговування пакета, яка складається з часу очікування в черзі, часу доступу до середовища та часу передачі [42].

Час доступу ( $T_{acc}$ ) є випадковою величиною, що залежить від конкуренції за середовище. Використовуючи метрику доступності  $\mu_l^{occ}$ , середній час очікування доступу для лінка  $l$  буде становити [92]:

$$\mathbb{E}[T_{acc,l}] \approx \frac{CW_{min}}{2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{\mu_l^{occ}} \quad (3.24)$$

де  $\sigma$  - тривалість слота.

Цей вираз є наближеною оцінкою для систем з випадковим доступом де множник  $1/\mu_l^{occ}$  моделює зростання кількості ретрансмісій та колізій при високому завантаженні каналу [93].

Довжина черги на початок наступного циклу  $L_k(t+1)$  прогнозується на основі балансу між надходженням нових даних (з інтенсивністю  $\lambda_k$ ) та успішною передачею [94]. Важливо враховувати, що дані, які були передані з помилкою ( $p_l$ ), залишаються в черзі для повторної передачі:

$$L_k(t+1) = \max(0, L_k(t) - \sum_{l \in \mathcal{L}} b_{k,l} \cdot (1 - p_l(\mu_l^{qual}))) + \lambda_k \cdot T_{cycle} \quad (3.25)$$

Середня затримка визначається згідно із законом Літла [95], де очікувана затримка для потоку  $k$  обернено пропорційна ефективній швидкості обслуговування [96]:

$$\bar{D}_k(A, S) \approx \frac{L_k(t)}{TH_k(A, S)} + \min_{l: x_{k,l}=1} (E[T_{acc,l}]) \quad (3.26)$$

Результати розрахунків за отриманим виразом представлені на графіках для режиму STR на Рис. 3.3 та NSTR на Рис. 3.4 які демонструють загальний час перебування пакетів у раніше описаній системі. Оцінка проведена для описаних вище чотирьох стратегій формування матриці навантаження  $B$  з додатковим урахуванням усередненого часу очікування доступу до середовища.

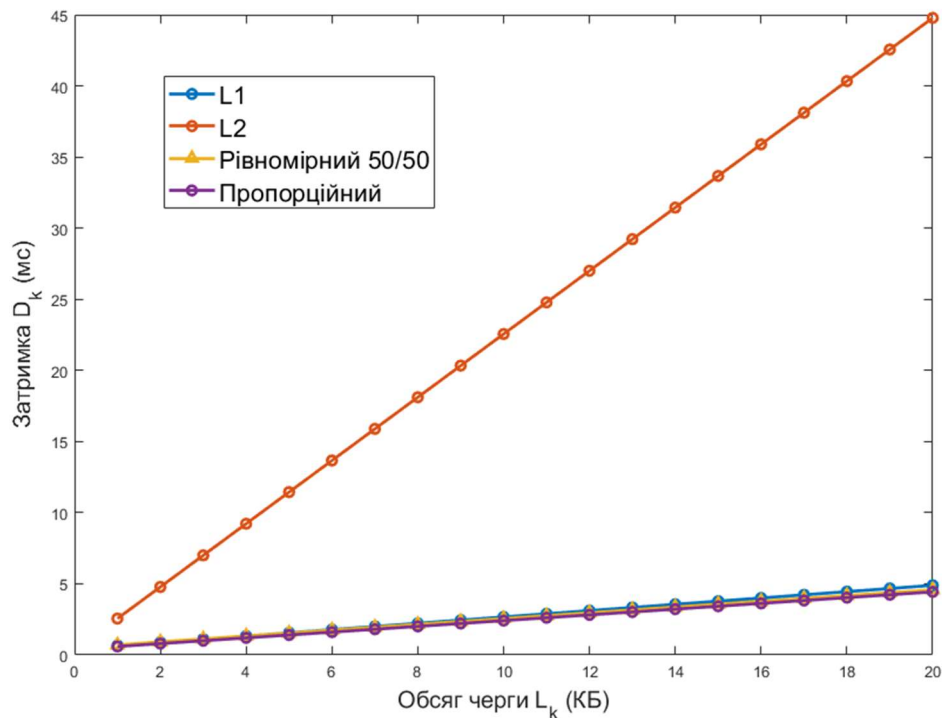


Рис. 3.3 Середня затримка для STR

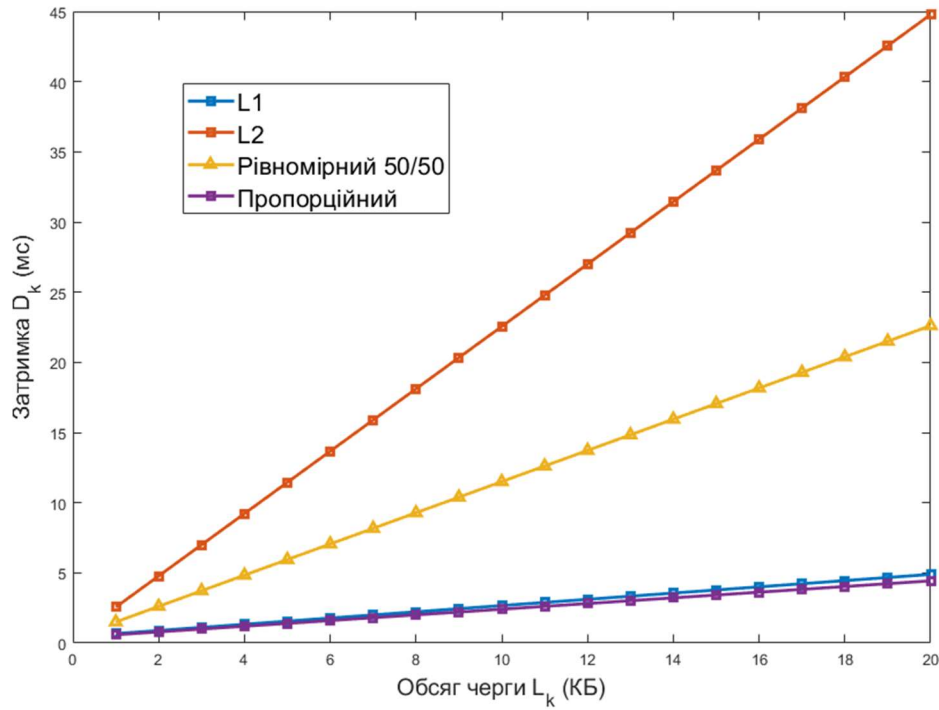


Рис. 3.4 Середня затримка для NSTR

Ризик порушення дедлайну виникає, якщо швидкість обслуговування недостатня для передачі наявного обсягу даних у відведений час. Апроксимуємо розподіл часу обслуговування експоненційним законом [19]. Тоді ймовірність відмови оцінюється як функція від відношення доступного часу до необхідного [36]:

$$P_{fail,k}(A) \approx \exp\left(-\frac{T_k^{rem}}{\mathbb{E}[T_{drain}]}\right) = \exp\left(-\frac{T_k^{rem} \cdot TH_k(A,S)}{L_k(t)}\right) \quad (3.27)$$

де:

$T_k^{rem}$  - залишковий час до дедлайну (доступний ресурс часу);

$L_k(t)$  - поточний обсяг черги (у бітах);

$TH_k(A,S)$  - очікувана пропускна здатність (у бітах/с), визначена вище.

Візуалізацію отриманих значень ймовірності порушення часових обмежень представлено на графіках для режимів STR на Рис. 3.5 та NSTR на Рис. 3.6.

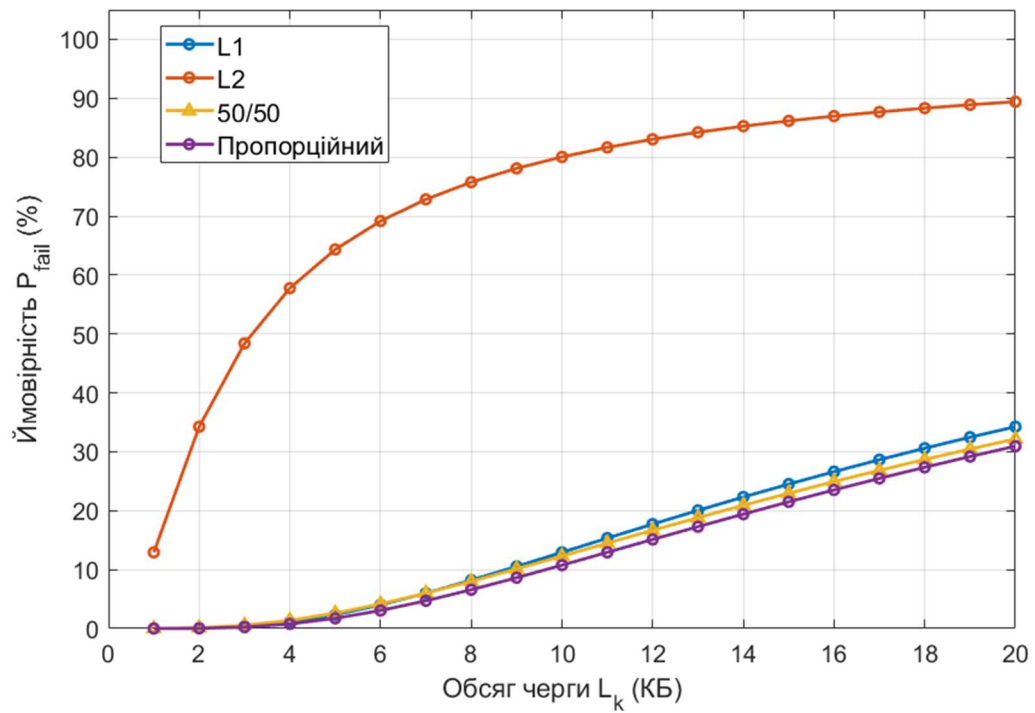


Рис. 3.5 Ймовірність порушення дедлайну для STR

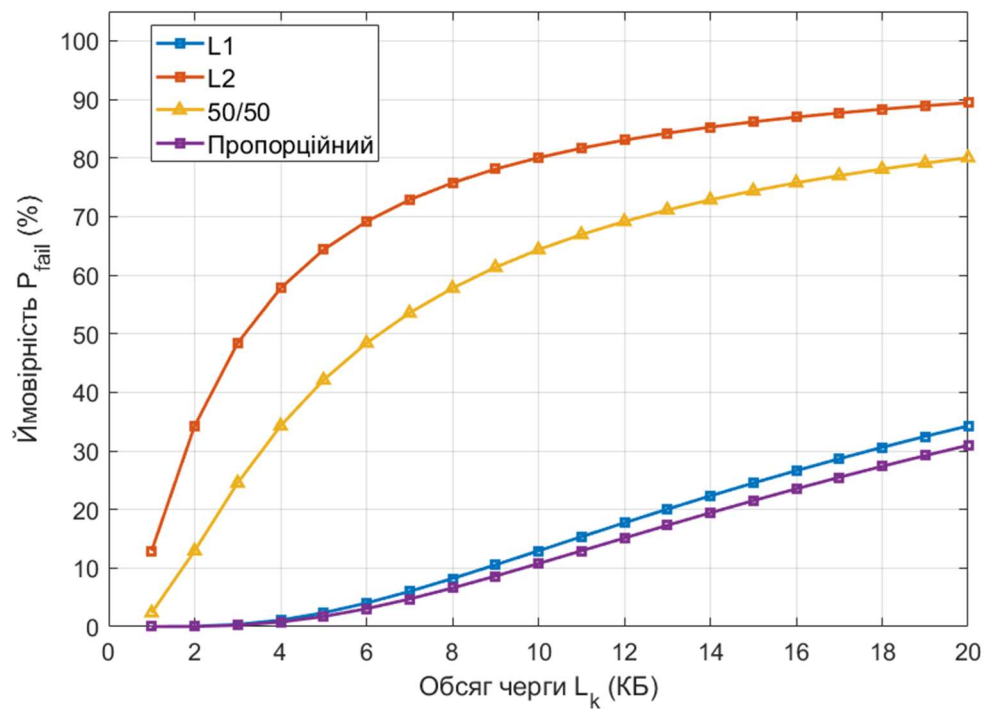


Рис. 3.6 Ймовірність порушення дедлайну для NSTR

Вираз (3.27) демонструє залежність надійності від прийнятого рішення де збільшення виділеного ресурсу (зростання  $TH_k$ ) призводить до швидшого зменшення показника експоненти, знижуючи ймовірність зриву ( $P_{fail} \rightarrow 0$ ) тоді

як накопичення черги (зростання  $L_k$ ) зменшує знаменник у дробі показника, наближаючи ймовірність зриву до одиниці ( $P_{fail} \rightarrow 1$ ).

### 3.5. Висновки до розділу 3

Розроблено математичну модель розподілу трафіку для багатоканального пристрою, яка формалізує процес керування передачею даних як задачу прийняття рішень у системі масового обслуговування. Модель охоплює повний цикл управління: від формування вхідного вектора стану на основі метрик каналів та черг до матриці призначень, як керуючого рішення, що визначає розподіл потоків між лінками та параметри доступу. Важливою особливістю моделі є розгляд MLD як єдиної узгодженої системи, де рішення щодо одного каналу враховують стан та активність інших, що дозволяє перейти від ситуативного доступу до детермінованого планування ресурсів.

Логіка побудови моделі базується на уніфікації вхідних даних. Різномірні фізичні параметри середовища передачі та стохастичні характеристики трафіку трансформуються у нормований вектор стану. Такий підхід забезпечує абстрагування алгоритму керування від апаратної специфіки фізичного рівня. Завдяки цьому політика розподілу трафіку оперує стандартизованими показниками ефективності, що дозволяє застосовувати розроблену модель для аналізу та оптимізації роботи будь-яких конфігурацій пристроїв стандарту IEEE 802.11be без необхідності адаптації до конкретного чіпсета.

Ключовим елементом моделі є визначення простору допустимих рішень. Введено систему математичних обмежень, яка формалізує умови апаратної сумісності каналів, зокрема враховує конфлікти режиму NSTR та особливості EMLSR. Цей механізм виконує функцію апіорної фільтрації, автоматично виключаючи з простору пошуку ті варіанти розподілу ресурсів, реалізація яких призвела б до внутрішньосистемних колізій або блокування приймачів. Це гарантує фізичну реалізованість сформованих керуючих дій.

Фіналом моделі є встановлення аналітичного зв'язку між параметрами керування та показниками якості обслуговування. Виведені математичні

залежності дозволяють прогнозувати ймовірнісні характеристики процесу передачі - очікувану затримку та ризик втрати пакетів - для кожного варіанту розподілу ресурсів. Наявність такого прогностичного апарату дозволяє здійснювати обґрунтований вибір стратегії керування на основі кількісних критеріїв ефективності, забезпечуючи баланс між пропускнуою здатністю та надійністю доставки даних.



## РОЗДІЛ 4. МЕТОД РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

### 4.1. Концепція методики розподілу ресурсів

Розв’язання задачі підвищення ефективності MLD вимагає переходу від статичних схем до динамічного керування ресурсами. Базуючись на результатах аналізу, проведеного у розділі 1, та використовуючи математичний апарат, сформований у розділах 2 та 3, пропонується метод розподілу ресурсів, яка реалізує механізм сумісної оптимізації параметрів трафіку та фізичного середовища. Архітектура методики передбачає впровадження на рівні U-MAC функціонального блоку (Рис. 4.1). Процес прийняття рішень поділяється на:

1) Моніторингу та оцінки стану каналів, де в реальному часі оновлюються дані про доступні лінки. Вхідним вектором є множина станів  $X(t) = \{x_1, \dots, x_L\}$ , структура яких формалізована у третьому розділі. Кожен вектор  $x_l = [\mu_{occ}, \mu_{int}, \mu_{qual}, \delta]^T$  містить нормовані показники завантаженості та якості. Для ранжування каналів використовується інтегральна метрика якості  $q_l$ , обґрунтування якої наведено у другому розділі. Це дозволяє звести багатовимірні параметри до скалярної оцінки “вартості” використання ресурсу, де  $q_l \rightarrow 1$  відповідає ідеальному стану каналу.

2) Профілювання та прогнозування навантаження за яким виконується класифікація вхідних потоків за категоріями доступу згідно зі специфікаціями IEEE 802.11be, і перехід від бітових характеристик до часових. Для кожного потоку розраховується прогнозований час зайнятості радіоресурсу ( $T_{req}$ ), необхідний для успішної доставки даних.

3) Оптимізації розподілу, де формується матриця розподілу  $A(t)$ , яка визначає прив’язку потоків до лінків. Пошук рішення здійснюється у просторі допустимих станів  $\mathcal{S}_{feasible}$ , визначеному у третьому розділі з урахуванням обмежень на апаратну сумісність. Цільовою функцією виступає мінімізація максимального часу завершення передачі серед усіх задіяних лінків  $T_{req}$  для всіх активних сесій, що еквівалентно максимізації пропускної здатності мережі.

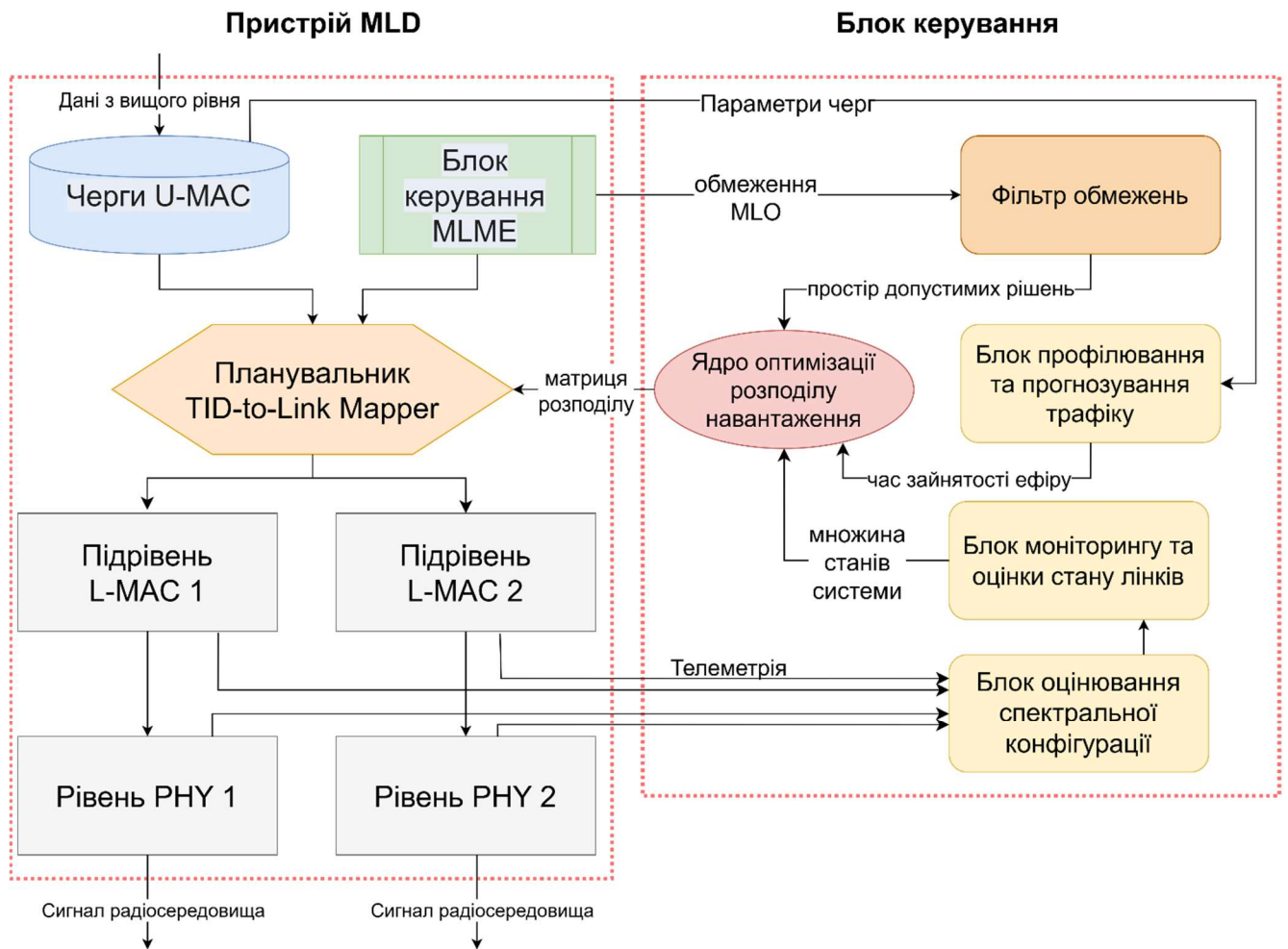


Рис. 4.1 Схема функціонального блоку розподілу трафіку між лінками в MLD

Для забезпечення гарантованої якості обслуговування метод повинна оперувати точними оцінками часових витрат на передачу даних. В умовах стандарту 802.11be цей час є випадковою величиною, що залежить від параметрів фізичного рівня (MCS, MIMO), накладних витрат та стану конкурентного середовища.

Вхідне навантаження моделюється як множина потоків  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ . Кожен потік описується вектором вимог:

$$R_i = \{AC_i, L_{data,i}, \lambda_i\}, \quad (4.1)$$

де  $AC_i \in \{VO, VI, BE, BK\}$  - категорія доступу (Voice, Video, Best Effort, Background);  $L_{data,i}$  - середній розмір пакету даних (MSDU);  $\lambda_i$  - інтенсивність надходження [97].

Прогнозований часовий ресурс ( $T_{req}$ ), необхідний для обслуговування пакету потоку  $f_i$  на лінку  $l$ , визначається як математичне сподівання часу зайнятості середовища для успішної передачі:

$$T_{req}(i, l) = N_{att}(l) \cdot (\bar{T}_{access}(AC_i, \mu_{occ}) + T_{tx}(L_{data,i}, \mu_{qual})), \quad (4.2)$$

де:

$N_{att}(l) = \frac{1}{1-PER(l)}$  - очікувана кількість спроб передачі [98]. Де  $PER(l)$  (Packet Error Rate) визначається за таблицями MCS [99] залежно від компоненти якості  $\mu_{qual}$  з вектору стану  $x_l$ .

Для прийняття рішення модель використовує наступні складові:

#### 1. Час фізичної передачі ( $T_{tx}$ )

Враховуючи механізм агрегації (A-MPDU), який є базовим для Wi-Fi 7, час передачі розраховується для агрегованого кадру (PPDU) [100].

$$T_{tx} = T_{preamble}^{EHT} + T_{phy\_hdr} + \frac{L_{agg}}{R_{phy}(\mu_{qual})} + T_{SIFS} + T_{BA}, \quad (4.3)$$

де:

$T_{preamble}^{EHT}$  - тривалість преамбули EHT. Для каналу 320 МГц (MIMO 2x2) це значення становить  $\approx 44$  мкс;

$L_{agg}$  - розмір агрегованого навантаження, визначається як  $L_{agg} = \min(Q_{size}, L_{max\_agg})$ , де  $L_{max\_agg}$  - максимальний розмір A-MPDU (стандартно 11406 байт для Wi-Fi 7);

$R_{phy}(\mu_{qual})$  - фізична швидкість передачі, яка обирається адаптивно на основі MCS, що відповідає поточному значенню  $\mu_{qual}$  [101].

$T_{BA}$  - час передачі кадру підтвердження BlockAck. Приймається  $T_{BA} \approx 68$  мкс (для BlockAck CompressedBitmap).

#### 2. Час конкурентного доступу ( $\bar{T}_{access}$ )

Оцінка базується на параметрах EDCA. Середній час очікування доступу складається з фіксованого інтервалу AIFS та випадкової затримки Backoff:

$$\bar{T}_{access} = AIFS[AC_i] + \bar{T}_{backoff}, \quad (4.4)$$

де  $AIFS[AC_i] = SIFS + AIFSN[AC_i] \cdot \sigma$  (тривалість слота  $\sigma = 9$  мкс).

Значення параметрів доступу для різних категорій трафіку наведено в табл. 4.1.

Табл. 4.1 Параметри EDCA для різних категорій доступу

Категорія (AC)	AIFSN	$CW_{min}$	$CW_{max}$
Voice (AC_VO)	2	3	7
Video (AC_VI)	2	7	15
Best Effort (AC_BE)	3	15	1023
Background (AC_BK)	7	15	1023

Середній час відстрочки  $\bar{T}_{backoff}$  розраховується з урахуванням ймовірності колізій  $p_{coll}$ . В якості евристичної оцінки для насиченого трафіку приймається апроксимація  $p_{coll} \approx \mu_{occ}$ , де  $\mu_{occ}$  - нормована компонента завантаженості каналу з Розділу 3.

Враховуючи експоненційне зростання вікна конкуренції (Binary Exponential Backoff) та ліміт спроб  $m = 7$ , середнє значення Backoff визначається як зважена сума [102]:

$$\bar{T}_{backoff} = \frac{\sigma}{2} \cdot \sum_{k=0}^m \left( \frac{p_{coll}^k (1-p_{coll})}{1-p_{coll}^{m+1}} \cdot \min(CW_{min} \cdot 2^k, CW_{max}) \right). \quad (4.5)$$

Тобто загалом запропонована модель ( $T_{req}$ ) інтегрує параметри фізичного рівня (через  $T_{tx}$  та  $R_{phy}$ ), канального рівня (через параметри EDCA та агрегацію) та поточний стан середовища (через  $\mu_{qual}$  та  $\mu_{occ}$ ). Що дозволяє сформувати матрицю ваг, яка буде використана алгоритмом оптимізації для мінімізації глобальної затримки в мережі.

## 4.2. Оптимізація розподілу трафіку з урахуванням апаратних обмежень синхронізації

Формально задачу розподілу ресурсів зведено до пошуку матриці розподілу навантаження  $B = \{b_{i,l}\}$ , де елемент  $b_{i,l}$  визначає обсяг даних (у байтах) потоку  $i$ , який призначається для передачі через лінк  $l$  у поточному циклі передачі [103].

Як критерій оптимальності обрано мінімізацію максимального часу завершення передачі серед усіх задіяних лінків [85]. Фізичний зміст цього

критерію полягає у прагненні системи до якомога швидшого вивільнення радіоресурсу, що зменшує ймовірність колізій із сусідніми мережами та підвищує загальну пропускну здатність:

$$\min_B \left( \max_{l \in L_{active}} \tau_l(B) \right) \quad (4.6)$$

де  $\tau_l(B)$  - прогнозована тривалість передачі (PPDU Duration) на лінку  $l$ , яка розраховується на основі моделі з розділу 4.2 і враховує накладні витрати фізичного рівня:

$$\tau_l(B) = T_{phy\_overhead} + \frac{\sum_{i=1}^N b_{i,l}}{R_{phy}(\mu_{qual}, l)} + T_{BA} \quad (4.7)$$

Пошук рішення обмежений областю допустимих станів  $\mathcal{S}_{feasible}$ , описаних в попередньому розділі. В алгоритмі ці обмеження виступають у ролі фільтрів:

- обмеження обсягу черги якщо сумарний розподілений обсяг даних для потоку не може перевищувати фактичний розмір його черги  $Q_i$ . Це обмеження запобігає спробам алгоритму запланувати неіснуючі дані (Dummy padding), якщо це не вимагається процедурою синхронізації:

$$\sum_{l=1}^L b_{i,l} \leq Q_i, \quad \forall i \in F \quad (4.8)$$

- тривалість передачі  $\tau_l$  не повинна перевищувати максимальний ліміт TXOP, визначений стандартом для відповідної категорії доступу ( $AC_{min}$ ):

$$\tau_l(B) \leq TXOP_{limit}(AC_{min}), \quad \forall l \quad (4.9)$$

дотримання цього обмеження є критичним для забезпечення справедливості доступу по відношенню до інших пристроїв у мережі

- обмеження синхронізації NSTR в якій для будь-якої пари лінків  $(m, n)$ , що мають конфлікт NSTR (тобто  $C_{m,n} = 0$  згідно з матрицею сумісності з Розділу 3), дозволяється одночасна передача тільки за умови вирівнювання часу завершення:

$$C_{m,n} = 0 \text{ та } \tau_m > 0, \tau_n > 0, \text{ то } |\tau_m - \tau_n| \leq \delta_{align} \quad (4.10)$$

де  $\delta_{align}$  - допустима похибка синхронізації (стандартно  $\leq 8$  мкс). Невиконання цієї умови призвело б до ситуації, коли передача на одному лінку продовжується, а на іншому - пристрій намагається прийняти BlockAck, що через

явище внутрішньосистемної інтерференції (In-device Coexistence Interference) призведе до втрати пакетів.

Алгоритм виконується ітеративно і складається з трьох етапів:

Етап 1. Ініціалізація та пріоритетне сортування.

На початку циклу планування зчитуються актуальні параметри каналів (зокрема  $R_{phy}(l)$ ) на основі метрики якості  $\mu_{qual}$ ). Далі виконується подвійне сортування:

- потоків за пріоритетом АС (Voice  $\rightarrow$  Video  $\rightarrow$  Best Effort), що гарантує, що трафік, чутливий до затримок, буде розглянуто першим, коли доступні найкращі ресурси.

- лінків за критерієм «вартості передачі байта»:  $Cost_l = 1/R_{phy}(l)$ . Це дозволяє алгоритму першочергово заповнювати канали з найвищою спектральною ефективністю.

Етап 2. Попередній розподіл.

Алгоритм намагається розподілити байти найбільш пріоритетного потоку  $f_i$  між доступними лінками так, щоб вирівняти їхню часову завантаженість  $\tau_l$ . Логіка процесу аналогічна заповненню сполучених посудин:

Для потоку  $i$  обчислюється доступна залишкова ємність кожного лінка в байтах:

$$Cap_l = (TXOP_{limit} - \tau_l^{curr}) \cdot R_{phy}(l) \quad (4.11)$$

Дані потоку розподіляються між лінками пропорційно до їх швидкостей  $R_{phy}$ . Такий підхід мінімізує приріст часу  $\Delta\tau$ , оскільки швидші канали отримують більше навантаження.

Оновлюється акумулятор поточного часу на лінках:  $\tau_l^{curr} \leftarrow \tau_l^{curr} + \Delta\tau_l$ .

Етап 3. Корекція NSTR.

Після попереднього розподілу перевіряються всі пари лінків, що мають конфлікт NSTR.

Якщо для пари  $(m, n)$  виявлено розсинхронізацію  $|\tau_m - \tau_n| > \delta_{align}$ , застосовується процедура вирівнювання:

- якщо дозволяє ліміт  $TXOP_{limit}$ , до коротшого PPDU додаються «пусті» байти до тих пір, поки його тривалість не зрівняється з довшим. Це знижує спектральну ефективність, але дозволяє передати корисне навантаження без затримок [104].

- якщо Padding неможливий (досягнуто ліміт TXOP), частина даних з довшого PPDU вилючається і переноситься в наступний цикл передачі. Це скорочує  $\tau_{max}$  до рівня  $\tau_{min}$ , забезпечуючи синхронне завершення.

Цей механізм гарантує, що навіть при різких змінах швидкості на одному з каналів, умова одночасного завершення передачі буде виконана, що дозволить безпечно отримати BlockAck на обох інтерфейсах.

Результатом роботи алгоритму є сформована матриця  $A(t) = \langle B, \tau \rangle$ , яка передається на рівень драйвера, де:

- вектор B (Payload Allocation) містить інструкції для контролера MAC щодо фрагментації черг, а саме скільки саме байт з кожної черги взяти для формування агрегованого кадру (A-MPDU) на кожному конкретному лінку, що фактично реалізує механізм динамічного розщеплення потоку (Dynamic Striping);

- вектор  $\tau$  (TXOP Duration) використовується для налаштування таймерів NAV (Network Allocation Vector). Встановлення точного значення  $\tau$  дозволяє резервувати середовище рівно на необхідний час, мінімізуючи накладні витрати на захисні інтервали.

#### **4.3. Верифікація ефективності методики розподілу ресурсів шляхом порівняння з базовими методами**

Для підтвердження практичної цінності та ефективності розробленої методики розподілу ресурсів необхідно провести порівняльний аналіз із існуючими методами керування доступом.

Сучасний ринок чіпсетів Wi-Fi 7 представлений рішеннями таких провідних виробників, як Qualcomm, Broadcom, MediaTek, які реалізують підтримку MLO на рівні мікропрограмного забезпечення (Firmware). Однак, використання їхніх

напрацювань як прямого еталона для порівняння у даному дослідженні є неможливим з огляду на наступні фактори:

1) Алгоритми розподілу трафіку в комерційних чіпсетах є інтелектуальною власністю виробників і реалізовані у вигляді вбудованого програмного забезпечення, недоступних для аналізу чи модифікації. Це унеможливорює точне відтворення їхньої логіки в математичній моделі.

2) Аналіз відкритих драйверів (зокрема, підсистеми mac80211 у ядрі Linux) свідчить, що більшість поточних реалізацій використовують спрощені стратегії типу “First Available” (надсилання пакету у перший вільний лінк) або “Round Robin”.

3) Комерційні драйвери зазвичай оперують даними канального рівня (Buffer Status, довжина черги), ігноруючи детальні метрики фізичного рівня (такі як запропонована інтегральна метрика  $q_l$ ) або динамічні апаратні обмеження NSTR у реальному часі. Тому реакція на погіршення каналу відбувається вже після втрати пакетів.

Відповідно, для коректної верифікації розробленої методики доцільно порівнювати її не з конкретними закритими пропрієтарними реалізаціями виробників, а з еталонними моделями доступу, які стандартизовані в IEEE або є загальноприйнятими в дослідженнях.

Для експериментальної верифікації ефективності розробленої методики використано імітаційне моделювання у середовищі MATLAB [105] із застосуванням інструментарію WLAN Toolbox. Такий підхід дає змогу відтворити функціонування MLD в контрольованих умовах та забезпечити коректне порівняння розробленої методики з відкритими і документованими базовими стратегіями розподілу ресурсів.

Моделювання реалізовано на системному рівні, що дозволяє абстрагуватися від ресурсомісткої посимвольної обробки радіосигналів, фокусуючись на логіці управління доступом. В усіх варіантах порівняння незмінними залишаються параметри фізичного та канального рівнів, а змінюється лише політика розподілу



пакетів і координації використання доступних лінків на рівні планувальника Upper-MAC.

Архітектура імітаційної моделі відтворює роботу багатоканального пристрою з двома активними радіоінтерфейсами. Функціонування системи побудовано за принципом поділу подій у часі з дискретним кроком моделювання, що дорівнює тривалості одного базового слота. Замість повної симуляції радіохвиль, успішність передачі та відсоток втрачених пакетів визначаються у моделі імовірнісними функціями на основі поточного стану каналу (SINR) та обраної схеми модуляції і кодування (MCS). Для формування фізичної асиметрії, характерної для реальних гетерогенних мереж, застосовано конфігурацію, де перший лінк функціонує у діапазоні 2.4 ГГц зі звуженою смугою, а другий у діапазоні 5 ГГц із максимально широкою смугою. Обидва інтерфейси підтримують просторове мультиплексування MIMO 2x2 та спираються на стандартну процедуру конкурентного доступу EDCA з індивідуальними параметрами вікон конкуренції. Таке співвідношення пропускних здатностей усуває ідеальні умови та дозволяє об'єктивно оцінити здатність алгоритмів утилізувати широкі канали без перевантаження вузьких.

Вхідне навантаження генерується за пуассонівським розподілом пакетами фіксованого розміру. У моделі всі згенеровані пакети початково накопичуються у спільних чергах рівня U-MAC, звідки планувальник вилучає їх для передачі на конкретний інтерфейс. Застосовано асиметричний профіль трафіку з домінуванням даних реального часу в якому відеоконтент (AC\_VI) та голосовий трафік (AC\_VO) складають більшість потоку, залишаючи мінімум ємності для фонових даних. Кожен згенерований пакет отримує часову мітку надходження та індивідуальний дедлайн відповідно до своєї категорії доступу. У кожному слоті моделювання виконується перевірка черг і пакети, час очікування яких перевищив встановлений дедлайн до моменту отримання доступу до середовища, автоматично вилучаються з системи, що прямо імітує реальні втрати QoS для RTA-трафіку під час перевантажень буферів.

Процес формування агрегованих кадрів (A-MPDU) на рівні Lower-MAC обмежено максимальним обсягом даних та лімітованою кількістю пакетів (MPDU) в одному кадрі. При роботі в режимі неодноразової передачі та приймання (NSTR) ці обмеження є критичними. Широкопasmовий лiнк вичерпує лiмiт пакетiв значно швидше за вузькопasmовий, що спричиняє розсинхронiзацiю часу завершення передач. Для вiдтворення даної особливостi у моделi реалiзовано алгоритм примусового вирiвнювання де загальний час транзакцiї для NSTR-пари визначається за найповiльнiшим лiнком, а швидкий лiнк доповнюється службовими даними (Padding). Додатково реалiзовано блокування таймерiв вiдстрочки для режиму NSTR, якщо хоча б один канал детектується як зайнятий, процедура вiдстрочки «заморожується» для обох лiнкiв одночасно.

Дослiдження проводиться в дiапазонi iнтенсивностi вхiдного навантаження, що охоплює майже вiльний стан системи, точку переходу в насичення та стан екстремального перевантаження. З метою забезпечення статистичної значущостi результатiв та нiвелювання впливу псевдовипадкових флуктуацiй генератора, на кожному рiвнi навантаження виконується серiя з 30 незалежних прогонiв (метод Монте-Карло). Ключовим рiшенням для забезпечення об'єктивного порiвняння є використання фiксованого seed-значення генератора для всiх дослiджуваних алгоритмiв. Це гарантує, що кожна стратегiя розподiлу стикається з абсолютно iдентичною послiдовнiстю надходження пакетiв та однаковими моментами виникнення завад. Оцiнювання ефективностi здiйснюється за метриками загальної утильованої пропускнуї здатностi та середньої наскрiзної затримки доставки пакетiв. Кiлькiсні значення параметрiв та обмежень, застосованих у процесi iмiтацiйного моделювання, зведено у таблицю 4.2.

Табл. 4.2 Основні параметри імітаційного моделювання

Назва параметра	Значення
Кількість задіяних лiнкiв	2
Робочий дiапазон Лiнка 1	2.4 ГГц

Ширина смуги Лінка 1	40 МГц
Робочий діапазон Лінка 2	5 ГГц
Ширина смуги Лінка 2	160 МГц
Кількість просторових потоків (MIMO)	2
Тривалість базового слота канального рівня	9 мкс
Тривалість короткого міжкадрового інтервалу (SIFS)	16 мкс
Тривалість фізичної преамбули ЕНТ	44 мкс
Тривалість кадру підтвердження BlockAck	68 мкс
Параметри EDCA для голосового трафіку AC_VO (AIFSN, CW <sub>min</sub> , CW <sub>max</sub> )	2, 3, 7 слоти
Параметри EDCA для відеотрафіку AC_VI (AIFSN, CW <sub>min</sub> , CW <sub>max</sub> )	2, 7, 15 слоти
Параметри EDCA для трафіку AC_BE (AIFSN, CW <sub>min</sub> , CW <sub>max</sub> )	3, 15, 1023 слоти
Параметри EDCA для фонових трафіку AC_BK (AIFSN, CW <sub>min</sub> , CW <sub>max</sub> )	7, 15, 1023 слоти
Максимальна тривалість передачі (ліміт TXOP для AC_VI)	4.08 мс
Максимальний обсяг даних агрегованого кадру (A-MPDU)	1 048 575 байт
Апаратний ліміт кількості пакетів в одному A-MPDU	256 MPDU
Допустима похибка вирівнювання часу завершення передач (NSTR)	8 мкс
Розмір пакета даних (MSDU)	1500 байт
Частка пріоритетного трафіку (відео AC_VI та голос AC_VO)	80 %
Частка фонових трафіку (AC_BE та AC_BK)	20 %
Діапазон інтенсивності вхідного навантаження	500 – 3500 Мбіт/с
Тривалість однієї реалізації симуляції	50 мс
Кількість незалежних прогонів (метод Монте-Карло)	30 шт.

Для забезпечення об'єктивності порівняльного аналізу як базові реалізації обрано три стратегії, які відображають основні підходи до керування доступом у MLD: Static TID-to-Link Mapping, Packet-Level Striping та Independent EDCA. Вибір саме цих стратегій обумовлений тим, що вони є відтворюваними в моделі, спираються на стандартизовані або загальноприйняті принципи керування доступом і дозволяють порівнювати запропоновану методику з рішеннями, що не використовують адаптивну оцінку стану каналів.

У варіанті **Static TID-to-Link Mapping** (Рис. 4.2, Рис. 4.3) пакети після класифікації за TID спрямовуються до черги заздалегідь визначеного лінка

відповідно до фіксованої таблиці зіставлення. Після встановлення такого зіставлення вибір лінка не коригується залежно від поточного стану каналу, довжини черги або результатів попередніх передач. У моделі MATLAB ця стратегія реалізується як зовнішній модуль передачі пакетів перед входом до MAC-черг, а подальше обслуговування виконується штатними механізмами кожного лінка.

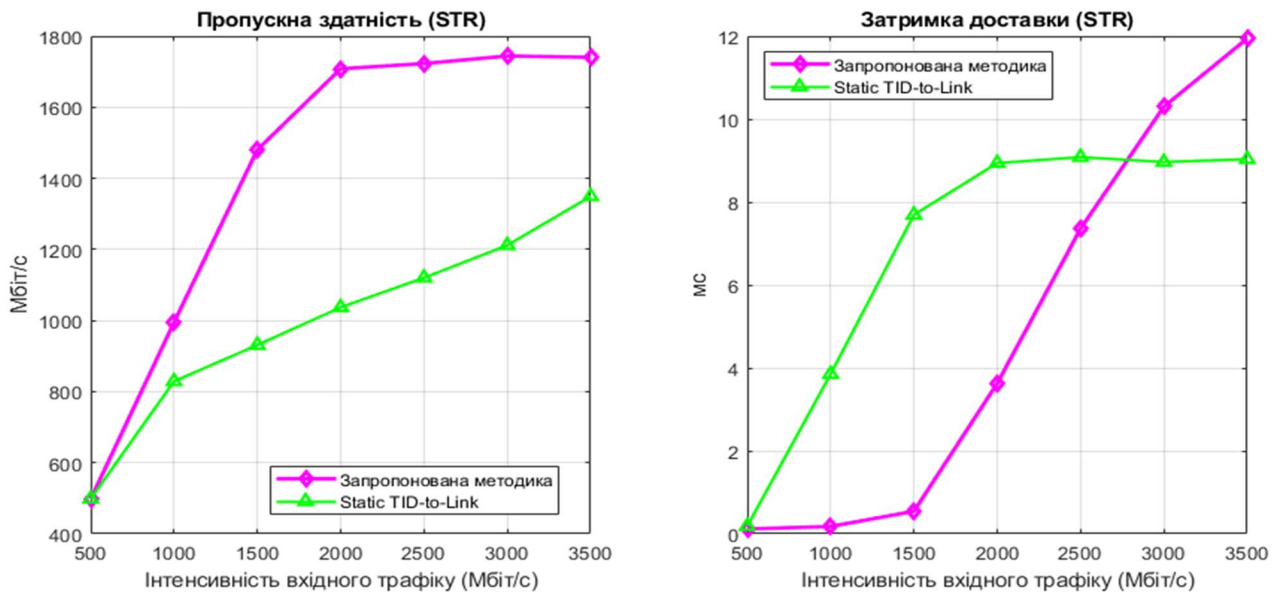


Рис. 4.2 Результат емуляції запропонованої методики у порівнянні з політикою Static TID-to-Link Mapping в режимі STR

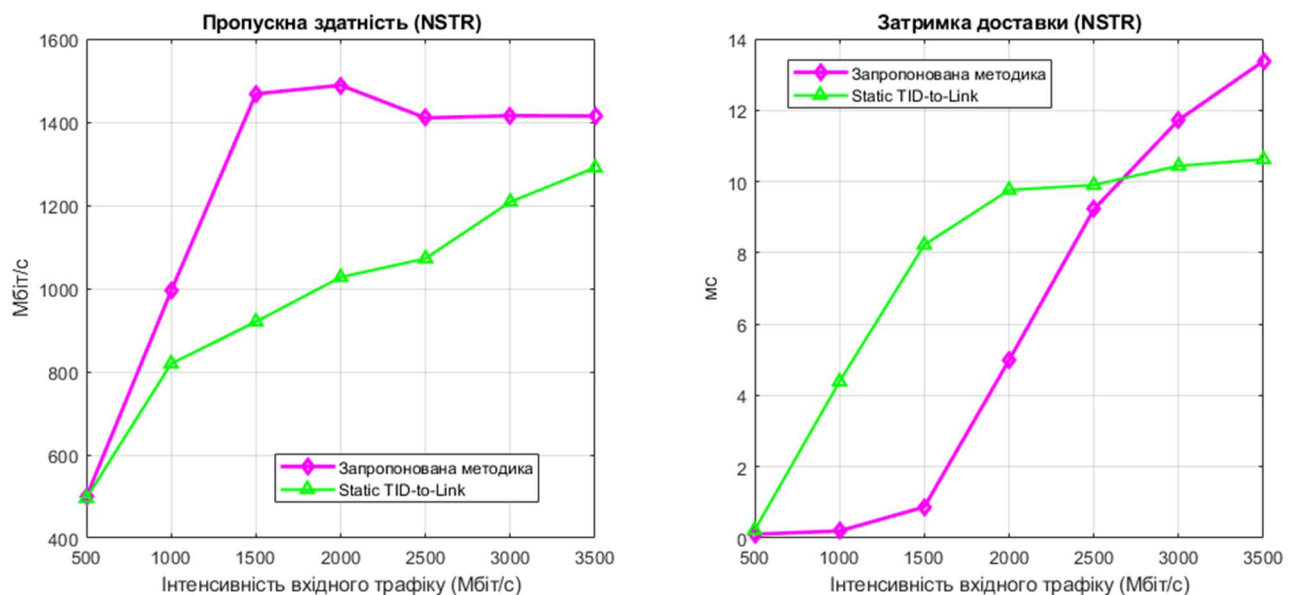


Рис. 4.3 Результат емуляції запропонованої методики у порівнянні з політикою Static TID-to-Link Mapping в режимі NSTR

Для **Packet-Level Striping** розподіл пакетів між лінками здійснюється циклічно (Рис. 4.4, Рис. 4.5), без урахування поточних характеристик каналу, рівня завантаження радіоресурсу, довжин черг або повторних передач. У такому разі кожен наступний пакет спрямовується на інший лінк за детермінованим правилом чергування, після чого обраний лінк незалежно виконує агрегацію кадрів і конкурентний доступ до середовища. Подібний підхід до циклічного розподілу пакетів використовується у відкритих програмних стеках бездротового доступу, зокрема в реалізаціях на базі Linux mac80211 [106], де планувальник узгоджує обслуговування передавальних черг без урахування поточного стану радіоканалу на кожному лінку. У моделі цей алгоритм реалізується як попередній етап оброблення вхідного потоку перед постановкою пакетів у черги відповідних лінків.

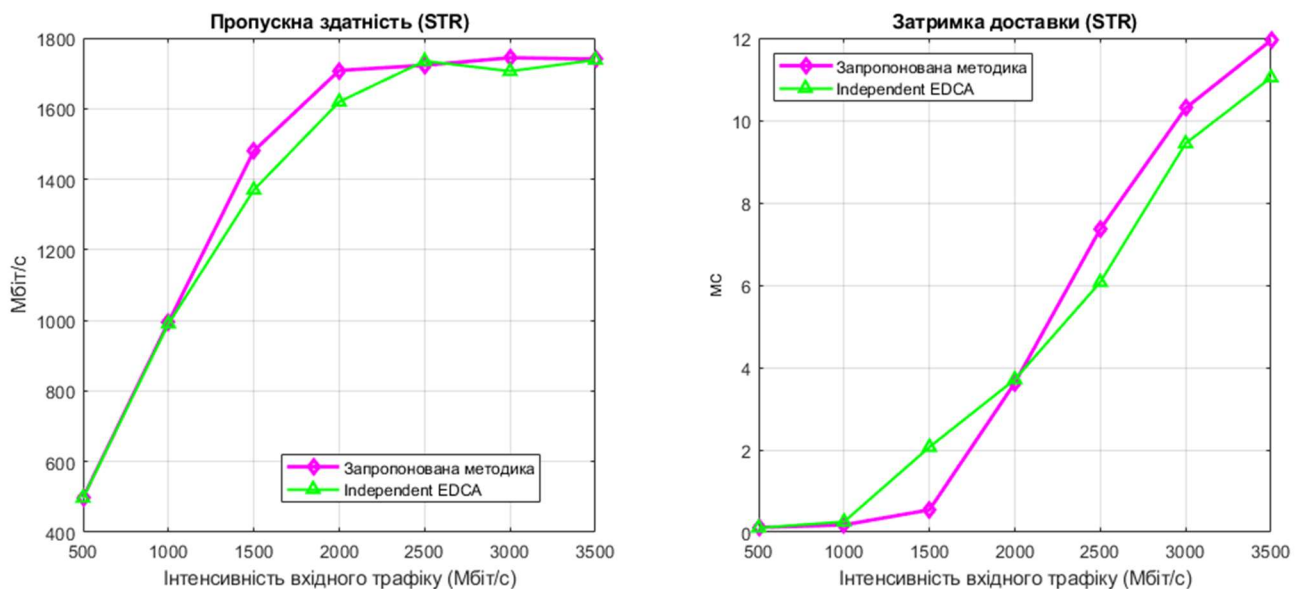


Рис. 4.4 Результат емуляції запропонованої методики у порівнянні з політикою Packet-Level Striping в режимі STR

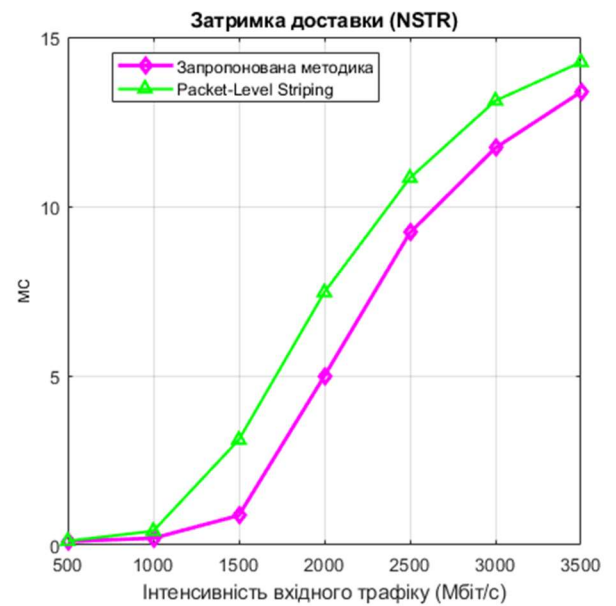
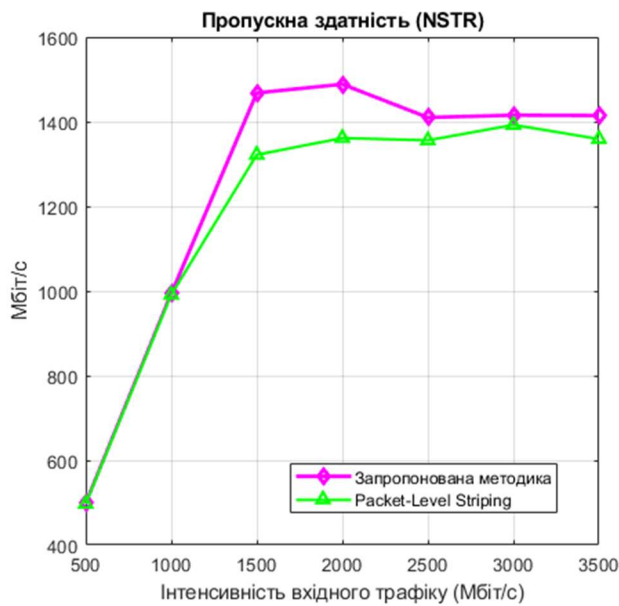


Рис. 4.5 Результат емуляції запропонованої методики у порівнянні з політикою Packet-Level Striping в режимі NSTR

У варіанті **Independent EDCA** кожен лінк MLD функціонує як автономний MAC-екземпляр із власними чергами категорій доступу, параметрами конкуренції та процедурою backoff (Рис. 4.6, Рис. 4.7). У межах цієї моделі момент початку передачі визначається локальним станом відповідного лінка і не координується з іншими лінками того самого пристрою [107]. Для режиму STR це означає, що доступ до середовища формується асинхронно на кожному лінку, а розподіл переданих пакетів визначається локальними умовами роботи окремих черг. Реалізація такого підходу в MATLAB спирається на стандартну системнорівневу модель WLAN Toolbox, у якій кожен лінк має власні MAC-функції.

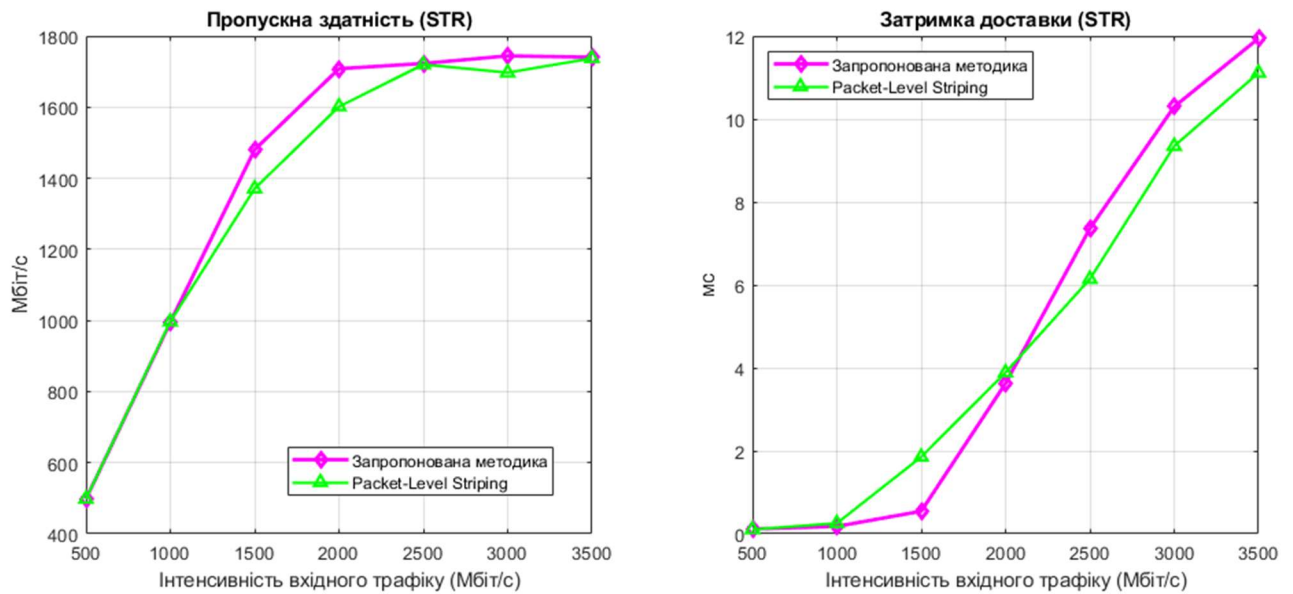


Рис. 4.6 Результат емуляції запропонованої методики у порівнянні з політикою Independent EDCA в режимі STR

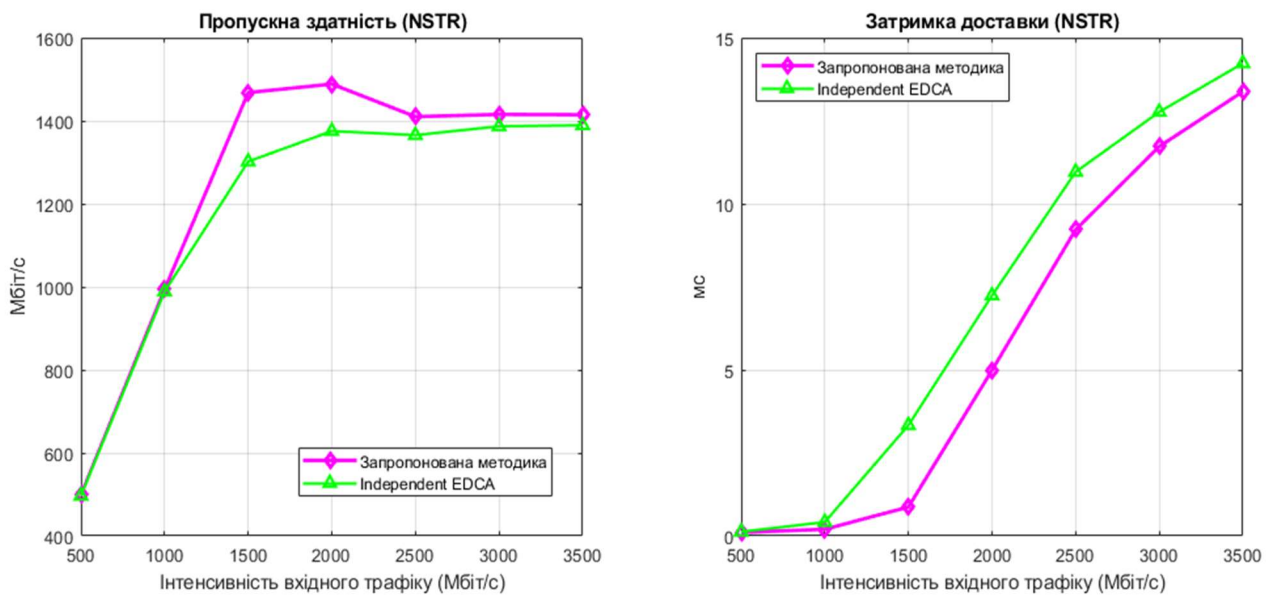


Рис. 4.7 Результат емуляції запропонованої методики у порівнянні з політикою Independent EDCA в режимі NSTR

Запропонований метод верифікується в тій самій моделі та за тих самих початкових умов, що й базові стратегії, однак на відміну від них рішення про розподіл пакетів між лінками формується з урахуванням поточного стану каналів, характеристик трафіку та апаратних обмежень синхронізації. У структурі моделі це відповідає введенню керуючого модуля (Рис. 4.1) над стандартними механізмами MAC-рівня, який на кожному кроці приймає рішення про доцільний

розподіл навантаження між доступними лінками. Така організація порівняння дозволяє відокремити ефект саме політики керування ресурсами від впливу допоміжних механізмів фізичного й каналного рівнів.

У межах верифікації для всіх досліджуваних стратегій формуються однакові профілі навантаження та однакові сценарії функціонування мережі, що дає змогу коректно зіставити значення пропускної здатності, затримки доставки та показників дотримання часових обмежень.

#### **4.4. Висновки до розділу 4**

У четвертому розділі розроблено концепцію замкненого циклу керування що послідовно реалізує етапи моніторингу та оцінки стану каналів, профілювання та прогнозування навантаження, а також оптимізації розподілу ресурсів. Цю концепцію було запропоновано для переходу від статичних схем управління до безперервної адаптації пристрою під поточні умови радіосередовища. Що в результаті це може запропонувати підґрунтя для узгодженого динамічного управління радіоресурсами між кількома радіоінтерфейсами.

Для практичної реалізації етапу прогнозування навантаження у загальному циклі керування застосовано модель оцінки часових витрат на передачу для трансформації детермінованих параметрів фізичного рівня (A-MPDU, преамбула, MCS) та характеристик конкурентного доступу (EDCA) у конкретні значення ефірного часу. Її впровадження в алгоритм дозволило системі керування відмовитися від розподілу абстрактних обсягів даних і перейти до прямого планування необхідного часового ресурсу для кожного потоку на кожному лінку.

З метою гарантування коректності згенерованих рішень, простір допустимих станів імплементовано в методику як систему математичних фільтрів. На етапі розрахунку матриці розподілу ці обмеження та критичні умови синхронізації NSTR застосовуються для автоматичного відсіювання апаратно несумісних варіантів. Таке використання простору обмежень гарантує стовідсоткову фізичну реалізованість знайдених керуючих дій в умовах архітектури MLO.

Пошук розподілу в межах відфільтрованого простору реалізовано шляхом виконання триетапного алгоритму. Алгоритм застосовує детерміновану



послідовність кроків: пріоритетне сортування потоків і лінків, пропорційний розподіл навантаження та фінальну корекцію для виконання NSTR-синхронізації. Впровадження цього алгоритму дозволило замінити ресурсомісткі ітеративні обчислення на швидку процедуру, що адаптована під специфіку MAC-рівня і забезпечує генерацію матриці керування в режимі реального часу.

З метою верифікації розробленої методики та алгоритму виконано порівняльний аналіз із базовими стратегіями розподілу ресурсів шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB з використанням WLAN Toolbox. В результаті було отримано масив графічних даних, який створив підґрунтя для кількісного вимірювання ефективності запропонованого рішення в умовах різного ступеня завантаженості мережі.

Узагальнений аналіз результатів свідчить, що запропонований алгоритм демонструє ефективність у діапазоні середніх та високих навантажень. Усереднені показники вказують на те, що в режимі NSTR розроблений метод забезпечує стабільне підвищення пропускної здатності в середньому на 7–10% порівняно з базовими стратегіями, а також затримок з 2-3 мс до 1 мс, що прийнятно для RTA-трафіку.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічну задачу підвищення пропускної здатності багатоканальних бездротових мереж стандарту IEEE 802.11be шляхом розробки методів узгодженого управління радіоресурсами.

Встановлено, що в умовах зростання навантаження, фрагментації спектра та обмежень MLO, традиційні локальні підходи до вибору каналу є обмеженими і не забезпечують необхідної продуктивності. Систематизація чинників міжлінкової взаємодії в архітектурі багатоканального пристрою довела, що підвищення ефективності передавання визначається не окремими параметрами фізичного рівня, а узгодженістю управління радіоресурсами на рівні MAC.

Удосконалено методику багатокритеріального оцінювання стану каналів та розроблено математичну модель спектральної конфігурації багатоканального пристрою. На відміну від існуючих підходів, запропоновані рішення ґрунтуються на впровадженні інтегрованого показника якості та вагових коефіцієнтів, які комплексно формалізують доступність радіоресурсу, якість радіолінки, рівень інтерференції, ширину смуги, розподіл ресурсних одиниць та вплив пристроїв попередніх поколінь Wi-Fi. Що дозволяє автоматизувати динамічний вибір оптимальних частотних конфігурацій безпосередньо в пристроях для підвищення стабільності з'єднання у щільно завантаженому спектрі.

Вперше розроблено математичну модель розподілу трафіку для багатоканального пристрою, яка описує його як єдину систему масового обслуговування з дискретизацією часу за циклами прийняття рішень у стохастичному середовищі. Завдяки формалізації стану системи через вектор нормованих метрик лінків і параметрів черг, а також визначенню простору допустимих рішень з урахуванням обмежень режимів MLO, політики розподілу трафіку представлено як відображення стану у керуюче рішення. Встановлено аналітичний зв'язок між параметрами керування та показниками якості обслуговування, що дозволяє оцінювати ефективність та приймати обґрунтовані

рішення про доцільність використання конкретних політик розподілу на рівні МАС.

Вперше розроблено метод розподілу ресурсів між каналами багатоканального пристрою, який реалізує замкнений цикл динамічного керування на підрівні U-MAC. Метод інтегрує результати моніторингу радіосередовища та модель розподілу трафіку за рахунок поєднання профілювання потоків за категоріями доступу, прогнозування часу зайнятості ефіру та оптимізації матриці розподілу навантаження. Доведено, що оптимізація за критерієм мінімізації максимального часу завершення передачі в умовах динамічної зміни стану каналів забезпечує узгоджене керування інтерфейсами, яке є необхідним для досягнення цільових показників пропускної здатності та затримки.

Експериментальна верифікація підтвердила, що підвищення ефективності багатоканальних мереж IEEE 802.11be безпосередньо досягається за рахунок впровадження розробленого узгодженого управління радіоресурсами. Доведено, що застосування запропонованих рішень забезпечує підвищення сумарної пропускної здатності пристрою в середньому на 7–10 % та зменшення середньої затримки доставки пакетів з 2–3 мс до 1 мс.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропоновані математична модель та методи є основою для програмного забезпечення контролерів доступу до середовища в пристроях Wi-Fi 7. Їх інтеграція на рівні МАС дозволяє автоматизувати динамічний вибір частотних конфігурацій та балансування навантаження, що гарантує виконання вимог щодо якості обслуговування

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Д. Табор, “Оцінка ключових можливостей бездротової мережі Wi-Fi 7 покоління” Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 4, с. 297–307, 2024, doi: 10.31891/2219-9365-2024-80-37.
2. Д. Табор, “Порівняння режимів доступу багатоканальних пристроїв в мережі IEEE 802.11be” Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 1, с. 250–259, 2025, doi: 10.31891/2219-9365-2025-81-31.
3. Д. І. Табор, “Адаптивний алгоритм зміни каналу для багатоканального пристрою Wi-Fi 7 в умовах гетерогенних мереж” Наукові записки ДУІКТ, № 1 (7), с. 46-51, 2025, doi: 10.31673/2786-8362.2025.011691.
4. Д. Табор, “Методика розподілу ресурсів у багатодіапазонних бездротових мережах із пріоритетизацією трафіку” Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 3, с. 171–175, 2025, doi: 10.31891/2219-9365-2025-83-22.
5. Д. Табор, “Метод математичного моделювання розподілу трафіку в багатолінкових пристроях” Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, №1 (9). с. 62-70, 2026, doi: 10.31673/2786-8362.2026.012742.
6. Spirent Communications, “Navigating Wi-Fi 7: A Deep Dive into Next-Gen Advancements” White Paper, 2023. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн].  
Доступно:  
[https://assets.ctfassets.net/wcxs9ap8i19s/14OgnP401hzNOT7qNvKLXy/43b58ab1a7dec576c82296f2a452ec6a/WP\\_Navigating\\_Wi-Fi\\_7\\_RevA.pdf](https://assets.ctfassets.net/wcxs9ap8i19s/14OgnP401hzNOT7qNvKLXy/43b58ab1a7dec576c82296f2a452ec6a/WP_Navigating_Wi-Fi_7_RevA.pdf)
7. S. S. Murad et al., “Introduction to Wi-Fi 7: A Review of History, Applications, Challenges, Economical Impact and Research Development” Mesopotamian J. of Computer Science, № 2024, с. 128–139, 2024, doi: 10.58496/MJCSC/2024/009.
8. J. Wen, C. Pettersson, S. Max, K. Won Sung, S. Ben Slimane, “Wi-Fi Performance Evaluation in Industrial Scenarios” у 2025 IEEE 21st International

Conference on Factory Communication Systems (WFCS), Rostock, Germany, 10-13 June 2025, doi: 10.1109/WFCS63373.2025.11077610.

9. M. Rosani et al., “A Software Platform for Testing Multi-Link Operation in Industrial Wi-Fi Networks“ y 2024 IEEE 20th WFCS, 2024, c. 1–8, doi: 10.48550/arXiv.2411.12077.

10. T. Adame, M. Carrascosa-Zamacois, and B. Bellalta, “Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7“ Sensors, т. 21, № 15, с. 4954, 2021, doi: 10.3390/s21154954.

11. L. Fanari et al., “Comparison between Different Channel Coding Techniques for IEEE 802.11be within Factory Automation Scenarios“ Sensors, т. 21, № 21, с. 7209, 2021, doi: 10.3390/s21217209.

12. M. Shaikh et al., “Assessing Efficiency of Handoff Techniques for Acquiring Maximum Throughput into WLAN“ IJCSNS Int. J. of Computer Science and Network Security, т. 23, № 4, с. 172, 2023 , doi:10.22937/IJCSNS.2023.23.4.23.

13. M. Hassan, "Wireless and Mobile Networking", CRC Press, 2022, doi: 10.1201/9781003042600.

14. S. Muhammad, J. Zhao, and H. H. Refai, “An Empirical Analysis of IEEE 802.11ax“ y 2020 IEEE 17th Annual CCNC, с. 1–6, 2020, doi: 10.1109/ICCSPA49915.2021.9385748.

15. C. Cordeiro, “Wi-Fi Unleashed: Wi-Fi 7, 6 GHz, and Beyond“, Intel Corporation, 2022, Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://www.intel.com/content/dam/www/central-libraries/us/en/documents/2022-06/wi-fi-tutorial-long.pdf>

16. IEEE, “IEEE Draft Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 8: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT)“ IEEE P802.11be/D3.0, 2023.

17. A. Garcia-Rodriguez, D. López-Pérez, L. Galati-Giordano, and G. Geraci, “IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back” IEEE Commun. Magazine, т. 59, № 4, с. 102–108, 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000711.
18. D. N. Tse, “Optimal Power Allocation over Parallel Gaussian Broadcast Channels” y Proceedings of IEEE Int. Symp. on Information Theory, 1997, с. 27, doi: 10.1109/ISIT.1997.612942.
19. B. Bellalta, M. Carrascosa, L. Galati-Giordano, and G. Geraci, “Delay Analysis of IEEE 802.11be Multi-link Operation under Finite Load” IEEE Trans. on Wireless Commun., 2023, doi: 10.1109/LWC.2023.3235001.
20. M. Carrascosa-Zamacois, L. Galati-Giordano, A. Jonsson, G. Geraci, and B. Bellalta, “Performance and Coexistence Evaluation of IEEE 802.11be Multi-link Operation” y 2023 IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC), с. 1–6, 2023, doi: 10.1109/WCNC55385.2023.10118829.
21. Y. Zou, M. Shen, H. Yin, and Y. Gao, “Delay Analysis of Multi-Link Devices Coexisting with Single-Link Devices in Wi-Fi 7” y 2024 IEEE GLOBECOM, 2024, с. 1–6.
22. S. George, A. S. H. George, and T. Baskar, “Wi-Fi 7: The Next Frontier in Wireless Connectivity” PUIIJ, т. 1, № 4, с. 1–15, 2023, doi: 10.5281/zenodo.8266217.
23. M. Tejedor-Romero, J. M. Gimenez-Guzman, L. Cruz-Piris, D. Herranz-Oliveros, and I. Marsa-Maestre, “Optimal channel assignment on dense Wi-Fi networks using Thermodynamic Threshold Accepting” Eng. Science and Technology, an Int. J., т. 57, p. 101797, 2024 , doi:10.1016/j.jestch.2024.101797.
24. Cisco, “Wi-Fi 7 and the Growing Future of Wireless: Design Guide” 2024. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/networking/wireless/wifi7-future-of-wireless-dg.html>
25. X. Liu et al., “IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation” IEEE Commun. Standards Magazine, с. 1–7, 2025, doi: 10.48550/arXiv.2309.15951.

26. G. Z. Islam and M. A. Kashem, “Efficient resource allocation in the IEEE 802.11ax network leveraging OFDMA technology“ J. of King Saud University - Computer and Info. Sciences, т. 34, № 6, с. 2488–2496, 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2020.10.019.
27. M. Natkaniec and N. Bieryt, “An Analysis of the Mixed IEEE 802.11ax Wireless Networks in the 5 GHz Band“ Sensors, т. 23, № 10, с. 4964, 2023, doi: 10.3390/s23104964.
28. Wi-Fi Alliance, “Wi-Fi CERTIFIED 7 Test Plan“ v1.3, Austin, TX, USA, 2024.
29. Deng, C., Fang, X., Han, X., Wang, X., Yan, L., He, R., Long, Y., & Guo, Y. “IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities“ IEEE Communications Surveys & Tutorials, № 22(4), с. 2136–2166, 2020, doi:10.1109/comst.2020.3012715.
30. D. Medda, A. C. Iosifidis, P. Chatzimisios, and F. J. Velez, “Investigating Inclusiveness and Backward Compatibility of IEEE 802.11be Multi-link Operation“ 2022 IEEE CSCN, 2022, с. 182–187, doi: 10.1109/CSCN57023.2022.10050957.
31. S. Jung, S. Choi, Y. Yoon, H. Son, and H. Kim, “Modeling and Analysis of Coexistence Between MLO NSTR-based Wi-Fi 7 and Legacy Wi-Fi“ arXiv preprint, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2509.01201.
32. H. Otani et al., “Experimental evaluation of transmission link selection in IEEE 802.11be multi-link operation“ IEICE Commun. Express, т. 12, № 9, с. 528–532, 2023, doi: 10.1587/comex.2023XBL0088.
33. Á. López-Raventós and B. Bellalta, “IEEE 802.11be Multi-Link Operation: When the Best Could Be to Use Only a Single Interface“ MedComNet, 2021, с. 1–7, doi: 10.1109/MedComNet52149.2021.9501237.
34. L. Zhang, “Optimized Resource Allocation in Mobile Edge Communication, 5G data multiplexing, and WiFi Channel Access“ Ph.D. Dissertation, University of Washington, 2023, Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://digital.lib.washington.edu/server/api/core/bitstreams/f6649089-4fe7-4b0d-8625-5219f065d2b5/content>
35. M. Haidar, R. Ghimire, H. Al-Rizzo, R. Akl, and Y. Chan, “Channel assignment in an IEEE 802.11 WLAN based on signal-to-interference ratio“ 2008 Canadian Conf.

on Electrical and Computer Eng., 2008, c. 1131–1134, doi: 10.1109/CCECE.2008.4564722.

36. Á. López-Raventós and B. Bellalta, “Dynamic Traffic Allocation in IEEE 802.11be Multi-link WLANs“ IEEE Wireless Commun. Letters, т. 11, № 7, c. 1404–1408, 2022, doi: 10.1109/LWC.2022.3171442.

37. L. Zhang, H. Yin, S. Roy, L. Cao, X. Gao, and V. Sathya, “IEEE 802.11be Network Throughput Optimization with Multi-Link Operation and AP Controller“, IEEE Internet of Things Journal, т. 11, № 13, 01 July 2024, c. 23850 – 23861, 2024, doi: 10.1109/IIOT.2024.3386653.

38. T. Song and T. Kim, “Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs“ Applied Sciences, т. 11, № 1, c. 317, 2021, doi:10.3390/app11010317.

39. D. S. Rao and V. B. Hency, “Performance evaluation of congestion aware transmission opportunity scheduling scheme for 802.11 wireless LANS“ Int. J. of Intelligent Networks, № 2, c. 34–41, 2021, doi:10.1016/j.ijin.2021.04.001.

40. L. Kwon and E.-C. Park, “Contention-Less Multi-Link Synchronous Transmission for Throughput Enhancement and Heterogeneous Fairness in Wi-Fi 7“ Sensors, т. 24, № 11, c. 3642, 2024, doi: 10.3390/s24113642.

41. M. Carrascosa, G. Geraci, E. Knightly, and B. Bellalta, “Wi-Fi Multi-Link Operation: An Experimental Study of Latency and Throughput“ IEEE/ACM Trans. on Networking, 2023, doi: 10.1109/TNET.2023.3283154.

42. M. Carrascosa, G. Geraci, E. Knightly, and B. Bellalta, “An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation“ 2022 IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC), 2022, c. 1–6, doi: 10.1109/ICC45855.2022.9838765.

43. S. Lian, J. Tong, J. Zhang, and L. Fu, “Intelligent Channel Allocation for IEEE 802.11be Multi-Link Operation: When MAB Meets LLM“, doi: 10.1109/JSAC.2025.3584496.

44. M. Fidler, J. Champati, J. Widmer, and M. Noroozi, “Statistical Age-of-Information Bounds for Parallel Systems: When Do Independent Channels Make a Difference?“ 2021, doi: 10.48550/arXiv.2303.14035.



45. M. Alsakati, J. Gross, C. Pettersson, S. Max, and V. N. Moothedath, “Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with Multi-Link Operation on AR Applications“ in 2023 IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC), 2023, c. 1–6, doi: 10.1109/WCNC55385.2023.10118866.
46. Á. López-Raventós and B. Bellalta, “Multi-link Operation in IEEE 802.11be WLANs“ IEEE Wireless Commun., т. 29, № 4, c. 114–120, 2022, doi:10.1109/MWC.006.2100404.
47. G. Cena, M. Rosani, and S. Scanzio, “Packet Steering Mechanisms for MLO in Wi-Fi 7“ 2024 IEEE 29th Int. Conf. on Emerging Tech. and Factory Automation (ETFA), 2024, c. 1–8, doi: 10.1109/ETFA61755.2024.10710726.
48. G. Onalan, M. H. Kurtoglu, and E. Soyak, “Passive Side-Channel Interference Estimation for WiFi Networks“ 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2021, c. 1–6, doi: 10.1109/PIMRC50174.2021.9569396.
49. G. Naik, S. Bhattarai, and J.-M. Park, “Performance Analysis of Uplink Multi-User OFDMA in IEEE 802.11ax“ y 2018 IEEE ICC, 2018, c. 1–6.
50. D. Mandić, “Early stage performance analysis of the IEEE 802.11be standard,” Bachelor’s thesis, Faculty of Computer and Information Science, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia, 2024. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=eng&id=164827>
51. F. O. Ariba, F. K. Ojo, and Z. K. Adeyemo, “Adaptive Radio Access Technology Selection Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks“ ABUAD J. of Eng. Res. and Dev. (AJERD), т. 7, № 2, c. 51–60, 2024, doi: 10.53982/ajer.2024.0702.05-j.
52. B. Schneider, C. Chongaroonngamsaeng, B. Richerzhagen, M. Bahr, and G. Carle, “Deterministic Channel Access Using MU EDCA in OFDMA-based Wi-Fi Networks“ y 2023 IEEE 19th WFCS, 2023, c. 1–8, doi: 10.1109/WFCS57264.2023.10144244.
53. M. Jain, A. Mishra, A. Wiese, and A. Bhattacharya, “A Deadline-Aware Scheduler for Smart Factory using WiFi 6“, 2024 , doi:10.48550/arXiv.2408.12274.

54. M. Natkaniec, Ł. Prasnal, and M. Szymakowski, “A Performance Analysis of IEEE 802.11ax Networks“ *INTL J. of Electronics and Telecom.*, т. 66, № 1, с. 225–230, 2020, doi: 10.24425/ijet.2020.131867.
55. M. Carrascosa-Zamacois, L. Galati-Giordano, F. Wilhelmi, G. Fontanesi, A. Jonsson, and G. Geraci, “Performance Evaluation of MLO for XR Streaming: Can Wi-Fi 7 Meet the Expectations?“ 2024 IEEE 29th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Athens, Greece, 2024, doi: 10.1109/CAMAD62243.2024.10943088.
56. K.-h. Lee and D. Kim, “CFX: Contention-Free Channel Access for IEEE 802.11ax“ *Sensors*, т. 22, № 23, с. 9114, 2022, doi:10.3390/s22239114.
57. B. G. Jayasekara, I. A. M. Balapuwaduge, and F. Y. Li, “Dynamic Sensitivity Control for Mitigating Hidden and Exposed Terminals in WiFi 7 Networks“ 2023 IEEE 19th Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing (WiMob), 2023, с. 1–6, doi: 10.1109/WF-IoT58464.2023.10539466.
58. Huawei, “What Is CSI Sensing?“ *Huawei Enterprise Encyclopedia*, 2025. Дата звернення: 6 березня 2026. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/CSI+Sensing.html>
59. Y. Ma, G. Zhou, and S. Wang, “Hands-on Wireless Sensing with Wi-Fi: A Tutorial“ *Tsinghua University*, 2019. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://tns.thss.tsinghua.edu.cn/~guoxuan/assets/pdf/Paper-Hands-On.pdf>
60. Д. В. Михалевський, “Технічна діагностика безпроводних каналів стандарту 802.11“ *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*, № 2, с. 111–117, 2020, doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-2-111-120.
61. Д. В. Михалевський, “Оцінка параметрів безпроводного каналу передачі інформації стандарту 802.11 Wi-Fi“ *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, т. 6, № 9(72), с. 22–27, 2014, doi: 10.15587/1729-4061.2014.31666.
62. Aruba (HPE), “ARM Coverage and Interference Metrics“ *ArubaOS 8.3.x Web Help*, 2018. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://arubanetworking.hpe.com/techdocs/Archived/AOS->

8/ArubaOS\_83\_Web\_Help/Content/ArubaFrameStyles/ARM/arm\_cover\_interf\_metri  
.htm

63. Aruba (HPE), “Enabling Channel Quality Metric (AirMatch)” Aruba Central Help Center, 2025. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: [https://arubanetworking.hpe.com/techdocs/central/2.5.7/content/nms/apps/airmatch/enbl\\_chnl-qil-mtrc.htm](https://arubanetworking.hpe.com/techdocs/central/2.5.7/content/nms/apps/airmatch/enbl_chnl-qil-mtrc.htm)

64. Cisco, “Cisco Catalyst 9800 Series Wireless Controller Software Configuration Guide, Release 17.15.x” 2024. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/9800/17-15/config-guide/b\\_wl\\_17\\_15\\_cg/m-161-ca-3850-3650-cg.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/9800/17-15/config-guide/b_wl_17_15_cg/m-161-ca-3850-3650-cg.html)

65. Cisco Meraki, “Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide” 2024. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: [https://documentation.meraki.com/Wireless/Design\\_and\\_Configure/Architecture\\_and\\_Best\\_Practices/Wi-Fi\\_7\\_\(802.11be\)\\_Technical\\_Guide](https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_(802.11be)_Technical_Guide)

66. RUCKUS Networks (CommScope), “ChannelFly 2.0: Smart Interference Management” RUCKUS Networks Blog, Oct. 24, 2023. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://www.ruckusnetworks.com/blog/2023/channelfly-2.0>

67. Ruckus Wireless, “ChannelFly: Predictive Capacity Management for Automatic RF Channel Selection” Feature Sheet, 2020. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://webresources.ruckuswireless.com/pdf/feature-sheets/fs-channelfly.pdf>

68. Ubiquiti, “UniFi Channel AI and Automated WiFi Optimization” Ubiquiti Help Center, 2025. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://help.ui.com/hc/en-us/articles/37367741854743-UniFi-Channel-AI-and-Automated-WiFi-Optimization>

69. H. Nguyen et al., “Reinforcement Learning for Optimizing Wi-Fi Access Channel Selection” Computer and Info. Science, т. 1469, Springer, 2021, с. 385–397, doi: 10.1007/978-3-030-88113-9\_27

70. K. Hong, J. P. Kim, M.-S. Kim, and S. Lee, "Channel measurement-based access point selection in IEEE 802.11 WLANs" *Pervasive and Mobile Computing*, т. 29, с. 1–16, 2016, doi:10.1016/j.pmcj.2015.10.018.
71. N. Dawar et al., "Enhancing Wi-Fi 7: Traffic Flow Intelligence and Multi-Link Operation for Optimal Efficiency" *IEEE Access*, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3557435.
72. J. M. Gimenez-Guzman, D. Crespo-Sen, and I. Marsa-Maestre, "A Cluster-Based Channel Assignment Technique in IEEE 802.11 Networks" *Telecom*, т. 1, № 3, с. 268–282, 2020, doi:10.3390/telecom1030016.
73. J. M. Gimenez-Guzman, I. Marsa-Maestre, E. de la Hoz, D. Orden, and D. Herranz-Oliveros, "Channel Selection in Uncoordinated IEEE 802.11 Networks Using Graph Coloring" *Sensors*, т. 23, № 13, с. 5932, 2023, doi:10.3390/s23135932.
74. Z. Zuo, X. Cong, Z. Han, and F. Chang, "Graph Coloring Based Channel Assignment Framework for Rural Wireless Mesh Networks" *Journal of Electronics (China)*, т. 30, № 5, с. 623–626, 2013, doi: 10.1007/s11767-013-3073-7.
75. W. Titus, R. Bansal, T. V. Sreejith, A. A. Kherani, and N. Akhtar, "Decision Problems for Joint Transmission in Multi-AP Coordination Framework of IEEE 802.11be" *y 2021 13th Int. Conf. on COMSNETS*, с. 1–6, 2021, doi: 10.1109/COMSNETS51098.2021.9352818.
76. T. Apavatjirut, "On Optimizing WiFi RSSI and Channel Assignment using Genetic Algorithm for WiFi Tuning" *ECTI Trans. on Electrical Eng., Electronics, and Commun.*, т. 19, № 3, с. 317–325, 2021, doi: 10.37936/ecti-eeec.2021193.244941.
77. Д. В. Михалевський, "Розробка моделі оцінювання основних параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11 з урахуванням дестабілізуючих факторів" *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*, № 1, с. 59-67, 2020, doi: 10.33243/2518-7139-2020-1-1-59-67.
78. Y. Vaizman and H. Wang, "Optimizing Wi-Fi Channel Selection in a Dense Neighborhood" *SCTE Technical J.*, т. 2, № 3, с. 61–72, 2022, doi:10.48550/arXiv.2211.03872.

79. P. E. Iturria-Rivera, M. Chenier, B. Herscovici, B. Kantarci, and M. Erol-Kantarci, “Channel Selection for Wi-Fi 7 Multi-Link Operation via Optimistic-Weighted VDN and Parallel Transfer Reinforcement Learning“, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2307.05419.
80. C.-L. Tai, J. Zhang, D. M. Blough, and R. Sivakumar, “WiHound: Target Tracking with ISAC Using EMLSR in Next-Generation IEEE 802.11 WLANs“ 2024 IEEE 30th LANMAN, 2024, c. 58–63, doi: 10.1109/LANMAN61958.2024.10621897.
81. D. Ergenç and F. Dressler, “An Open Source Implementation of Wi-Fi 7 Multi-Link Operation in OMNeT++“ 2025 20th IEEE/IFIP Wireless On-Demand Network Systems Conf. (WONS), 2025, c. 131–134.
82. A. Abdalhafid, S. K. Subramaniam, Z. A. Zukarnain, and F. H. Ayob, “Multi-Link Operation in IEEE802.11be Extremely High Throughput: A Survey“ IEEE Access, № 12, c. 44349–44371, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3378997.
83. P. E. Iturria-Rivera, M. Chenier, B. Herscovici, B. Kantarci, and M. Erol-Kantarci, “RL meets Multi-Link Operation in IEEE 802.11be: Multi-Headed Recurrent Soft-Actor Critic-based Traffic Allocation“, 2023, doi: 10.1109/ICC45041.2023.10279008.
84. L. Zhang, H. Yin, S. Roy, and L. Cao, “Multiaccess point coordination for next-gen Wi-Fi networks aided by deep reinforcement learning,“ IEEE Syst. J., т. 17, № 1, c. 904–915, doi: 10.1109/JSYST.2022.3183199.
85. S. H. R. Bukhari, M. H. Rehmani, and S. Siraj, “A Survey of Channel Bonding for Wireless Networks and Guidelines of Channel Bonding for Futuristic Cognitive Radio Sensor Networks“ IEEE Commun. Surveys & Tutorials, т. 18, № 2, c. 924–948, 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2504408.
86. X. He et al., “Channel assignment and power allocation for throughput improvement with PPO in B5G heterogeneous edge networks“ Digital Commun. and Networks, 2023, doi: 10.1016/j.dcan.2023.02.018.
87. S. Shao, Z. Wang, S. Xu, S. Guo, and X. Qiu, “Multi-AP Cooperative Radio Resource Allocation Method for Co-Channel Interference Avoidance y 802.11be WLAN“ Computers, Materials & Continua, 2025, doi: 10.32604/cmc.2025.065053.

88. X. Lan, X. Zu, and J. Yang, “Enhanced Multilink Single-Radio Operation for the Next-Generation IEEE 802.11 BE Wi-Fi Systems” *Security and Commun. Networks*, № 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/7018360.
89. M. Han, Z. Chen, and X. Sun, “Bandit-Based Multiple Access Approach for Multi-link Operation in Heterogeneous Dynamic Networks” *IEEE Open J. of the Commun. Society*, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3535619.
90. Intel Corporation, “Product Brief: Intel Wi-Fi 7 BE200 Module” 2024. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://www.intel.com/content/www/us/en/content-details/761674/intel-wi-fi-7-be200-gale-peak-2-product-brief.html>.
91. R. P. F. Hoefel, “IEEE 802.11be (Wi-Fi 7): Performance Evaluation of Transmit Beamforming Transceivers with Multi-User Diversity” у *SBrT 2022*, Minas Gerais, Бразилія, 2022, doi: 10.14209/sbrt.2022.1570820295.
92. W. Murti and J.-H. Yun, “Multilink Operation in IEEE 802.11be Wireless LANs: Backoff Overflow Problem and Solutions” *Sensors*, т. 22, № 9, с. 3501, 2022, doi: 10.3390/s22093501.
93. G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function” *IEEE J. O. Selected Areas in Commun.*, т. 18, № 3, с. 535–547, 2000, doi: 10.1109/49.840210.
94. H. Qi, H. Huang, Z. Hu, X. Wen, and Z. Lu, “On-Demand Channel Bonding in Heterogeneous WLANs: A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach” *Sensors*, т. 20, № 10, с. 2789, 2020, doi: 10.3390/s20102789.
95. M. Carrascosa-Zamacois, G. Geraci, L. Galati-Giordano, A. Jonsson, and B. Bellalta, “Understanding Multi-link Operation in Wi-Fi 7: Performance, Anomalies, and Solutions” *IEEE Commun. Magazine*, т. 61, № 4, с. 136–142, 2023, doi: 10.1109/PIMRC56721.2023.10293865.
96. Zhang, J., Tan, Q., Gao, Y., Sun, X., & Zhan, W. (2024). WiFi 7 with Different Multi-Link Channel Access Schemes: Modeling, Fairness, and Optimization. *IEEE Transactions on Communications*, № 72(10), с. 6225–6236, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3400278.

97. R. Porat, M. Fischer, S. Merlin, S. Vermani, and E. Au, “11ax Evaluation Methodology“ IEEE P802.11 Wireless LANs, Doc. IEEE 802.11-14/0571r12, Jan. 2016. [Онлайн]. Доступно: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0571-12-00ax-evaluation-methodology.docx>
98. D. S. Rao and T. Kafare, Technology And Techniques Behind Wireless Communication. Bhopal, M.P. India, AGPH Books, 2025.
99. MCS Index, “MCS Index Table, Modulation and Coding Scheme Index 11n, 11ac, and 11ax“ MCS Index. Дата звернення: 25 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://mcsindex.com>
100. R. Oliveira, D. Raposo, M. Luis, S. Sargento, and P. Rito, “Optimal channel selection for tri-band Wi-Fi in a residential scenario“ Ad Hoc Networks, № 160, с. 103503, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103503.
101. P. Popovski “Wireless Connectivity: An Intuitive and Fundamental Guide“, Wiley, 2020, doi: 10.1002/9781119114963.
102. W. Ahn, “Novel Multi-AP Coordinated Transmission Scheme for 7th Generation WLAN 802.11be“ Entropy, т. 22, № 12, с. 1366, 2020, doi:10.3390/e22121366.
103. D. Patel, “Cross-Layer Design in Wireless Local Area Networks (WLANs): Issues and Possible Solutions“ Carleton University, 2023, doi: 10.13140/RG.2.2.21413.92644.
104. T. Nabetani and H. Harada, “Full Duplex for IEEE 802.11 Wireless LANs“ IEEE Commun. Standards Magazine, с. 1–7, 2022, doi: 10.36227/techrxiv.21580197.v1
105. The MathWorks, Inc., WLAN Toolbox™ User's Guide, Natick, MA, USA, 2025. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/wlan/wlan\\_ug.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/wlan/wlan_ug.pdf)
106. Linux Wireless “mac80211 - Linux kernel 802.11 wireless stack. The Linux Kernel Organization“, 2024. Дата звернення: 6 березня 2026. [Онлайн]. Доступно: <https://wireless.wiki.kernel.org/en/developers/documentation/mac80211>

107. Chen, C., Chen, X., Das, D., Akhmetov, D., & Cordeiro, C. Overview and Performance Evaluation of Wi-Fi 7. IEEE Communications Standards Magazine, №6(2), c. 12–18, 2022, doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100082.



## ДОДАТКИ

### Акт впровадження результатів дисертаційного досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ



Перший проректор  
Державного університету інформаційно-  
комунікаційних технологій,  
член-кореспондент НАН України,  
доктор технічних наук, професор  
Олександр КОРЧЕНКО  
2025 року

#### АКТ

**впровадження результатів наукових досліджень на тему:**  
**“Методика управління часово-частотними ресурсами для підвищення**  
**пропускної здатності в багатоканальних бездротових мережах”**  
**Табора Дениса Івановича**  
**у наукову та науково-технічну діяльність**  
**Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій**

Комісія в складі:

голови комісії — завідувача кафедри Робототехніки та технічних систем  
Навчально-наукового інституту телекомунікацій, доктора технічних наук,  
професора Мельника Ю.В.;

членів комісії:

завідувача кафедри Телекомунікаційних систем та мереж Навчально-  
наукового інституту телекомунікацій, доктора технічних наук, професора  
Заїки В.Ф.;

професора кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій  
Навчально-наукового інституту телекомунікацій, доктора технічних наук,  
професора Беркман Л.Н.;

заступника директора Інституту проблем штучного інтелекту з наукової  
роботи та міжнародної діяльності Державного університету інформаційно-  
комунікаційних технологій, кандидата технічних наук, професора Дробика О.В.;

завідувача кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій  
Навчально-наукового інституту телекомунікацій, кандидата технічних наук,  
доцента Галаган Н.В.

в період з 18 по 20 листопада 2025 року розглянула надані матеріали та  
встановила, що нові наукові положення, які розроблені особисто Табором Д.І. в  
межах дисертаційного дослідження на тему: “Методика управління часово-  
частотними ресурсами для підвищення пропускної здатності в багатоканальних  
бездротових мережах”, а саме:

- модель розподілу трафіку між каналами, яка дозволяє порівнювати ефективність використання різних політик розподілу в залежності від стану каналів багатокальної мережі;

- методика багатокритеріальної оцінки стану каналів в багатоканальній мережі з використанням інтегрованої метрики якості каналу;

- методика розподілу ресурсів для багатолінкових мереж, яка реалізує механізм оптимізації передачі на основі одночасної обробки даних про часові характеристики трафіку та стан каналів

були використані під час проведення досліджень та підготовки матеріалів науково-дослідної роботи, що виконувалася у Державному університеті інформаційно-комунікаційних технологій за темою “Методи моніторингу продуктивності телекомунікаційних мереж на основі аналізу показників їх якості” (договір № 11/24 від 03.06.2024 р. з ПНВП «Сардер Телеком»),

а також використовуються в навчальному процесі Навчально-наукового інституту телекомунікацій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій при виконанні кваліфікаційних робіт і викладанні навчальних дисциплін «Сенсорні бездротові мережі» та «Проектування телекомунікаційних систем та мереж».

Голова комісії:

доктор технічних наук, професор



Юрій МЕЛЬНИК

Члени комісії:

доктор технічних наук, професор



Віктор ЗАЙКА

доктор технічних наук, професор



Любов БЕРКМАН

кандидат технічних наук, професор



Олександр ДРОБИК

кандидат технічних наук, доцент



Наталія ГАЛАГАН