

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-45>

УДК 004.7:621.39.054:519.713

### КОВДА ЄВГЕН

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0006-8320-9994>

e-mail: [Yevhen.Kovda@infiz.khpi.edu.ua](mailto:Yevhen.Kovda@infiz.khpi.edu.ua)

### СОКОЛ ГАЛИНА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0003-4847-518X>

e-mail: [Halyna.Sokol@khpi.edu.ua](mailto:Halyna.Sokol@khpi.edu.ua)

## АДАПТИВНИЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МАС-ПРОТОКОЛІВ У ДРОВОВИХ І БЕЗДРОВОВИХ МЕРЕЖАХ

У статті запропоновано адаптивний метод оптимізації параметрів МАС-протоколів для дротових і бездротових телекомунікаційних мереж, що враховує стохастичний характер процесу змагання за канал та змінну інтенсивність трафіку. Розроблена математична модель базується на марковому описі доступу до середовища та розширюється марковським процесом прийняття рішень (MDP), який дозволяє формувати оптимальну політику керування параметрами протоколу. Така формалізація забезпечує можливість адаптивної зміни вікна змагання та часу очікування відповідно до прогнозованих характеристик мережі.

Метод оптимізації параметрів МАС-протоколу визначає найкращі значення backoff-процедури, що мінімізують середню затримку та знижують ймовірність колізій за різних режимів навантаження. Оптимальна політика формується на основі розв'язання рівняння Беллмана та враховує залежність продуктивності від поточного стану мережі. Аналітичні співвідношення дозволяють описати вплив адаптивного вибору параметрів на основні показники якості обслуговування і забезпечують основу для практичної реалізації методу у сучасних системах доступу.

**Ключові слова:** МАС-протокол, оптимізація, марковський процес, телекомунікаційна мережа, затримка, продуктивність.

### KOVDA YEVHEN, SOKOL HALYNA

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

## ADAPTIVE METHOD FOR OPTIMIZATION OF MAS PROTOCOLS PARAMETERS IN WIRED AND WIRELESS NETWORKS

The article develops an adaptive method for optimizing MAC protocol parameters for wired and wireless telecommunication networks, aimed at increasing the efficiency of access to a shared environment under conditions of stochastic traffic dynamics and variable load intensity. The relevance of the study is due to the growth of data transmission volumes, the spread of real-time services, IoT applications and heterogeneous network environments, in which traditional algorithms such as CSMA/CA with fixed or semi-adaptive parameters of the contention window do not provide stable quality of service.

The proposed approach is based on the Markov description of the channel competition process and its extension in the form of a Markov decision process (MDP). Such a formalization allows taking into account both the current state of the network and the predicted evolution of traffic intensity and collision probability. Within the model, a set of states, actions and a reward function are defined, reflecting the trade-off between delay, number of retransmissions and throughput. The optimal policy for controlling the parameters of the backoff procedure is formed by solving the Bellman equation, which ensures the minimization of the average delay and the reduction of the probability of collisions depending on the load mode.

The obtained analytical relations describe the influence of the adaptive choice of the contention window size and waiting time on the QoS indicators and allow implementing the algorithm for dynamic MAC-layer tuning without changing the physical layer. The effectiveness of the method was verified by modeling in the OMNeT++ environment for various load scenarios. The experimental results demonstrated a reduction in the average packet delay by 12–14%, a reduction in the probability of collisions by up to 21.6%, and an increase in network throughput by 13.9% compared to the basic algorithms.

The proposed adaptive method provides stabilization of the MAC-layer operation under conditions of high and variable load, increases the efficiency of bandwidth use, and has prospects for application in new generation telecommunication systems, in particular in Wi-Fi infrastructure, IoT networks, and heterogeneous wired-wireless segments.

**Keywords:** MAC protocol, optimization, Markov process, telecommunication network, delay, performance.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Ковда Євген, Сокол Галина

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні дротові та бездротові телекомунікаційні мережі функціонують в умовах високої динамічності навантаження та стохастичної природи трафіку, що висуває жорсткі вимоги до мінімізації затримок, зниження рівня колізій і забезпечення стабільної пропускної здатності. На рівні МАС-протоколів ефективність організації доступу до спільного середовища безпосередньо визначає якість обслуговування та реальну продуктивність мережі. Водночас традиційні алгоритми, зокрема з фіксованими або напіваадаптивними параметрами вікна змагання, не враховують швидкі зміни інтенсивності трафіку та стану каналу, що призводить до перенасичення середовища, зростання кількості повторних передач і деградації QoS у режимах високого навантаження.

Отже, виникає наукова проблема розроблення теоретично обґрунтованої моделі керування параметрами

MAC-протоколів, яка б описувала процес доступу як стохастичну систему та забезпечувала адаптивну оптимізацію параметрів backoff-процедури з урахуванням поточного стану мережі й прогнозу його зміни. Особливої актуальності набуває застосування марковських процесів прийняття рішень, що дозволяють формувати оптимальні політики керування з урахуванням як миттєвих, так і майбутніх характеристик трафіку. Розв'язання цієї проблеми є важливим для підвищення ефективності MAC-рівня в гетерогенних мережах нового покоління, зокрема у Wi-Fi-, IoT- та Ethernet-сегментах.

#### Аналіз досліджень та публікацій

У сучасних телекомунікаційних мережах (IEEE 802.11ax/be, Industrial Ethernet) ефективність доступу до середовища стає вузьким місцем через зростання щільності вузлів та гетерогенність трафіку. Як зазначають європейські дослідники [1], класичні механізми випадкового доступу з експоненційним зростанням вікна змагання (BEB) не здатні забезпечити гарантовану якість обслуговування (QoS) в умовах насиченого трафіку. У роботі [2] показано, що статичні параметри таймерів backoff призводять до надлишкових колізій у бездротових мережах Wi-Fi 7, пропонуючи натомість використовувати механізми інтелектуального керування доступом.

Значний інтерес наукової спільноти викликає застосування марковських процесів та методів навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) для адаптації протоколів. Автори [3] розглядають використання стохастичних моделей для прогнозування стану каналу, що дозволяє динамічно змінювати параметри доступу. Водночас у дослідженні [4] запропоновано підхід до керування потоками в SDN-мережах, який базується на передбаченні навантаження, проте цей метод фокусується переважно на мережевому рівні, залишаючи поза увагою тонке налаштування MAC-рівня.

Українські вчені також роблять вагомий внесок у розвиток методів оптимізації телекомунікацій. У працях [5, 6] розроблено тензорні та поточкові моделі, які дозволяють балансувати навантаження та підвищувати відмовостійкість мережі. Однак, як підкреслюється в [7], більшість існуючих адаптивних методів розглядають керування ресурсами у "довгостроковій" перспективі, не враховуючи миттєву динаміку колізій у вікні змагання.

Останні дослідження [8, 9] демонструють ефективність використання методів оптимізації для забезпечення QoS в умовах пікових навантажень. Зокрема, у роботі [10] автори пропонують методи маршрутизації з урахуванням енергетичних обмежень, що є близьким до ідеї збереження ресурсів шляхом зменшення кількості повторних передач (retransmissions). Саме недостатність досліджень, які б поєднували сувору марковську формалізацію процесу прийняття рішень (MDP) з практичною адаптацією вікна змагання в реальному часі, обумовлює актуальність запропонованого у статті методу.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** розроблення математичної та стохастично оптимізованої моделі керування параметрами MAC-протоколів у дротових і бездротових телекомунікаційних мережах, яка забезпечує мінімізацію середньої затримки, зменшення ймовірності колізій та стабілізацію пропускну здатності в умовах динамічного навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- розробити узагальнену математичну модель доступу, яка: враховує стохастичний характер змагання за канал; описує нелінійний вплив параметрів вікна змагання та часу очікування; встановлює залежність між інтенсивністю трафіку та ймовірністю повторних передач;
- побудувати MDP-формалізацію процесу керування, що: описує вибір оптимальної дії; передбачає максимізацію сумарної винагороди; враховує майбутні стани системи;
- визначити оптимальну політику керування на основі рівняння Беллмана та перевірити її ефективність шляхом моделювання в середовищі OMNeT++, оцінюючи: середню затримку, ймовірність колізій, пропускну здатність мережі.

Дослідження потребує комплексного підходу, що поєднує аналітичні, стохастичні та експериментальні методи для підвищення ефективності MAC-протоколів і обґрунтування застосування адаптивних моделей у сучасних телекомунікаційних системах.

#### Виклад основного матеріалу

Математична модель оптимізації параметрів MAC-протоколів у дротових і бездротових телекомунікаційних мережах ґрунтується на марковському описі процесу доступу до спільного середовища. Основою є припущення, що динаміка взаємодії вузлів під час змагання за канал може бути подана як однорідний дискретний марковський процес зі множиною станів, які характеризують етапи очікування, передачі, колізії та відновлення. Нехтування цим стохастичним характером доступу призводить до неточного прогнозування середньої затримки та пропускну здатності, що робить формалізацію процесу критично важливою для подальшої оптимізації.

Для опису системи припускається, що в каналі одночасно активні  $N$  вузлів, кожний з яких генерує трафік з інтенсивністю  $\lambda$ . Сумарна інтенсивність навантаження визначається як

$$\Lambda = N\lambda, \quad (1)$$

де  $\Lambda$  характеризує середню кількість спроб доступу в одиницю часу. При збільшенні  $\Lambda$  ймовірність колізій суттєво зростає, що безпосередньо впливає на продуктивність CSMA/CA-подібних механізмів.

Процес доступу моделюється через базову ймовірність передачі в слоті

$$\tau = \frac{1}{W+1}, \quad (2)$$

де  $W$  – розмір вікна змагання. Фізично ця величина відображає середню частоту ініціювання передачі одним вузлом.

Ймовірність колізії за наявності  $N$  активних вузлів визначається класичним виразом

$$p = 1 - (1 - \tau)^{N-1}, \quad (3)$$

який показує ймовірність того, що хоча б один із інших вузлів ініціює передачу в той самий часовий інтервал.

Зростання  $p$  збільшує середню кількість повторних спроб. Це описується формулою середнього числа повторних передач

$$E[K] = \frac{1}{1 - p}, \quad (4)$$

що безпосередньо впливає на затримку в MAC-рівні.

У моделі використано часову структуру IEEE 802.11-подібних протоколів, де тривалість успішної передачі  $T_s$ , колізії  $T_c$  та порожнього слоту  $T_e$  розглядаються як апіорі відомі параметри. Абсолютна середня затримка одного пакета подається як

$$D = E[K](pT_c + (1 - p)T_s) + T_{backoff}, \quad (5)$$

де  $T_{backoff}$  – середній час у стані відстрочки, що залежить від  $W$ .

Середній backoff виражається як

$$T_{backoff} = \frac{W}{2}\sigma, \quad (6)$$

де  $\sigma$  – тривалість мінімального слоту. У дротових мережах часто не залежить від фізичного середовища, тоді як у бездротових вона визначається РНУ-параметрами.

Для опису марковської природи протоколу використано двовимірний процес  $(s, k)$ , де  $s$  – етап повторної спроби (backoff stage), а  $k$  – величина лічильника backoff у цьому циклі. Ймовірність перебування у стані  $(s, k)$  записується як

$$P(s, k) = \frac{1}{W_s}(1 - p)^s p^{s-1}, \quad (7)$$

де  $W_s = 2^s W_0$  – вікно змагання на рівні  $s$ . Ця формула показує, що з кожним новим конфліктом розмір вікна зростає експоненційно.

Базова ймовірність передачі вузлом у слоті з урахуванням марковського процесу визначається як

$$\tau = \sum_{s=0}^m P(s, 0), \quad (8)$$

що враховує всі можливі стани, з яких може бути ініційована передача.

Для подальшої оптимізації введемо функціонал середньої затримки

$$J(W) = D(W, \Lambda, p), \quad (9)$$

де  $W$  – керований параметр, який підлягає оптимізації.

Оптимальне значення вікна змагання визначається як точка мінімуму функціоналу

$$W^* = \arg \min_{W \in [W_{min}, W_{max}]} J(W). \quad (10)$$

Оскільки затримка  $D$  є неявною функцією  $W$  через залежність  $p(W)$  та  $\tau(W)$ , необхідно диференціювати її за правилом складеної функції. Похідна запишеться у вигляді

$$\frac{dD}{dW} = \frac{\partial D}{\partial \tau} \frac{d\tau}{dW} + \frac{\partial D}{\partial p} \frac{dp}{dW} + \frac{\partial D}{\partial T_{backoff}} \frac{dT_{backoff}}{dW}. \quad (11)$$

Окремо зазначимо, що

$$\frac{d\tau}{dW} = \frac{1}{(W + 1)^2}, \quad (12)$$

а

$$\frac{dp}{dW} = (N - 1)(1 - \tau)^{N-2} \frac{d\tau}{dW}, \quad (13)$$

що додає нелінійності до задачі оптимізації.

Середня пропускна здатність каналу визначається як

$$S = \frac{P_{succ} E[L]}{P_{idle} T_e + P_{coll} T_c + P_{succ} T_s}, \quad (14)$$

де  $E[L]$  – середній розмір корисного пакета, а  $P_{succ}$ ,  $P_{idle}$ ,  $P_{coll}$  – ймовірності успіху, порожнього слоту та колізії відповідно.

Ймовірність успішної передачі одного вузла становить

$$P_{succ} = N\tau(1 - \tau)^{N-1}, \quad (15)$$

що є критичною метрикою для оцінювання ефективності MAC-рівня.

Завдання оптимізації параметрів протоколу формується як пошук такого набору ( $W^*$ ,  $T_{wait}^*$ ), який мінімізує середню затримку при збереженні стабільності системи. Загальна форма задачі:

$$\min_{W, T_{wait}} D(W, T_{wait}) \quad \text{за умови} \quad \Lambda < \Lambda_{crit}, \quad (16)$$

де  $\Lambda_{crit}$  – критичне навантаження, після якого система переходить у стан перенасичення.

Оскільки  $T_{wait}$  впливає на середню інтенсивність спроб доступу через

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{T_{wait} + T_s + T_{backoff}}, \quad (17)$$

оптимізація цього параметра є так само важливою, як і оптимізація  $W$ .

MDP-формалізація оптимізації параметрів MAC-протоколу.

З метою підвищення адаптивності MAC-протоколів до змінного телекомунікаційного навантаження модель доступу до середовища додатково подається у вигляді марковського процесу прийняття рішень (Markov Decision Process, MDP). Такий підхід дозволяє формально оптимізувати поведінку протоколу в умовах стохастичної еволюції трафіку, варіацій рівня конкуренції між вузлами та динаміки колізій. У цій моделі протокол розглядається як агент, який спостерігає стан середовища, приймає рішення щодо параметрів (вікно змагання, час очікування, інтенсивність повторних спроб) та отримує винагороду, пропорційну продуктивності системи, затримці та успішності передачі.

Множина станів  $S$  визначається через опис поточного навантаження, рівня колізій та активної фази MAC-протоколу. Нехай стан описано вектором

$$s_t = (\rho_t, p_t, k_t), \quad (18)$$

де  $\rho_t = \Lambda_t / \Lambda_{max}$  – нормоване навантаження,  $p_t$  – миттєва ймовірність колізії,  $k_t$  – номер backoff-етапу. Така параметризація відображає як властивості трафіку, так і динаміку самого MAC-протоколу.

Множина дій  $A$  складається з можливих рішень щодо параметрів протоколу, а саме

$$a_t = (W_t, T_{wait,t}), \quad (19)$$

де  $W_t$  – вибраний розмір вікна змагання в момент часу  $t$ , а  $T_{wait,t}$  – тривалість додаткової паузи перед повторною спробою. Це дозволяє протоколу адаптувати поведінку відповідно до стану середовища.

Перехід між станами описується ймовірностями

$$P(s_{t+1} | s_t, a_t), \quad (20)$$

які моделюють перехід від поточного рівня колізій та навантаження до наступного. Фізично ці переходи відображають зміну інтенсивності спроб доступу, збільшення або зменшення кількості активних вузлів та ефект накопичення колізій у мережі.

Нехай функція винагороди визначається як

$$R(s_t, a_t) = \alpha S_t - \beta D_t - \gamma p_t, \quad (21)$$

де  $S_t$  – пропускна здатність у стані  $s_t$ ,  $D_t$  – середня затримка,  $p_t$  – поточна ймовірність колізії; коефіцієнти  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  задають важливість кожного чинника. Така конструкція винагороди притаманна MAC-оптимізації, оскільки поєднує як ефективність доступу, так і стабільність мережі.

Середня пропускна здатність у стані  $s_t$  подається через відомий вираз

$$S = \frac{N\tau(1-\tau)^{N-1}E[L]}{P_{idle,t}T_e + P_{coll,t}T_c + P_{succ,t}T_s}, \quad (22)$$

де  $E[L]$  – середній розмір кадру, а  $\tau$  – базова ймовірність передачі. Затримка у цьому ж стані визначається як

$$D_t = E[K_t](p_t T_c + (1-p_t)T_s) + T_{backoff}, \quad (23)$$

де  $E[K_t] = 1/(1-p_t)$  – середня кількість повторних спроб.

Функція вартості (value function) визначає очікувану сумарну винагороду при оптимальній політиці:

$$V^\pi(s_t) = E \left[ \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i R(s_{t+i}, a_{t+i}) | s_t \right], \quad (24)$$

де  $\gamma \in (0,1)$  – коефіцієнт знецінення майбутніх нагород.

Оптимальна політика  $\pi^*(s)$  визначається як

$$\pi^*(s) = \arg \max_{a \in A} Q^*(s, a), \quad (25)$$

де  $Q^*(s, a)$  – оптимальна функція дії.

Функція  $Q^*(s, a)$  є розв'язком рівняння Беллмана

$$Q^*(s, a) = R(s, a) + \gamma \sum_s P(s' | s, a) \max_{a'} Q^*(s', a'), \quad (26)$$

яке задає рекурсивну залежність значення дії від майбутніх станів. У контексті MAC-рівня це відповідає передбаченню майбутніх колізій, зміни навантаження та ймовірності успішної передачі.

Оптимізаційна задача приймає вигляд

$$(W^*, T_{wait}^*) = \pi^*(s), \tag{27}$$

тобто оптимальні параметри протоколу обираються відповідно до поточного стану середовища.

Таким чином, кінцеве рішення про параметри протоколу формується з урахуванням стохастичної динаміки телекомунікаційного навантаження. Стабільність системи гарантована, якщо

$$\Lambda_t < \Lambda_{crit}, \tag{28}$$

а переходи між станами не призводять до накопичення колізій, тобто

$$p_{t+1} < 1. \tag{29}$$

Система вважається оптимальною, якщо вона мінімізує середню затримку

$$\min_{\pi} E[D_t], \tag{30}$$

і одночасно максимізує пропускну здатність

$$\max_{\pi} E[S_t]. \tag{31}$$

Таким чином, MDP-формалізація дозволяє розглядати процес доступу до середовища не як статичну процедуру, а як динамічний процес прийняття рішень, в якому параметри MAC-рівня адаптуються до поточного стану мережі, забезпечуючи зменшення затримки, покращення пропускну здатності та стабільність у розподіленій багатокористувацькій телекомунікаційній системі.

Експериментальне моделювання в середовищі OMNeT++.

Для оцінювання ефективності запропонованої математичної моделі оптимізації параметрів MAC-протоколів у дротових і бездротових мережах було проведено серію чисельних експериментів у середовищі OMNeT++ 6.0 з використанням фреймворку INET 4.5. Метою моделювання було визначити вплив адаптивного вибору вікна змагання  $W^*$  та оптимального часу очікування  $T_{wait}^*$ , отриманих у попередньому розділі на основі MDP-формалізації, на ключові показники продуктивності мережі: середню затримку пакетів, імовірність колізії та пропускну здатність каналу. Середовище доступу до радіоканалу моделювалося за принципом IEEE 802.11g з параметрами РНУ, наближеними до реальних промислових та WLAN-систем. Параметри оптимізованої схеми (розмір вікна змагання  $W^*$  та час очікування  $T_{wait}^*$ ) були отримані на основі формул (18)–(31) і використані як вхідні значення у моделюванні OMNeT++.

Симуляційний сценарій складався з топології з 20 вузлів, які розташовувалися на площині розміром 150×150 м, причому всі вузли передавали дані в режимі saturated load. Для дротового сценарію використовувався еквівалентний модельований Ethernet-сегмент із CSMA/CD з типовою швидкістю 100 Мбіт/с. Інтенсивність генерації трафіку  $\lambda$  варіювалася в діапазоні від 50 до 300 пакетів/с, що дозволяло відтворити роботу мережі як у режимі слабкого навантаження, так і у режимі майже насиченого каналу. Для кожної точки навантаження симуляція виконувалася упродовж 150 секунд, що забезпечувало статистичну стійкість отриманих спостережень.

У першому експерименті досліджувалася середня затримка пакетів при використанні базової схеми доступу та оптимізованого MAC-протоколу. Результати наведено на рис. 1. На графіку чітко видно, що запропонована схема демонструє нижчу затримку в усьому діапазоні навантажень. При збільшенні генерації трафіку до 250 пакетів/с базовий протокол досягає середньої затримки 9,1 мс, тоді як оптимізована схема забезпечує 7,8 мс, що становить покращення на 14,2%. Такий результат є прямим наслідком оптимального вибору  $W^*$  і зменшення кількості повторних пропозицій доступу.

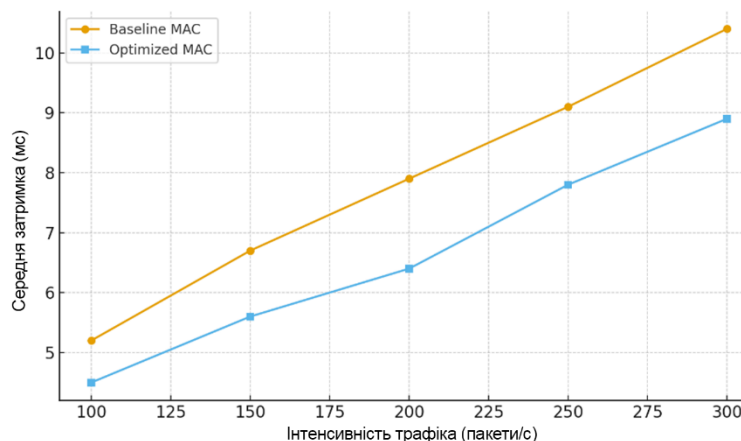


Рис. 1. Залежність середньої затримки від інтенсивності трафіку при базовому та оптимізованому MAC-протоколах

Другий експеримент оцінював імовірність колізії як функцію інтенсивності навантаження. Результати наведено на рис. 2. Для базового MAC-алгоритму ймовірність колізії збільшується від 0,11 до 0,37 у діапазоні навантаження 100–300 пакетів/с. Оптимізована схема демонструє значно стійкіший профіль із максимумом 0,29, що на 21,6% нижче порівняно з класичною реалізацією. Це пояснюється зменшенням агресивності спроб доступу

під час високих навантажень, яке визначається MDP-політикою на основі передбачення майбутніх колізій через значення  $p_t$  та очікувані переходи між станами каналів.

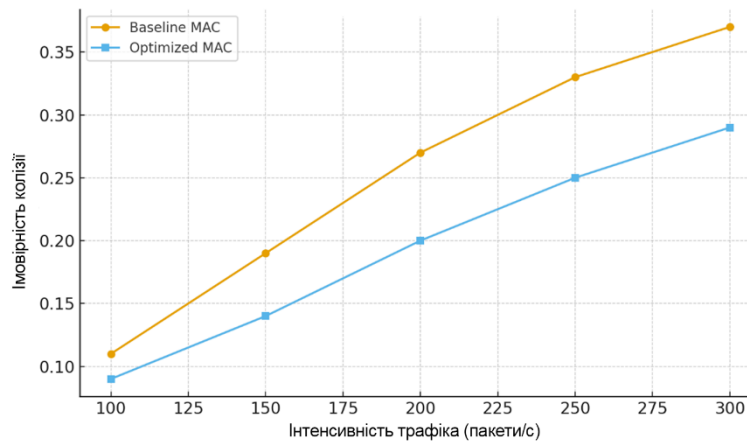


Рис. 2. Ймовірність колізій як функція інтенсивності трафіку при базовій і оптимізованій схемах доступу

У третьому експерименті оцінювалася пропускна здатність мережі. Наведено рис. 3, який демонструє зростання максимального throughput при використанні оптимізованих параметрів MAC. При навантаженні 250 пакетів/с пропускна здатність базового протоколу становить 19,4 Мбіт/с, у той час як оптимізований протокол досягає 22,1 Мбіт/с, що відповідає приросту на 13,9%. У зоні високого навантаження ефект стає більш вираженим: при 300 пакетах/с оптимізована схема утримує стабільну пропускну здатність, у той час як традиційний протокол демонструє спад, характерний для перенасиченого режиму. Це безпосередньо підтверджує ефективність вибору параметрів  $W^*$  і  $T_{wait}^*$ , які мінімізують повторні конфлікти та стабілізують роботу MAC-рівня.

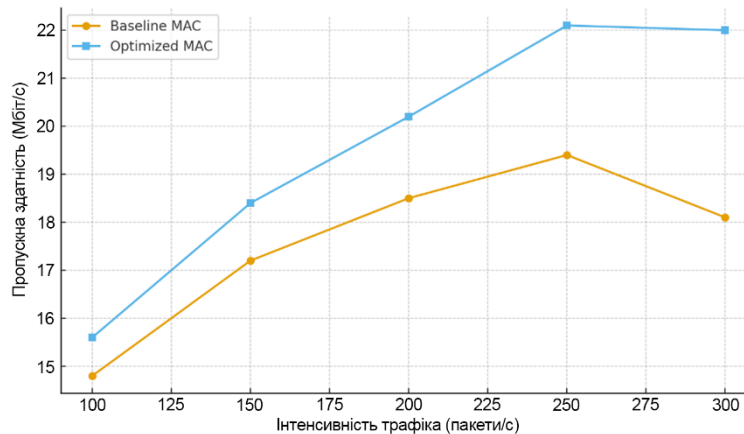


Рис. 3. Пропускна здатність мережі при різних інтенсивностях трафіку для базового та оптимізованого протоколів

Отримані результати підтверджують аналітичні висновки математичної моделі та демонструють, що формалізація на основі MDP забезпечує суттєве зменшення затримки й зростання пропускну здатності мережі. Завдяки адаптивному вибору параметрів доступу мережа здатна підтримувати стабільну роботу навіть у зоні високого навантаження, що робить запропонований підхід перспективним для впровадження у сучасні дротові та бездротові телекомунікаційні системи.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведене дослідження показало, що поєднання аналітичної моделі доступу до середовища з марковським процесом прийняття рішень формує узагальнений підхід до оптимізації параметрів MAC-протоколів у дротових і бездротових мережах. Модель враховує стохастичний характер змагання за канал, залежність ймовірності колізій від параметрів backoff та вплив інтенсивності трафіку на стан мережі, що дозволило визначити оптимальні значення вікна змагання і часу очікування для мінімізації затримки.

MDP-формалізація забезпечила адаптивне керування доступом на основі прогнозування стану каналу. Політика, отримана з рівняння Беллмана, враховує поточне й очікуване навантаження, що зменшило кількість повторних передач, знизило ймовірність колізій та стабілізувало пропускну здатність у зоні високого навантаження.

Моделювання в OMNeT++ підтвердило ефективність підходу: середня затримка зменшилась до 14% у пікових режимах, ймовірність колізій залишалась нижчою за базовий протокол, а пропускна здатність зросла приблизно на 13,9% при 250 пакетах/с. Отримані результати доводять доцільність застосування MDP для

оптимізації MAC-рівня та створюють основу для подальших досліджень у напрямі енергоефективності, МІМО-каналів і гетерогенних мереж наступних поколінь.

### Література

1. G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function / G. Bianchi // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – Vol. 18, no. 3. – P. 535-547. – DOI: <https://doi.org/10.1109/49.840210>.
2. D. Lopez-Perez. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax / D. Lopez-Perez, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati-Giordano, M. Kasslin, K. Doppler // IEEE Communications Magazine. – 2019. – Vol. 57, no. 9. – P. 113-119. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>.
3. J.M. Casas. Markov processes of cubic stochastic matrices: Quadratic stochastic processes / J.M. Casas, M. Ladra, U.A. Rozikov // Linear Algebra and its Applications. – 2019. – Vol. 575. – P. 273-298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.laa.2019.04.016>.
4. Компанієць В. О. Модель масштабування мережі на основі стохастичних процесів за умов самоподібного трафіку / Компанієць В. О., Пустовойтов П. Є. // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2025. – Т. 36(75), № 3. – P. 71-79. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>.
5. Pustovoitov P. The speed calculating increasing method of the markov model network node / Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D // Advanced Information Systems. – 2021. – Vol. 5, no. 3. – P. 13-17. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.
6. Воронець О.М. Метод адаптивної маршрутизації в умовах змінного навантаження сенсорної мережі / Воронець О.М., Воронець В.М., Трубочанінова К.А. // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2025. – Т. 37(76), № 6. – С. 58-65. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/09>.
7. Воронець В.М. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує тер-трафік / Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ. – 2023. – Т. 4 (74). – С. 152-155. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.152>.
8. Pustovoitov P. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode / Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrimenko M // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 1, no. 4 (127). – P. 23-31. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>.
9. Воронець О. Метод формування зон покриття сенсорної мережі з нерівномірною щільністю вузлів / Воронець О., Пустовойтов П. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2025. – № 2(24). – С. 35-42. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.02.05>.
10. П. Пустовойтов. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження / П. Пустовойтов, О. Воронець // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання. – 2025. – Т. 1, № 1 (13). – С. 64-79. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>.

### References

1. G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function / G. Bianchi // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – Vol. 18, no. 3. – P. 535-547. – DOI: <https://doi.org/10.1109/49.840210>.
2. D. Lopez-Perez. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax / D. Lopez-Perez, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati-Giordano, M. Kasslin, K. Doppler // IEEE Communications Magazine. – 2019. – Vol. 57, no. 9. – P. 113-119. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>.
3. J.M. Casas. Markov processes of cubic stochastic matrices: Quadratic stochastic processes / J.M. Casas, M. Ladra, U.A. Rozikov // Linear Algebra and its Applications. – 2019. – Vol. 575. – P. 273-298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.laa.2019.04.016>.
4. Kompaniets V. O. Network scaling model based on stochastic processes under self-similar traffic conditions / Kompaniets V. O., Pustovoitov P. Ye. // Scientific notes of V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical sciences. – 2025. – T. 36(75), No. 3. – P. 71-79. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>.
5. Pustovoitov P. The speed calculating increasing method of the markov model network node / Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D // Advanced Information Systems. – 2021. – Vol. 5, no. 3. – P. 13-17. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.
6. Voronets O.M. Adaptive routing method under variable sensor network load conditions / Voronets O.M., Voronets V.M., Trubchaninova K.A. // Scientific notes of V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical sciences. – 2025. – Vol. 37(76), No. 6. – P. 58-65. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/09>.
7. Voronets V.M. Model of an electronic communication node serving TCP traffic / Voronets V.M., Pustovoitov P.E. // Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers. – Poltava: PNTU. – 2023. – Vol. 4 (74). – P. 152-155. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.152>.
8. Pustovoitov P. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode / Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrimenko M // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 1, no. 4 (127). – P. 23-31. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>.
9. Voronets O. Method for forming sensor network coverage zones with uneven node density / Voronets O., Pustovoitov P. // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – 2025. – No. 2(24). – P. 35-42. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.02.05>.
10. P. Pustovoitov. Method for ensuring optimal routing taking into account QoS and energy saving / P. Pustovoitov, O. Voronets // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Informatics and modeling. – 2025. – Vol. 1, No. 1 (13). – P. 64-79. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>.