ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-304-6-135-142

УДК 004.7:621.39

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНОЮ МЕРЕЖЕЮ ETHERNET/WI-FI У КОРПОРАТИВНИХ СИСТЕМАХ

Дира В.В.

ARCHITECTURE OF INTELLIGENT MANAGEMENT OF HYBRID ETHERNET/WI-FI NETWORKS IN CORPORATE SYSTEMS

Dyra V.V.

У статті розглядається задача організації інтелектуального управління трафіком у корпоративних телекомунікаційних мережах на основі гібридної інфраструктури Ethernet/Wi-Fi. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням обсягів мережевого трафіку, збільшенням кількості мобільних пристроїв, поширенням хмарних сервісів та підвищенням вимог до якості обслуговування (QoS) у сучасних корпоративних інформаційних системах. В умовах динамічного мережевого середовища виникає необхідність забезпечення стабільної передачі даних, мінімізації затримок та втрат пакетів, а також ефективного розподілу навантаження між дротовими та бездротовими сегментами мережі.

Метою роботи є розробка архітектури інтелектуального управління гібридною мережею Ethernet/Wi-Fi та математичної моделі інтегрального оцінювання параметрів QoS для підтримки процесу прийняття рішень щодо вибору каналу передачі даних. Запропоновано багаторівневу архітектуру, яка інтегрує модулі моніторингу мережевих параметрів, аналізу стану мережі, оцінювання QoS та інтелектуального керування маршрутизацією трафіку. Архітектура враховує особливості функціонування Ethernet і Wi-Fi, зокрема відмінності у стабільності пропускної здатності, рівнях затримок, впливі завад та змінності характеристик бездротового каналу.

Розроблено математичну модель інтегральної оцінки QoS, яка базується на нормалізованих показниках пропускної здатності, затримки та втрат пакетів із використанням вагових коефіцієнтів для визначення значущості кожного параметра. Запропонований підхід дозволяє здійснювати кількісне порівняння стану каналів Ethernet і Wi-Fi та формувати обґрунтовані рішення щодо оптимального розподілу мережевого трафіку. Результати дослідження можуть бути використані під час проєктування, модернізації та адаптивного управління корпоративними телекомунікаційними мережами з підвищеними вимогами до QoS, а також для побудови систем інтелектуального розподілу трафіку, підтримки прийняття рішень щодо вибору каналу передачі даних і забезпечення стабільного функціонування мережевих сервісів в умовах динамічного навантаження.

Ключові слова: *гібридна мережа, Ethernet, Wi-Fi, QoS, маршрутизація трафіку, інтелектуальне управління, телекомунікаційні системи.*

Вступ. Сучасний розвиток корпоративних телекомунікаційних систем характеризується постійним зростанням обсягів мережевого трафіку, кількості підключених пристроїв та вимог до якості обслуговування (QoS) [1]. Умови цифрової трансформації підприємств, впровадження хмарних сервісів, систем відеоконференцзв'язку, IP-телефонії та мобільних платформ зумовлюють необхідність побудови високопродуктивних і масштабованих мережевих інфраструктур.

У корпоративних мережах найбільш поширеними технологіями передачі даних залишаються Ethernet та Wi-Fi [2, 3]. Ethernet забезпечує високу стабільність, низький рівень затримок і прогнозовану пропускну здатність, що робить його ефективним для критично важливих сервісів і магістральних сегментів мережі. Водночас технологія Wi-Fi забезпечує мобільність користувачів, гнучкість розгортання та зменшення витрат на кабельну інфраструктуру.

Поєднання єдиної корпоративної мережі формує гібриднетелекомунікаційне середовище, у якому виникає проблема ефективного управління мережевими ресурсами [4]. Особливої актуальності набувають питання забезпечення QoS у процесі динамічного розподілу трафіку між провідними та бездротовими сегментами мережі [5]. Нестабільність бездротового каналу, вплив інтерференції, перевантаження точок доступу та неоднорідність характеристик каналів передачі можуть призводити

до збільшення затримок, втрат пакетів і зниження продуктивності корпоративних сервісів.

Існуючі підходи до управління гібридними мережами переважно базуються на статичних механізмах маршрутизації або окремих QoS-політиках, які недостатньо враховують поточний стан мережі та динамічні зміни параметрів трафіку. Це ускладнює забезпечення стабільної роботи корпоративних інформаційних систем в умовах змінного навантаження.

У зв'язку з цим виникає суперечність між необхідністю забезпечення високого рівня якості обслуговування в корпоративних мережах та обмеженими можливостями існуючих підходів до управління трафіком, які не враховують у повному обсязі динамічний стан гібридної інфраструктури Ethernet/Wi-Fi [6]. Це зумовлює потребу у створенні інтелектуальних методів управління мережею, що базуються на комплексному аналізі параметрів QoS та забезпечують адаптивний вибір оптимального каналу передачі даних у реальному часі.

Аналіз останніх публікацій. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що основна увага приділяється питанням забезпечення QoS, балансування мережевого навантаження, адаптивного управління трафіком та інтеграції Ethernet і Wi-Fi у межах єдиної мережевої інфраструктури [7].

У роботі Pilar Manzanares-Lopez та співавторів запропоновано SDN-підхід до динамічного управління QoS у мережах IEEE 802.11. Автори розглядають централізоване керування параметрами бездротової мережі з використанням механізмів Software Defined Networking, що дозволяє підвищити стабільність передачі даних та оптимізувати використання ресурсів Wi-Fi-мережі [8]. Водночас у дослідженні основна увага приділяється лише бездротовому сегменту мережі, тоді як питання інтегрованого управління гібридною інфраструктурою Ethernet/Wi-Fi залишаються недостатньо розглянутими.

У дослідженні Qiao Qu та співавторів проаналізовано особливості стандарту IEEE 802.11ax у середовищах із високою щільністю користувачів. Автори відзначають підвищення пропускної здатності та ефективності використання радіоканалу завдяки технологіям OFDMA та MU-MIMO [9]. Однак у роботі недостатньо враховано вплив динамічного навантаження корпоративної мережі та механізми адаптивного розподілу трафіку між Wi-Fi та Ethernet-сегментами.

У роботі Jiyang Bai розглядаються механізми покращення QoS у мережах IEEE 802.11ax шляхом адаптивного управління доступом до каналу та пріоритезації трафіку. Запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність обслуговування мультимедійного трафіку та сервісів реального часу [10]. Разом із тим дослідження орієнтоване переважно на оптимізацію параметрів бездротової мережі без комплексного врахування взаємодії з провідною Ethernet-інфраструктурою.

У роботі «Intelligent traffic control for QoS optimization in hybrid SDNs» досліджено механізми інтелектуального управління трафіком у програмно-конфігурованих мережах. Автори пропонують підхід до оптимізації маршрутизації на основі аналізу поточного стану мережі та параметрів QoS. Перевагою підходу є можливість адаптивного реагування на зміни навантаження мережі [11]. Проте в роботі недостатньо розкрито механізми взаємодії провідних і бездротових сегментів у корпоративних гібридних мережах.

У дослідженні David López-Pérez та співавторів проаналізовано перспективи використання стандарту IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) для високонавантажених мереж. Автори розглядають можливості зменшення затримок та підвищення швидкості передачі даних у бездротових мережах нового покоління [12]. Однак у роботі не приділено достатньої уваги питанням інтеграції нових бездротових технологій із традиційною Ethernet-інфраструктурою корпоративних систем.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень показує, що існуючі підходи здебільшого зосереджені або на оптимізації окремих бездротових технологій, або на локальних механізмах QoS-управління. При цьому недостатньо дослідженими залишаються питання побудови інтегрованої архітектури інтелектуального управління гібридними мережами Ethernet/Wi-Fi, яка б забезпечувала адаптивний розподіл трафіку на основі комплексного аналізу параметрів QoS та поточного стану мережі.

Проведений аналіз показав, що існуючі методи управління гібридними мережами Ethernet/Wi-Fi недостатньо враховують зміну параметрів QoS та поточний стан мережі під час прийняття рішень щодо розподілу трафіку. Це зумовлює необхідність розроблення адаптивної архітектури управління, здатної забезпечити ефективне використання мережевих ресурсів у корпоративному середовищі.

Наукова новизна роботи полягає у розробці інтегрованої багаторівневої архітектури інтелектуального (адаптивного) управління гібридною мережею Ethernet/Wi-Fi, яка об'єднує модулі моніторингу мережевих параметрів, аналізу стану каналів, інтегрального оцінювання QoS та прийняття рішень щодо маршрутизації, а також у створенні математичної моделі інтегрального показника QoS на основі нормалізованих метрик із ваговими коефіцієнтами та механізмом гістерезису, що забезпечує стабільне перемикання між каналами в умовах динамічного навантаження.

Метою роботи є розробка архітектури інтелектуального управління гібридною мережею Ethernet/Wi-Fi у корпоративних системах, яка забезпечує адаптивний вибір каналу передачі даних на основі комплексного аналізу параметрів QoS та поточного стану мережевої інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати особливості функціонування технологій Ethernet та Wi-Fi у корпоративних телекомунікаційних мережах та визначити їх основні переваги й обмеження.

2. Дослідити сучасні підходи до управління мережевим трафіком і забезпечення QoS у гібридних мережах та виявити їх недоліки.

3. Сформувати критерії оцінювання стану гібридної мережі на основі параметрів QoS для прийняття рішень щодо розподілу трафіку.

4. Розробити архітектуру інтелектуального управління гібридною мережею Ethernet/Wi-Fi та алгоритм адаптивного вибору каналу передачі даних.

5. Запропонувати математичну модель оцінювання ефективності каналів зв'язку для підтримки процесу прийняття рішень у системі управління мережею.

Виклад основного матеріалу дослідження. У межах дослідження розроблено архітектуру інтелектуального управління гібридною телекомунікаційною мережею Ethernet/Wi-Fi, що базується на принципах адаптивного розподілу мережевого трафіку на основі інтегральної оцінки параметрів якості обслуговування (QoS). Запропонована архітектура забезпечує підвищення ефективності використання мережевих ресурсів шляхом динамічного вибору оптимального каналу передачі даних залежно від поточного стану мережевого середовища.

Функціонування системи ґрунтується на узгодженій взаємодії процесів моніторингу параметрів мережі, багатокритеріального аналізу QoS-показників та алгоритмічного прийняття рішень щодо маршрутизації трафіку між провідним (Ethernet) і бездротовим (Wi-Fi) сегментами. Такий підхід дозволяє враховувати стохастичний характер змін навантаження, а також неоднорідність характеристик різних типів каналів передачі даних [13]. Структурна схема запропонованої архітектури наведена на рисунку 1.

Запропонована архітектура має багаторівневу структуру, що включає рівень прикладних сервісів, рівень класифікації трафіку, рівень моніторингу та аналізу QoS-параметрів, рівень інтелектуального прийняття рішень і рівень керування мережевим трафіком.

Рівень прикладних сервісів формує вхідний мережевий трафік різних типів, зокрема VoIP, відеоконференції, web-застосунки та FTP-передачі даних. Кожен тип трафіку характеризується індивідуальними вимогами до параметрів якості обслуговування, включаючи допустимі значення затримки передачі, пропускної здатності та рівня втрат пакетів.

Модуль класифікації трафіку реалізує розподіл пакетів за пріоритетними класами відповідно до QoS-вимог прикладних сервісів. У межах модуля здійснюється ідентифікація критичного, мультимедійного та best-effort трафіку з метою подальшої оптимізації маршрутизації.

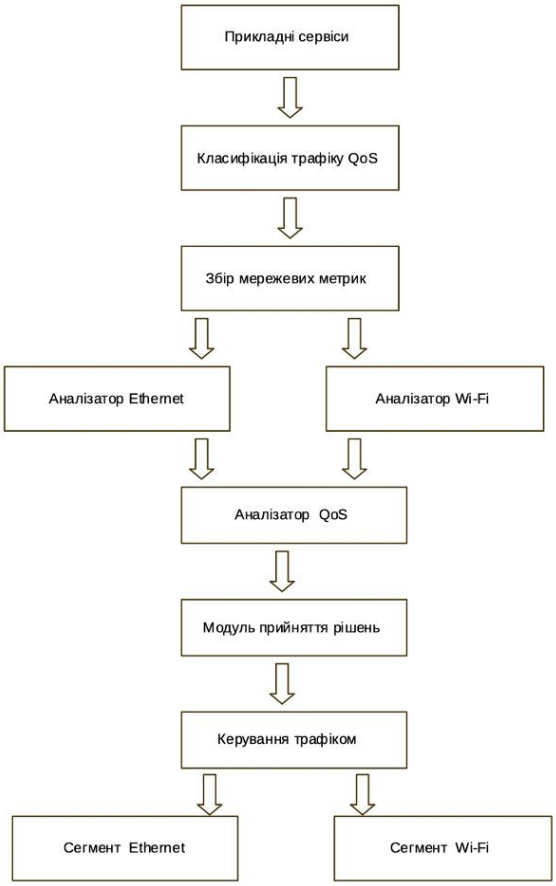


Рис. 1. Структурна схема архітектури інтелектуального управління гібридною телекомунікаційною мережею Ethernet/Wi-Fi

Модуль збору мережевих метрик виконує безперервний моніторинг поточного стану мережевого середовища та формує множину параметрів, необхідних для аналізу якості обслуговування. До основних контрольованих параметрів належать затримка передачі даних, пропускна здатність каналів, рівень втрат пакетів та ступінь завантаженості мережевих сегментів.

Аналізатори стану Ethernet та Wi-Fi здійснюють оцінювання характеристик відповідних каналів передачі даних. Для Ethernet-сегмента визначаються стабільність пропускної здатності та рівень затримок, тоді як для Wi-Fi додатково враховуються параметри рівня сигналу, інтерференції та варіативності навантаження бездротового середовища [14].

QoS-аналітичний модуль реалізує інтегральне оцінювання якості обслуговування на основі сукупності мережевих параметрів та їх вагових коефіцієнтів. Результатом функціонування модуля є формування узагальненого показника QoS для кожного доступного каналу передачі даних.

Інтелектуальний модуль прийняття рішень здійснює вибір оптимального каналу передачі даних між Ethernet та Wi-Fi на основі результатів QoS-аналізу та поточного стану мережевого середовища.

Термін «інтелектуальне управління» у даній роботі означає адаптивну систему прийняття рішень, яка на основі безперервного моніторингу параметрів мережі, багатокритеріального аналізу QoS-показників та формалізованих правил (включаючи механізм гістерезису) забезпечує автономне керування трафіком без безпосередньої участі оператора. Хоча запропонований підхід не застосовує методи машинного навчання чи штучного інтелекту в класичному розумінні, він реалізує ключові принципи інтелектуальних систем управління мережами: сприйняття середовища (моніторинг), аналіз ситуації (QoS-оцінювання), прийняття рішень та адаптацію до динамічних змін, що відповідає концепції intelligent network management.

Модуль керування трафіком реалізує маршрутизацію пакетів, балансування навантаження та пріоритезацію трафіку відповідно до сформованих рішень інтелектуального модуля.

Сегменти Ethernet та Wi-Fi формують фізичне середовище передачі даних гібридної мережі. Ethernet-сегмент забезпечує стабільність та передбачуваність параметрів передачі даних, тоді як Wi-Fi-сегмент характеризується мобільністю та гнучкістю доступу до мережевих ресурсів. Інтеграція зазначених сегментів у межах запропонованої архітектури дозволяє забезпечити адаптивне використання переваг обох технологій залежно від поточного стану мережі та вимог QoS [15].

Для формалізації процесу прийняття рішень у межах запропонованої архітектури доцільно використати математичну модель інтегрального оцінювання параметрів якості обслуговування. Зазначена модель дозволяє кількісно оцінювати ефективність використання каналів Ethernet та Wi-Fi на основі сукупності мережевих параметрів і забезпечує адаптивний вибір оптимального каналу передачі даних залежно від поточного стану мережевого середовища.

Для забезпечення коректного порівняння різнорідних параметрів якості обслуговування значення пропускної здатності, затримки передачі даних та втрат пакетів попередньо використовується min-max нормалізація:

$$x_n = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad x \epsilon \{B, D, P\}, \tag{1}$$

де B – пропускна здатність каналу; D – затримка передачі пакетів; P – рівень втрат пакетів; x_{max}, x_{min} – мінімальні та максимальні значення відповідного параметра, визначені на основі характеристик мережі або експериментальних даних.

Це дозволяє виконувати інтегральне оцінювання стану каналів Ethernet та Wi-Fi в межах єдиної математичної моделі.

Для коректного врахування впливу параметрів QoS використовуються такі правила:

- пропускна здатність є позитивним (benefit) показником;
- затримка та втрати пакетів є негативними (cost) показниками.

Тому для cost-параметрів використовується інверсія нормалізованого значення:

$$D_n^* = 1 - \frac{D - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}, \quad P_n^* = 1 - \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}}. \tag{2}$$

Інтегральний показник якості обслуговування визначається як зважена адитивна функція:

$$QoS_i = w_1 B_n + w_2 D_n^* + w_3 P_n^*, \tag{3}$$

де B_n – нормалізоване значення пропускної здатності каналу передачі даних; D_n^* – нормалізоване значення затримки передачі пакетів; P_n^* – нормалізований рівень втрат пакетів; w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти відповідних параметрів, що визначають їх відносну значущість у загальній оцінці якості обслуговування. При цьому виконується умова нормування: $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

Оскільки всі вхідні параметри нормалізовані до діапазону [0;1], інтегральний показник QoS також належить цьому діапазону.

Значення вагових коефіцієнтів можуть адаптивно змінюватися залежно від типу мережевого трафіку та вимог прикладного сервісу до параметрів QoS [16].

Для сервісів реального часу (VoIP, відеоконференції) пріоритетними параметрами є затримка передачі даних та втрати пакетів: $w_1 = 0{,}2; w_2 = 0{,}5;\ w_3 = 0{,}3$.

Для FTP- та web-трафіку основним критерієм є пропускна здатність каналу: $w_1 = 0{,}6; w_2 = 0{,}2;\ w_3 = 0{,}2$.

Оцінювання ефективності використання Ethernet та Wi-Fi сегментів виконується шляхом окремого розрахунку інтегральних показників QoS:

$$\begin{aligned} QoS_{i_{eth}} &= f\left(B_{n_{eth}}, D^*_{n_{eth}}, P^*_{n_{eth}}\right), \\ QoS_{i_{wifi}} &= f\left(B_{n_{wifi}}, D^*_{n_{wifi}}, P^*_{n_{wifi}}\right). \end{aligned} \tag{4}$$

Вибір оптимального каналу передачі даних виконується на основі максимального значення інтегрального показника QoS:

$$Channel = argmax(QoS_{i_{eth}}, QoS_{i_{wifi}}). \tag{5}$$

У випадку, якщо значення $QoS_{i_{eth}}$, перевищує $QoS_{i_{wifi}}$, передача трафіку здійснюється через Ethernet-сегмент. В іншому випадку використовується Wi-Fi-сегмент мережі.

Для уникнення частого перемикання між каналами передачі даних у системі використовується механізм гістерезису. Перемикання виконується лише у випадку, якщо різниця між інтегральними показниками QoS_i перевищує заданий поріг:

$$\left|QoS_{i_{eth}} - QoS_{i_{wifi}}\right| > \Delta, \quad (6)$$

де Δ – порогове значення гістерезису.

Для мультимедійного трафіку реального часу модель може бути розширена додатковим параметром варіації затримки передачі пакетів, що дозволяє підвищити точність оцінювання QoS у бездротових сегментах мережі.

Запропонована математична модель дозволяє реалізувати адаптивний механізм балансування мережевого навантаження та забезпечує підвищення ефективності функціонування гібридної телекомунікаційної мережі.

Розглянемо алгоритм інтелектуального управління трафіком у гібридній мережі Ethernet/Wi-Fi. Алгоритм реалізує адаптивне управління маршрутизацією трафіку на основі інтегральної оцінки стану мережевих каналів та поточного навантаження системи.

Крок 1. Ініціалізація системи

Запускаються мережеві інтерфейси Ethernet і Wi-Fi та активуються модулі моніторингу, оцінювання QoS і прийняття рішень.

Крок 2. Моніторинг мережевого стану

Система здійснює безперервний збір параметрів якості обслуговування для кожного каналу (Ethernet і Wi-Fi).

Крок 3. Попередня обробка даних

Отримані мережеві метрики приводяться до уніфікованого безрозмірного вигляду для подальшого порівняльного аналізу.

Крок 4. Оцінювання стану каналів

Виконується визначення інтегрального показника якості обслуговування для кожного з доступних каналів передачі даних.

Крок 5. Прийняття рішення щодо маршрутизації

Інтелектуальний модуль здійснює порівняльний аналіз стану каналів та визначає пріоритетний напрям передачі трафіку.

Крок 6. Адаптивне перемикання каналів

Для запобігання нестабільності маршрутизації застосовується механізм порогового перемикання (гістерезису), що виключає надмірно часті зміни каналу.

Крок 7. Передача трафіку

Мережевий трафік спрямовується через обраний канал (Ethernet або Wi-Fi).

Крок 8. Циклічне оновлення стану

Процедура повторюється з заданою періодичністю, що забезпечує адаптацію до змін навантаження мережі в реальному часі.

Запропонований алгоритм реалізує послідовність операцій, що базуються на попередньо визначеній математичній моделі QoS та забезпечує її практичне застосування в умовах динамічного мережевого середовища.

Для оцінювання ефективності запропонованої архітектури проведено імітаційне моделювання функціонування гібридної мережі Ethernet/Wi-Fi в умовах динамічного навантаження. Моделювання виконувалося в середовищі Network Simulator 3 (NS-3) версії 3.36 з використанням модулів для моделювання IEEE 802.3 (Ethernet) та IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). Сценарій відповідав типовій корпоративній мережі з параметрами Gigabit Ethernet та стандарту IEEE 802.11ax.

У процесі моделювання оцінювався вплив запропонованого механізму адаптивного вибору каналу передачі даних на параметри QoS, зокрема затримку передачі, втрати пакетів, варіацію затримки та пропускну здатність мережі.

Кількість активних користувачів змінювалася в межах від 10 до 50 з кроком 5, що дозволило дослідити вплив рівня навантаження на параметри QoS та ефективність адаптивного вибору каналу передачі даних. Навантаження формувалося як змішаний трафік: VoIP (Constant Bit Rate, 64 кбіт/с), відеоконференції (CBR, 4 Мбіт/с) та фоновий web/FTP-трафік (модель ON/OFF із параметрами, характерними для корпоративних мереж). Кожен сценарій моделювання повторювався 30 разів із різними початковими значеннями генератора випадкових чисел для забезпечення статистичної достовірності. Результати усереднювалися, а 95% довірчі інтервали розраховувалися на основі отриманої вибірки. Числові значення, наведені в табл. 2 та на рис. 2-3, отримано шляхом обробки лог-файлів симулятора NS-3 за допомогою скриптів на мові Python (бібліотеки pandas та matplotlib).

Для проведення імітаційного моделювання було визначено основні параметри гібридної мережі Ethernet/Wi-Fi, які відповідають типовим умовам функціонування корпоративної телекомунікаційної інфраструктури. Основні параметри моделювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри моделювання гібридної мережі

Параметр	Значення
Пропускна здатність Ethernet	1 Гбіт/с
Стандарт Wi-Fi	IEEE 802.11ax
Кількість користувачів	10-50
Швидкість VoIP-трафіку	64 кбіт/с
Швидкість відеотрафіку	4 Мбіт/с
Розмір пакета	1500 байт
Тривалість моделювання	300 с

Порівняння ефективності виконувалося між статичним механізмом маршрутизації трафіку та запропонованою адаптивною QoS-моделлю управління гібридною мережею.

У статичному підході передача даних здійснювалася через фіксований канал незалежно від поточного стану мережевого середовища. У запропонованій моделі вибір каналу передачі здійснювався адаптивно на основі інтегрального показника QoS.

Для оцінювання ефективності запропонованого підходу проведено порівняння основних показників QoS зі статичною схемою маршрутизації. Результати порівняльного аналізу наведено в табл. 2**.**

Таблиця 2

Результати оцінювання ефективності QoS-моделі

Параметр	Статична маршрутизація	Запропонована QoS модель	Покращення
Середня затримка	48 мс	21 мс	↓ 56 %
Втрати пакетів	4,8 %	1,2 %	↓ 75 %
Пропускна здатність	420 Мбіт/с	610 Мбіт/с	↑ 45 %
Варіація затримки	18 мс	7 мс	↓ 61 %

Як видно з таблиці 2, запропонований підхід дозволяє суттєво покращити всі ключові параметри QoS. Для більш детального аналізу поведінки системи при різному рівні навантаження розглянуто динаміку показників на рисунках 2 та 3.

Для детальнішого аналізу впливу навантаження на характеристики мережі досліджено залежність середньої затримки передачі пакетів від кількості активних користувачів. Відповідні результати наведено на рис. 2.

На рисунку 2 представлено залежність середньої затримки передачі пакетів від кількості активних користувачів. Видно, що при навантаженні понад 25 користувачів у статичній схемі затримка стрімко зростає, тоді як адаптивна модель утримує її на рівні нижче 25-28 мс завдяки динамічному перемиканню на Ethernet-сегмент.

Аналогічно було проаналізовано зміну рівня втрат пакетів залежно від навантаження мережі. Отримані результати наведено на рис. 3.

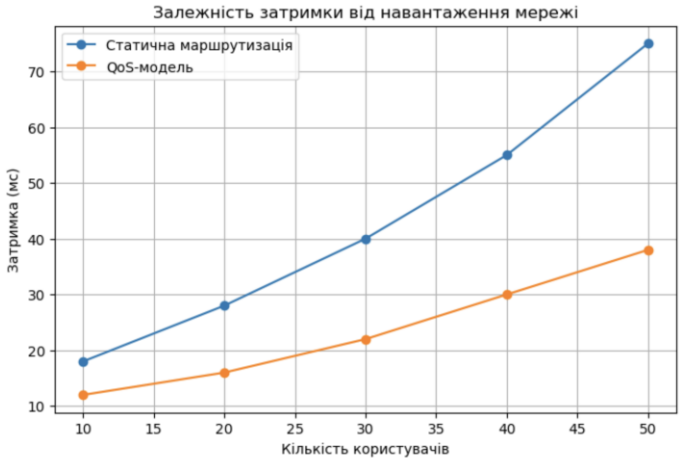


Рис. 2. Залежність затримки від навантаження мережі

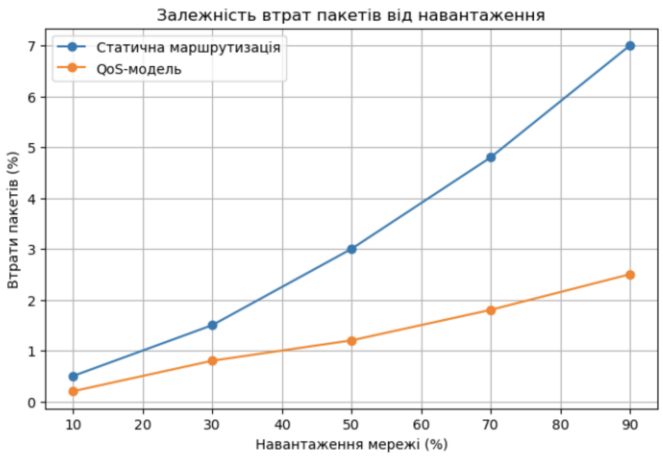


Рис. 3. Залежність втрат пакетів від навантаження

Рисунок 3 демонструє залежність рівня втрат пакетів від навантаження мережі. Адаптивна модель дозволяє обмежити втрати пакетів навіть при високому навантаженні (40-50 користувачів), у той час як статична маршрутизація показує деградацію до 6-8 %.

Отримані результати підтверджують, що запропонована інтегральна QoS-модель з механізмом гістерезису забезпечує значне підвищення стабільності та ефективності гібридної мережі в умовах динамічного навантаження.

Зокрема, зі збільшенням кількості активних користувачів спостерігається менший приріст затримки для адаптивної моделі порівняно зі статичною маршрутизацією. Це пояснюється тим, що запропонований механізм здійснює динамічний вибір каналу передачі даних між Ethernet та Wi-Fi на основі інтегрального показника QoS.

Аналогічна тенденція спостерігається для рівня втрат пакетів: при високому навантаженні (понад 70%) статична схема демонструє різке зростання втрат, тоді як адаптивна модель дозволяє обмежити їх рівень за рахунок перенаправлення трафіку на більш стабільний канал Ethernet.

Отримані результати підтверджують ефективність використання інтегральної QoS-моделі для управління гібридною мережею Ethernet/Wi-Fi та доцільність її застосування в умовах динамічного навантаження корпоративних телекомунікаційних систем.

Висновки. У роботі досліджено задачу організації інтелектуального управління гібридною телекомунікаційною мережею Ethernet/Wi-Fi в умовах динамічного навантаження та неоднорідності характеристик каналів передачі даних. Показано, що існуючі статичні підходи до маршрутизації не забезпечують необхідного рівня якості обслуговування (QoS) у сучасних корпоративних мережах із змінним трафіком.

У результаті дослідження розроблено архітектуру інтелектуального управління гібридною мережею, яка об’єднує модулі моніторингу мережевих параметрів, оцінювання QoS та адаптивного прийняття рішень щодо вибору каналу передачі даних. Запропонована архітектура забезпечує динамічний розподіл трафіку між Ethernet та Wi-Fi сегментами залежно від поточного стану мережевого середовища.

Також розроблено математичну модель інтегрального оцінювання QoS на основі нормалізованих показників пропускної здатності, затримки та втрат пакетів із використанням вагових коефіцієнтів, що дозволяє формалізувати процес порівняння стану гібридних каналів та прийняття рішень щодо маршрутизації трафіку. Також запропоновано алгоритм адаптивного вибору каналу передачі даних із використанням механізму гістерезису для запобігання надмірно частим перемиканням між каналами.

За результатами імітаційного моделювання встановлено, що запропонована архітектура інтелектуального управління гібридною мережею Ethernet/Wi-Fi забезпечує суттєве покращення показників якості обслуговування в умовах динамічного навантаження (10-50 користувачів). Порівняно зі статичним підходом маршрутизації середня затримка передачі даних зменшилася на 56% (з 48 мс до 21 мс), втрати пакетів знизилися на 75% (з 4,8% до 1,2%), варіація затримки зменшилася на 61% (з 18 мс до 7 мс), а ефективна пропускна здатність мережі зросла на 45% (з 420 Мбіт/с до 610 Мбіт/с).

Отримані результати імітаційного моделювання підтверджують високу ефективність запропонованої архітектури та математичної моделі інтегрального оцінювання QoS. У порівнянні зі статичною маршрутизацією адаптивна модель забезпечує суттєву стабілізацію параметрів якості обслуговування та значно зменшує деградацію продуктивності мережі при зростанні навантаження. Запропонований підхід демонструє практичну доцільність застосування в сучасних корпоративних телекомунікаційних системах з підвищеними вимогами до QoS, забезпечуючи підвищення стабільності функціонування мережі, адаптивність до динамічних змін навантаження та більш раціональне використання ресурсів гібридної Ethernet/Wi-Fi інфраструктури.

Перспективи подальших досліджень пов’язані з інтеграцією розробленої моделі в SDN-контролери для централізованого управління, застосуванням методів машинного навчання для прогнозування навантаження та проактивного вибору каналу передачі даних, розширенням моделі додатковими параметрами (енергоспоживання, вартість передачі), а також проведенням натурних експериментів на реальному мережевому обладнанні в умовах виробничої корпоративної мережі.

Література

1. Ericsson. Ericsson Mobility Report November 2025. Stockholm : Ericsson, 2025. URL: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report (дата звернення: 15.05.2026).
2. Zoppi S. et al. Achieving Hybrid Wired/Wireless Industrial Networks with TSN and 5G. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14, No. 5. P. 2307-2319. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2018.2803122.
3. Mohammed S. A. Q., Jung J. A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 19572-19585. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055027.
4. Pandey B., Farulla G. A., Indaco M., Iovino L., Prinetto P. Design and review of water management system using Ethernet, Wi-Fi 802.11n, ModBus, and other communication standards. *Wireless Personal Communications*. 2018. Vol. 106, no. 4. P. 1677-1699. DOI: https://doi.org/10.1007/s11277-018-5380-7.

5. Wu X. et al. QoS-Driven Load Balancing in Hybrid LiFi and WiFi Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021. Vol. 21, No. 5. P. 2136-2146. DOI: https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3109716.
6. Aslam M., Liu W., Jiao X., Haxhibeqiri J., Miranda G., Hoebeke J., Marquez-Barja J., Moerman I. Hardware efficient clock synchronization across Wi-Fi and Ethernet-based network using PTP. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 18, no. 6. P. 3808-3819. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2021.3120005.
7. Elbasher W., Mustafa A., Osman A., Anastasi G., Borgia E., Conti M., Gregori E., Sommer J., Gunreben S., Feller F., Kohn M., Mifdaoui A., Sa D., Scharf J. A comparison between Li-Fi, Wi-Fi, and Ethernet standards. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2015. Vol. 4, no. 12. P. 1-4. DOI: https://doi.org/10.21275/v4i12.nov151778.
8. Manzanares-Lopez P., Malgosa-Sanahuja J., Muñoz-Gea J. P. A Software-Defined Networking Framework to Provide Dynamic QoS Management in IEEE 802.11 Networks. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 7. Art. 2247. DOI: https://doi.org/10.3390/s18072247.
9. Qu Q., Li B., Yang M. et al. Survey and Performance Evaluation of the Upcoming Next Generation WLAN Standard – IEEE 802.11ax. *arXiv preprint arXiv:1806.05908*. 2018. 155 p. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.05908.
10. Bai J., Wang X., Mei J. et al. Hybrid Services QoS Enhancement by Joint Traffic and Access Management in Unsaturated IEEE 802.11ax Network. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2023. Vol. 10, No. 4. P. 3281-3294. DOI: https://doi.org/10.1109/TNSE.2023.3256385.
11. Huang X., Zeng M., Xie K. Intelligent traffic control for QoS optimization in hybrid SDNs. *Computer Networks*. 2021. Vol. 189. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107877.
12. López-Pérez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L. et al. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax. *arXiv preprint arXiv:1902.04320*. 2019. 6 p. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.04320.
13. Xiao Y. et al. Scalable QoS-Aware Multipath Routing in Hybrid Software-Defined Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23, No. 11. P. 10628-10646. DOI: https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3379191.
14. Ancillotti E., Pescosolido L., Passarella A. Toward Hybrid COTS-based LiFi/WiFi Networks with QoS Requirements in Mobile Environments. *arXiv preprint arXiv:2511.00210*. 2025. 8 p. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.00210.
15. Peng G. et al. Achieving Class-Aware Mixed-Flow Scheduling in Hybrid Wired-Wireless Time-Sensitive Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2025. Vol. 43, No. 8. P. 2954-2968. DOI: https://doi.org/10.1109/JSAC.2025.3574589.
16. Bellavista P., Giannelli C., Lagkas T., Sarigiannidis P. Multi-domain SDN controller federation in hybrid FiWi-MANET networks. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2018. Vol. 2018. Article no. 103. DOI: https://doi.org/10.1186/s13638-018-1119-0.

Dyra V.V. Architecture of intelligent management of hybrid ethernet/wi-fi networks in corporate systems

The article addresses the problem of organizing intelligent traffic management in corporate telecommunication networks based on a hybrid Ethernet/Wi-Fi infrastructure. The relevance of the study is driven by the rapid growth of network traffic volumes, the increasing number of mobile devices, the widespread adoption of cloud services, and the rising Quality of Service (QoS) requirements in modern corporate information systems. In dynamic network environments, there is a growing need to ensure stable data transmission, minimize delays and packet losses, and provide efficient load distribution between wired and wireless network segments.

The aim of the study is to develop an architecture for intelligent management of hybrid Ethernet/Wi-Fi networks and a mathematical model for the integrated evaluation of QoS parameters to support decision-making regarding data transmission channel selection. A multi-level architecture is proposed that integrates modules for network parameter monitoring, network state analysis, QoS evaluation, and intelligent traffic routing management. The architecture takes into account the operational characteristics of Ethernet and Wi-Fi technologies, including differences in bandwidth stability, delay levels, interference impact, and variability of wireless channel conditions.

A mathematical model for integrated QoS assessment has been developed based on normalized indicators of bandwidth, delay, and packet loss using weighting coefficients to determine the relative significance of each parameter. The proposed approach enables quantitative comparison of Ethernet and Wi-Fi channel conditions and supports informed decisions regarding optimal network traffic distribution. The research results can be applied in the design, modernization, and adaptive management of corporate telecommunication networks with increased QoS requirements, as well as in the development of intelligent traffic distribution systems, decision-support mechanisms for communication channel selection, and stable operation of network services under dynamic traffic load conditions.

Keywords: *hybrid network, Ethernet, Wi-Fi, QoS, traffic routing, intelligent management, telecommunication systems.*

Дира Вадим Володимирович – аспірант кафедри Інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет (м. Вінниця)
https://orcid.org/0009-0004-5560-1409
vad.thernes@gmail.com

Дата першого надходження статті 15.07.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 26.08.2026.
Дата публікації 30.09.2026.

Стаття з відкритим доступом, відповідно до умов ліцензії **Creative Commons (CC BY 4.0)**