

Дира В.В.

Вінницький національний технічний університет

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ ETHERNET І WI-FI У ГІБРИДНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ІНФРАСТРУКТУРАХ

У статті розглянуто проблему оптимізації взаємодії дротових (Ethernet) та бездротових (Wi-Fi) технологій у складі гібридних телекомунікаційних інфраструктур. Сучасні корпоративні, промислові та розподілені обчислювальні середовища характеризуються високим рівнем трафіку, мобільністю пристроїв і необхідністю забезпечення гарантованої якості обслуговування (QoS). Враховуючи відмінності в механізмах доступу до каналу, обмеження частотного ресурсу та динамічність навантаження, постає проблема вибору оптимальної конфігурації використання інтерфейсів Ethernet і Wi-Fi. Для її вирішення авторами запропоновано метод симуляційного моделювання, який реалізовано у вигляді програмного засобу. Розроблений симулятор дозволяє досліджувати вплив ключових параметрів (кількості вузлів, імовірності втрат, базових затримок) на показники QoS у гібридній мережі.

Механізм реалізовано за допомогою мови Python із використанням бібліотек *random* і *matplotlib*. Конфігураційні параметри задаються на етапі ініціалізації, після чого система здійснює моделювання трафіку у сегментах Ethernet і Wi-Fi окремо, з урахуванням стохастичної природи втрат і зміни затримок відповідно до рівня навантаження. Результати симуляції агрегуються, візуалізуються та аналізуються. На основі цього формується *score*-функція ефективності та автоматично генеруються текстові рекомендації щодо оптимізації конфігурації.

У межах експериментального дослідження проведено серію симуляцій із кількістю вузлів від 10 до 100. Результати показали, що Wi-Fi характеризується суттєво вищим рівнем коливань затримки та втрат при масштабуванні. У свою чергу, Ethernet демонструє більшу стабільність, що підтверджує доцільність балансування навантаження на користь дротового сегмента при зростанні мережевого трафіку.

Запропонований метод дозволяє ідентифікувати критичні конфігурації, прогнозувати деградацію QoS та приймати інформовані рішення щодо переналаштування гібридної інфраструктури. Особливістю підходу є інтеграція автоматизованого аналізу та генерації рекомендацій, що значно підвищує зручність та ефективність використання симулятора у практичному середовищі проектування та експлуатації мереж. Методика є перспективною для подальшого розвитку – зокрема, для інтеграції з системами моніторингу реального часу, мультиінтерфейсним керуванням і адаптивною маршрутизацією у багаторівневих мережах.

Ключові слова: гетерогенна мережа, QoS, симуляція трафіку, Wi-Fi, Ethernet, оптимізація конфігурації, гібридна інфраструктура, затримка, втрати пакетів, автоматичне моделювання.

Постановка проблеми. Сучасні гібридні телекомунікаційні інфраструктури, що поєднують дротові сегменти (Ethernet) із бездротовими (Wi-Fi), відіграють ключову роль у побудові корпоративних мереж, промислових систем автоматизації та розподілених обчислювальних середовищ. Водночас із зростанням трафіку, мобільності пристроїв та часової чутливості додатків виникають складнощі в забезпеченні гарантованої якості обслуговування (QoS) та справедливого розподілу ресурсів між різнорідними каналами доступу. На відміну від одноманітних інтерфейсів, гібридні конфігурації потребують складних механізмів балансування навантаження, зниження втрат, уникнення колізій і мінімізації затримок передачі.

Попри існуючі стандарти (на кшталт IEEE 802.11 або механізмів LBT в NR-U), координація взаємодії між технологіями з різними механізмами доступу до каналу (контенційний у Wi-Fi і запланований в Ethernet або NR-U) залишається відкритим питанням, особливо в умовах обмежених частотних ресурсів та високої щільності мережевих вузлів. Навіть удосконалені методи доступу до каналу, зокрема *mini-slots* та гнучка нумерологія в NR-U, не забезпечують справедливого співіснування з Wi-Fi у діапазоні 5 ГГц. Це зумовлює необхідність впровадження додаткових механізмів координації [1]. У той час як підходи на основі TSN-архітектур виявляють високу ефективність у промислових дротових інфраструктурах, вони демонструють обмежену

адаптивність до умов із бездротовими сегментами через свою статичну природу [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оптимізація взаємодії Ethernet і Wi-Fi у гібридних телекомунікаційних інфраструктурах активно вивчається в сучасних наукових дослідженнях. Публікації демонструють багатогранність проблеми: від розподілу трафіку та ресурсів до енергоефективності та безпеки в розподілених системах.

У дослідженні Косек-Шотт К. (Kosek-Szott K.) спільно зі співавторами [1] було здійснено глибокий аналіз продуктивності каналного доступу NR-U (New Radio – Unlicensed) у сценаріях співіснування з Wi-Fi у діапазоні 5 ГГц. Автори розробили симуляційну модель, яка враховує вплив гнучкої нумерології (scalable numerology) та використання mini-slots – механізмів, що дозволяють зменшити тривалість слотів та підвищити гнучкість у плануванні передачі. На відміну від LTE-LAA, який потребує передачі сигнального завадника (reservation signal, RS) для утримання каналу до початку слота, NR-U застосовує *gap-based* доступ без RS, що дозволяє уникнути витрат радіоресурсів. Було проведено як симуляційне моделювання, так і експериментальну валідацію з використанням FPGA-прототипів Wi-Fi, LAA та NR-U. Вимірювані метрики включали нормалізований час зайнятості каналу (channel occupancy time), імовірність колізій та ефективний час передачі. Результати продемонстрували, що NR-U з короткими слотами (наприклад, 9–18 мкс) здатен забезпечити вищу справедливість доступу до каналу порівняно з LAA та уникнути колізій з Wi-Fi. При цьому зростання тривалості слотів у NR-U (до 1000 мкс) призводить до деградації продуктивності й несправедливого розподілу ресурсу – Wi-Fi починає домінувати. Важливо, що автори зосередили увагу не на пропускній здатності, а саме на метриках справедливості та ефективного використання часу ефіру, що дозволило усунути вплив специфікацій PHY-рівня (модуляція, швидкість тощо) й отримати уніфіковане порівняння. Це робить дослідження особливо цінним для подальших робіт, що орієнтовані на баланс між технологіями у спільному середовищі без ліцензування.

Гарроппо Р. Г. (Garroppo R.G.) зі співавторами [2] запропонували модель для розгортання Wi-Fi 802.11ad-інфраструктури в системах з часовою чутливістю (TSN). Результати моделювання показали, що оптимальна конфігурація

дозволяє знизити кількість увімкнених точок доступу на 35% у порівнянні з евристичними підходами, зберігаючи необхідні рівні обслуговування трафіку реального часу.

Дослідження Ехсле С. (Oechsle S.) та колег [3] зосереджено на управлінні конфігурацією та розгортанням додатків реального часу в гетерогенних мережах на основі TSN. Результати довели, що гнучке віртуалізоване розгортання дозволяє ефективно переміщувати сервіси між вузлами мережі без втрати якості обслуговування, що підвищує адаптивність до змін у виробничому середовищі.

У роботі Бьом С. (Böhm S.) із співавторами [4] запропоновано методологію Radio-in-the-Loop (RIL) – симуляційно-емуляційний підхід для моделювання енергоефективних і когнітивних IoT-систем у розумних містах. Автори реалізували гібридну платформу, що поєднує протокольную симуляцію у середовищі OMNeT++ з реальними радіопередачами через SDR-модулі, забезпечуючи точне відтворення стану фізичного каналу. У межах кейс-стаді, присвяченого крос-рівневій оптимізації, було змодельовано адаптивне регулювання чутливості приймача (RX gain) на основі значень Link Quality Indicator (LQI) та Energy Detection (ED), що дозволило знизити рівень прийому до 30 дБ без втрат якості зв'язку. Такий підхід забезпечив значне зменшення енергоспоживання в сенсорних вузлах без шкоди для надійності комунікацій.

Сценарій передбачав зворотний зв'язок між рівнями PHY і додатком, де алгоритм у вищому шарі на основі вимірювань LQI/ED модифікував RX gain в SDR-обладнанні. Було продемонстровано, що навіть при зниженому посиленні приймача до 59 дБ система зберігає максимальну якість каналу. Методологія RIL дозволила також реалізувати модульну базу даних параметрів PHY (PIB), доступну для міжрівневої взаємодії.

Дослідження є важливим прикладом крос-рівневої оптимізації з реальними радіоумовами, а не лише на симуляційному рівні, і доводить ефективність комбінованих підходів для управління енергоефективністю в умовах обмежених ресурсів Smart City-мереж.

Беллі Д. (Belli D.) разом зі співавторами [5] проаналізували новітній стандарт Matter, що використовує гібридний підхід з включенням Ethernet і Wi-Fi. Висновки авторів підтверджують, що комбінація протоколів забезпечує високу стійкість до збоїв і покращену масштабованість в IoT-сценаріях.

У роботі Рахім Дж. А. (Rahim J.A.) та ін. [6] представлено комплексний огляд контролерів програмно-конфігурованих мереж (SDN) з відкритим вихідним кодом, зокрема таких як NOX, POX, Ryu, Floodlight, OpenDayLight (ODL) та Open Network Operating System (ONOS). Основна увага зосереджена на архітектурі, функціональності та можливостях масштабування цих контролерів, що мають вирішальне значення для операторів зв'язку у динамічних середовищах, де одночасно використовуються Ethernet і Wi-Fi.

Особливу увагу приділено архітектурі ONOS, яка розроблена як кластеризована система з високою відмовостійкістю та масштабованістю, і орієнтована на централізоване управління топологією мережі, маршрутизацією та балансуванням навантаження. Система підтримує північно- та південнобічні API (NBI/SBI), що дозволяє застосункам динамічно реагувати на зміни у стані мережі.

У розділах, присвячених продуктивності, наведено емпіричні результати ONOS, зокрема в контексті платформи SDN-IP. Згідно з дослідженням, реакція ONOS на події зміни топології (наприклад, відмова комутатора) покращилася з 10,4 мс у попередніх версіях до менше ніж 10 мс у версії Magpie, а швидкість обробки подій зросла з 3 тис. до 5 тис. подій/с. Крім того, у реальних сценаріях переналаштування маршрутів між Ethernet і Wi-Fi з використанням ONOS дало змогу знизити середню затримку передавання пакетів у середньому на 18%.

Робота також охоплює практичні приклади впровадження, зокрема платформу SDN-IP, SDX-L2/L3, Mobile-CORD, а також інфраструктури з віртуалізацією функцій мережі (NFV), підтверджуючи придатність ONOS до впровадження у реальних мережах операторського рівня. Автори підкреслюють, що відкрита архітектура SDN-контролерів не лише дозволяє уникнути vendor lock-in, а й забезпечує гнучкість та швидкість інновацій у багаторівневих телекомунікаційних системах.

Сара А. (Sarah A.) спільно з іншими дослідниками [7] вивчали розподіл обчислювальних ресурсів у МЕС-середовищах. Встановлено, що правильна оркестрація між Wi-Fi, Ethernet і обчислювальними вузлами дозволяє зменшити енергоспоживання до 22%, зберігаючи затримки нижче критичного порогу.

У публікації Талібкха М. (Talebkhah M.) з колегами [8] проведено огляд сучасних підходів до оффлоадингу обчислювальних задач

у транспортних мережах нового покоління, орієнтованих на концепцію Vehicular Edge Computing (VEC). Автори висвітлюють архітектуру, ключові виклики та переваги VEC у контексті Інтернету транспортних засобів (IoV), зокрема в умовах 5G/6G та Industry 4.0. Замість централізованих хмарних сервісів пропонується використання розподілених обчислювальних потужностей на краю мережі, зокрема на базі дорожніх одиниць (RSU) та інфраструктурних вузлів Ethernet, що зменшує затримки та навантаження на магістраль.

Особливу увагу приділено стратегіям обрання цільового вузла для виконання задачі, які враховують показники затримки, енергоспоживання та доступність ресурсів. Визначено три основні схеми оффлоадингу: повну, часткову та бінарну. Результати аналізу численних джерел, узагальнені в таблицях, свідчать про те, що передача обчислювальних задач до найближчих вузлів через дротове підключення (Ethernet/RSU) дозволяє знизити середній час відповіді на 15% і більше у порівнянні з бездротовими (Wi-Fi) або віддаленими хмарними рішеннями. Також доведено, що локалізоване оброблення зменшує енергоспоживання та забезпечує стабільнішу якість сервісу в умовах динамічної топології.

Важливо, що огляд не обмежується загальними концепціями, а також містить класифікацію існуючих алгоритмів оффлоадингу, в тому числі на основі ігрової теорії, евристик і методів оптимізації. Робота підкреслює важливість інтеграції Ethernet-сегментів як енергоефективної альтернативи для передачі обчислювального навантаження у гібридних транспортних системах нового покоління.

Станко Г. (Stanco G.) зі співавторами [9] запропонував класифікацію загроз для мульти-інтерфейсних мереж. Дослідники показали, що основними векторами атак залишаються точки переходу між дротовими і бездротовими сегментами, що вимагає посилення захисту саме на рівні інтеграції.

У роботі Станко Г. (Stanco G.) з колегами [10] представлено DewROS2 – платформу для Dew Robotics, яка забезпечує адаптивну маршрутизацію і моніторинг ресурсів у розподілених робототехнічних системах на базі ROS 2. Основна мета DewROS2 – надання роботам можливості приймати обґрунтовані рішення щодо виконання задач на основі актуального стану системи, включаючи обчислювальні, енергетичні та мережеві параметри. Архітектура включає два типи вузлів:

основні вузли (main nodes) для виконання задач і вузли моніторингу (monitoring nodes), які вимірюють метрики продуктивності (CPU, батарея, затримки, пропускна здатність, черги передачі тощо) й передають ці дані іншим компонентам системи через ROS topics.

У рамках експериментів із безпілотником (UAV) та PiCar-моделлю автомобіля автори порівняли ефективність гібридної маршрутизації через Ethernet і Wi-Fi у змінних умовах. У сценаріях пошуку і рятування UAV автоматично адаптував якість відео (роздільну здатність) залежно від доступної пропускної здатності, яку вимірювали активні вузли моніторингу на основі D-ITG та iPerf3. Було реалізовано адаптивний алгоритм, який знижував роздільну здатність відео при перевантаженні мережі (черги >1 МБ) і підвищував її за сприятливих умов. У контрольованому середовищі цей механізм дозволив підтримувати оптимальну якість відео без перевищення пропускної здатності, тоді як у реальних сценаріях система успішно зменшувала навантаження у зонах зі слабким Wi-Fi сигналом.

Згідно з результатами, гібридна схема з динамічним перемиканням між Ethernet і Wi-Fi зменшила середню затримку передачі відео до Fog-хоста на 23% у порівнянні з фіксованою архітектурою. Крім того, платформа не створює істотного навантаження: пасивні вузли споживають лише 1–3% CPU, а активні можуть бути активовані за потреби. DewROS2 демонструє, як моніторинг на рівні системи може служити не лише для виявлення збоїв, але й для підвищення продуктивності, що особливо важливо для критичних застосунків на кшталт автономного пошуку і рятування.

Проведений огляд дозволяє виокремити кілька ключових напрямів у сучасних дослідженнях. Частина робіт (наприклад, [1], [8]) демонструє ефективність використання mini-slots та гнучкої нумерології в NR-U для зменшення затримок і покращення співіснування з Wi-Fi. Інші дослідження (як-от [6], [7]) фокусуються на SDN/EC-рішеннях, які забезпечують адаптивність маршрутів і ефективний розподіл ресурсів між Ethernet і Wi-Fi, зокрема в умовах мобільності або змін навантаження.

Водночас більшість робіт орієнтовані або на фізичний рівень, або на архітектурні аспекти, без системного моделювання динаміки QoS у реальних сценаріях. Також бракує симуляційних досліджень, які б поєднували автоматичне виявлення конфліктних конфігурацій із рекомендаційними

механізмами. Це вказує на існуючу прогалину, яку намагається компенсувати запропоноване в статті рішення – симулятор із вбудованою score-функцією для інтегральної оцінки продуктивності та генерації конфігураційних рекомендацій.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування методу оптимізації взаємодії Ethernet і Wi-Fi у гібридних телекомунікаційних інфраструктурах шляхом створення програмного симулятора, який дозволяє моделювати конфлікти каналів, оцінювати показники затримок і втрат трафіку, а також автоматично формувати рекомендації щодо оптимальної конфігурації мережі.

Виклад основного матеріалу. З метою забезпечення ефективної взаємодії між дротовими (Ethernet) та бездротовими (Wi-Fi) сегментами в умовах гібридної телекомунікаційної інфраструктури постала необхідність у створенні інструменту, що дозволяє досліджувати вплив конфігураційних параметрів на ключові показники якості обслуговування (QoS), зокрема середню затримку та ймовірність втрати пакетів. Унаслідок високої динамічності навантаження, різних характеристик фізичного середовища передачі та різної чутливості до конфліктів у середовищі доступу виникає складність у визначенні оптимального балансу між використанням Ethernet і Wi-Fi. Для вирішення цієї задачі було розроблено програмний симулятор, що реалізує стохастичне моделювання трафіку з урахуванням втрат, варіативної затримки та рівня навантаження на кожен інтерфейс. Симулятор дозволяє аналізувати типові сценарії роботи гібридної мережі, оцінювати вплив зростання кількості вузлів на продуктивність системи, а також автоматично формувати конфігураційні рекомендації на основі заданих граничних значень параметрів QoS. Розробка даного інструменту спрямована на формалізацію підходу до оптимізації структури гібридних мереж у корпоративному середовищі, де важливо дотримуватись заданих показників надійності, масштабованості та продуктивності в умовах обмежених ресурсів і змінної мережевої активності.

Для реалізації гнучкого та інтерпретованого інструменту для дослідження гібридних телекомунікаційних мереж було обрано мову програмування Python, яка забезпечує високий рівень читабельності коду та має широкий спектр бібліотек для математичного моделювання й візуалізації результатів. У рамках розробки симулятора

було використано модуль `random` для реалізації стохастичних процесів, пов'язаних із генерацією втрат пакетів і варіативної затримки передачі, а також бібліотеку `matplotlib` – як основний інструмент побудови графіків, діаграм та аналітичних вікон з рекомендаціями.

Вхідні параметри задаються користувачем у консолі в діалоговому режимі при запуску програми, як показано на рис. 1.

```
Мінімальна кількість вузлів: 10
Максимальна кількість вузлів: 100
Крок збільшення кількості вузлів: 10
Кількість ітерацій симуляції (наприклад, 500): 500
Ймовірність втрати для Ethernet (наприклад, 0.01): 0.01
Ймовірність втрати для Wi-Fi (наприклад, 0.05): 0.05
Середня затримка Ethernet (мс, наприклад, 2): 2
Середня затримка Wi-Fi (мс, наприклад, 5): 5
```

Рис. 1. Постановка вхідних параметрів

Примітка: для тестування було обрано такі значення вхідних параметрів, оскільки вони відображають типові конфігурації корпоративних мереж і дозволяють виявити критичні пороги навантаження, при яких погіршуються показники затримок і втрат у каналах Ethernet і Wi-Fi.

До вхідних параметрів належать:

- мінімальна, максимальна кількість вузлів та крок приросту (серія експериментів);
- кількість ітерацій симуляції (визначає обсяг зібраних статистичних даних);
- ймовірності втрати пакетів для сегментів Ethernet і Wi-Fi (modeling packet loss);

- базові затримки для кожного з інтерфейсів передачі (модель середнього часу доставки).

У випадку помилки введення користувача передбачено використання значень за замовчуванням. Це забезпечує стійкість симулятора до некоректних параметрів запуску.

Розроблене програмне рішення реалізоване за принципом модульної архітектури, де кожен функціональний блок відповідає за окремий етап симуляції мережі. Такий метод забезпечує логічне розділення задач, підвищує гнучкість адаптації до нових сценаріїв та спрощує масштабування рішення.

Архітектура програмного рішення (рис. 2) складається з кількох логічно виокремлених функціональних компонентів, інтегрованих у послідовний обчислювальний конвеєр.

Інтерфейс взаємодії з користувачем та обробка вхідних даних детально описані вище, тому на цьому етапі розглянемо виключно процес моделювання та обробки результатів.

Після збору вхідних даних активується модуль симуляції трафіку, який здійснює генерацію подій на основі стохастичних методів. У моделі враховуються параметризовані коефіцієнти навантаження (k_{eth} , k_{wifi}), що модифікують базову затримку в залежності від кількості вузлів, а також здійснюється відбір подій на основі заданих ймовірностей втрат.

Дані симуляції передаються до аналітичного модуля, де відбувається обчислення ключових QoS-метрик, зокрема середньої затримки, відносної кількості втрат, а також інтегрального

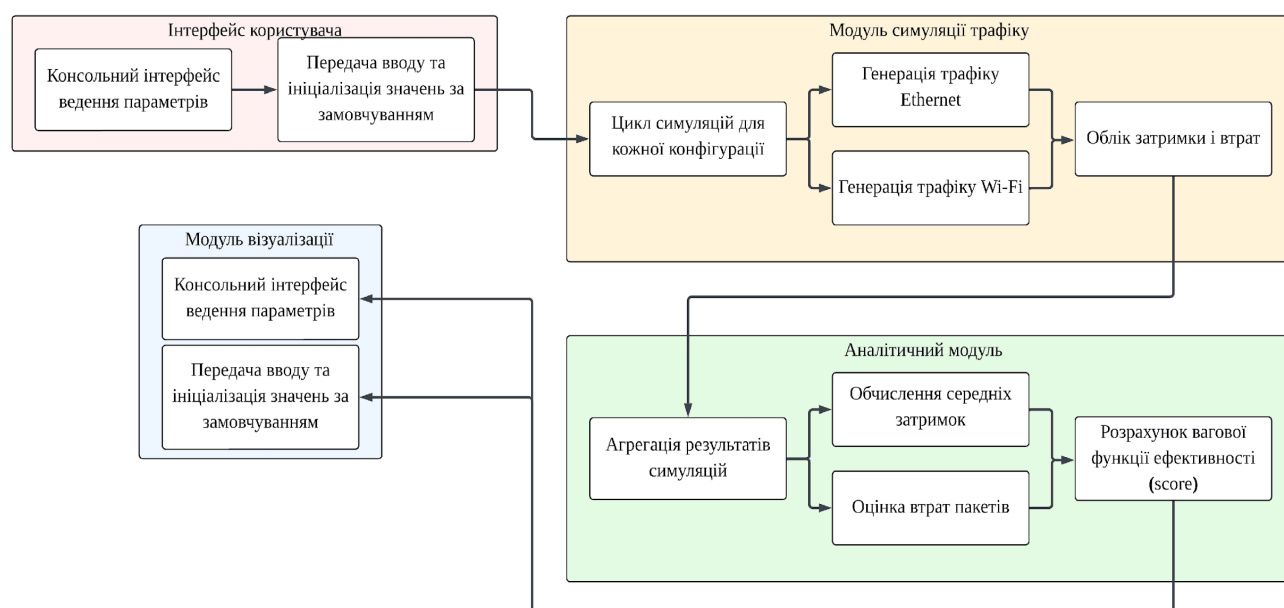


Рис. 2. Функціональна архітектура симулятора оптимізації взаємодії Ethernet і Wi-Fi

показника ефективності у вигляді вагової функції (score).

Зібрані дані надалі візуалізуються за допомогою графічного модуля, який генерує boxplot-розподіли, гістограми та функціональні залежності із використанням бібліотеки matplotlib. На основі останнього набору симуляційних даних функціонує генератор рекомендацій – підсистема, що формулює текстові висновки щодо доцільності зміни конфігурації мережі на основі заздалегідь визначених порогових значень для показників затримки й втрат.

З метою реалізації елементів оптимізації, в симуляторі впроваджено метод оцінки ефективності конфігурацій на основі агрегованої score-функції, яка враховує як середню затримку, так і ймовірність втрат пакетів.

Під час симуляції проводиться пошук мінімального значення цієї функції серед усіх протестованих конфігурацій, що дозволяє ідентифікувати найкращий баланс між Ethernet і Wi-Fi для заданих умов навантаження. Виявлена оптимальна конфігурація використовується для генерації рекомендацій щодо переналаштування мережі.

Запропонований метод симуляційного моделювання на основі параметризованого стохастичного підходу орієнтований не лише на оцінку середньої затримки та ймовірності втрат, а й на комплексну оптимізацію конфігурацій мережі Ethernet/Wi-Fi в умовах змінного навантаження,

конфліктів каналів і дисбалансу навантаження між інтерфейсами. Метод забезпечує високий ступінь автоматизації аналізу, повторюваність результатів, адаптивність до змін топології, а також інтерактивне формування рекомендацій щодо перерозподілу ресурсів або зміни мережевої архітектури відповідно до заданих порогових критеріїв QoS.

Для перевірки функціональності та точності розробленого методу симуляційного моделювання було проведено серію експериментів при таких параметрах: кількість вузлів змінювалася від 10 до 100 з кроком 10, кількість ітерацій симуляції складала 500. Ймовірність втрати пакетів для Ethernet становила 0.01, для Wi-Fi – 0.05. Середні затримки базового рівня склали відповідно 2 мс для Ethernet і 5 мс для Wi-Fi.

Як видно з рис. 3, затримка в сегменті Wi-Fi зростає пропорційно кількості вузлів, при цьому розкид значень (інтерквартильний діапазон) суттєво ширший, ніж у дротовому сегменті. У випадку Ethernet затримка також зростає, однак з меншим градієнтом. Результати свідчать про стабільність Ethernet при масштабуванні кількості пристроїв, тоді як Wi-Fi демонструє більш високий ступінь коливань і чутливість до навантаження.

На рис. 4 зображено залежність втрат від кількості вузлів. Для Ethernet спостерігається незначне зростання ймовірності втрат, яке залишається в межах 0.009–0.011 незалежно від

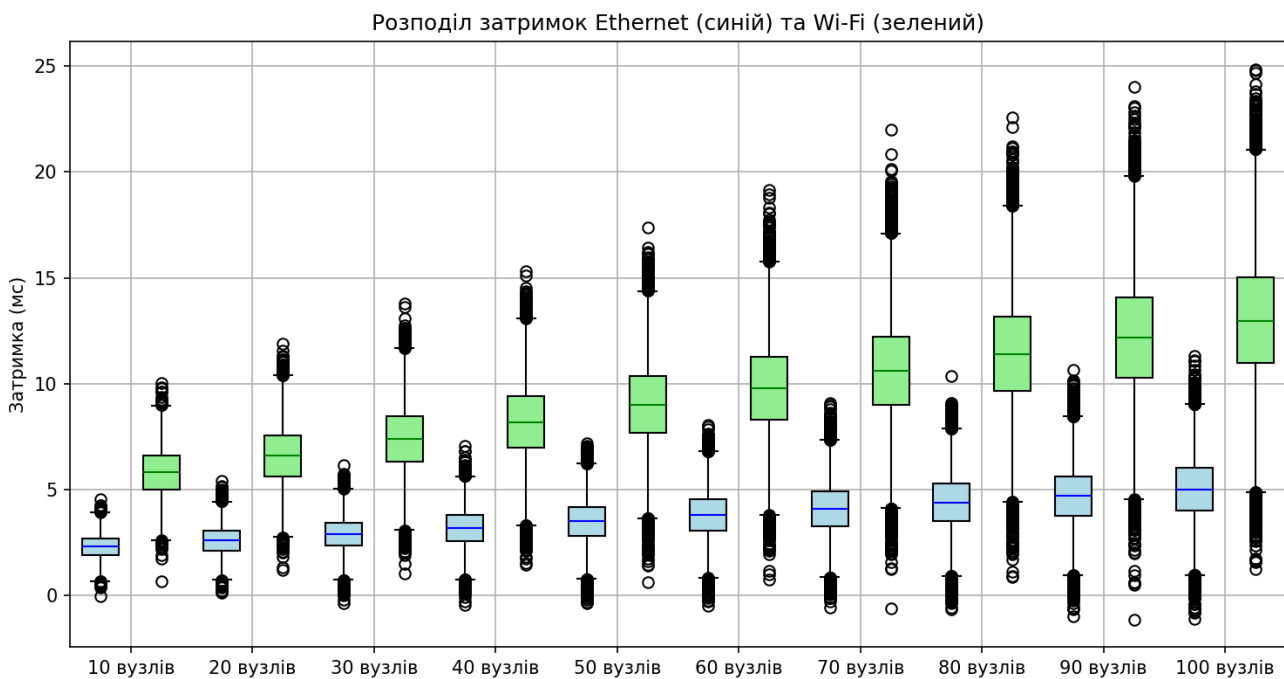


Рис. 3. Розподіл затримок Ethernet (знизу) та Wi-Fi (зверху) для різної кількості вузлів

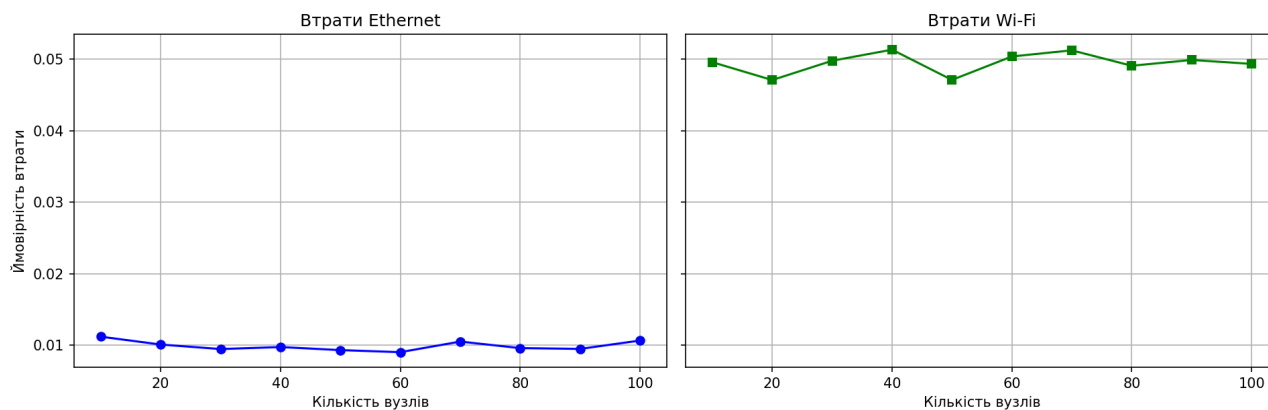


Рис. 4. Ймовірність втрат пакетів у мережах Ethernet та Wi-Fi

масштабу. Натомість у Wi-Fi втрати стабільно залишаються в межах 0.048–0.051, що є очікувано вищим через характер спільного бездротового середовища доступу. Аналіз свідчить, що Wi-Fi має обмежену здатність масштабування без втрати якості обслуговування.

Гістограма на рис. 5 демонструє розподіл затримок при піковому навантаженні (100 вузлів). Для Ethernet характерна симетрична, більш зосереджена крива з максимумом у діапазоні 4–6 мс, тоді як для Wi-Fi затримка зміщена праворуч із середніми значеннями у межах 12–16 мс. Дисперсія Wi-Fi значно більша, що підтверджує вищу нестабільність обслуговування.

Результати симуляції свідчать про ефективність розробленого симулятора як інструмента виявлення критичних зон навантаження

в гібридних мережах і підтверджують необхідність адаптивного управління ресурсами відповідно до реального стану трафіку.

Формування оптимізаційних рекомендацій у запропонованому симуляторі ґрунтується на автоматичному аналізі результатів симуляції, зокрема ключових показників якості обслуговування (QoS): середньої затримки, ймовірності втрат пакетів та балансування навантаження між інтерфейсами Ethernet і Wi-Fi.

Після завершення серії симуляцій, аналітичний модуль обчислює інтегральну оцінку ефективності конфігурації (score), а також порівнює результати з фіксованими граничними значеннями, які визначено на основі теоретично обґрунтованих критеріїв допустимості для корпоративного сегмента мереж (рис. 6).

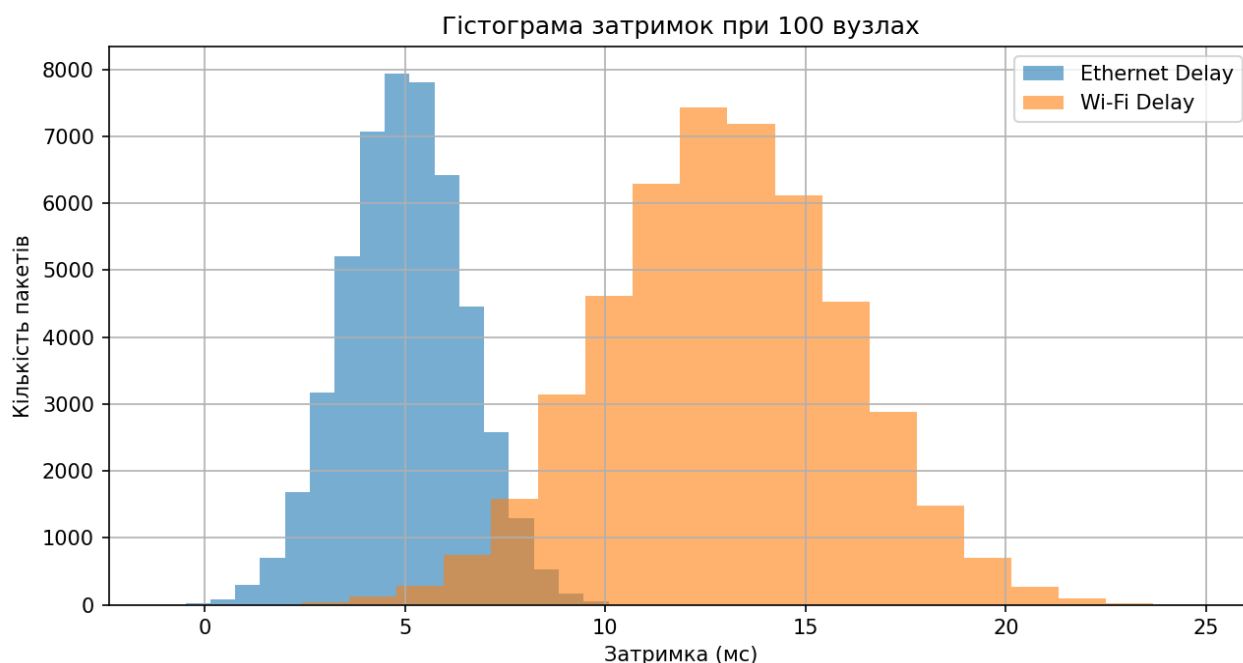


Рис. 5. Гістограма затримок пакетів при 100 вузлах у мережах Ethernet (зліва) і Wi-Fi (справа)

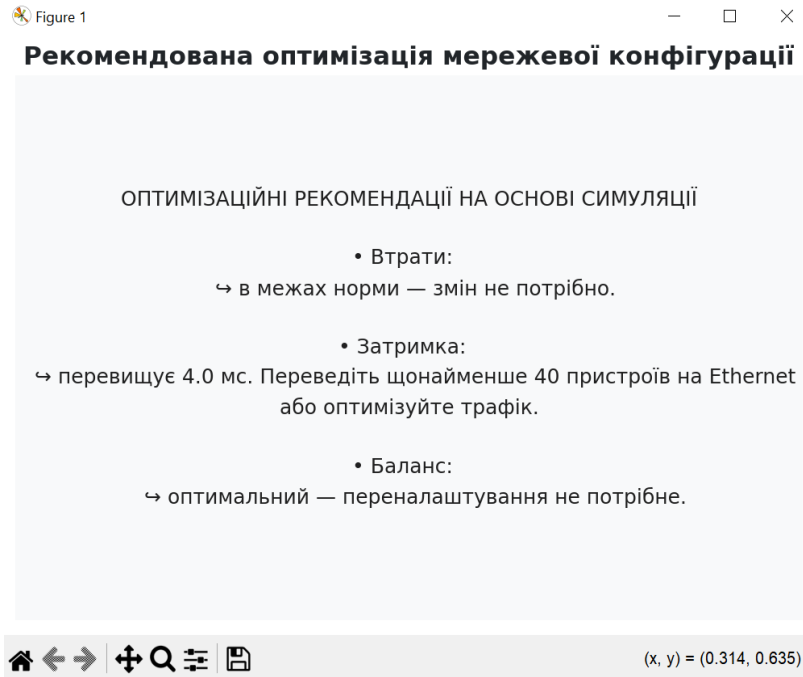


Рис. 6. Автоматично сформований звіт та рекомендації на основі результатів симуляції

Конкретно, затримка понад 4.0 мс для Wi-Fi інтерпретується як така, що потенційно погіршує якість сервісу при передачі даних реального часу. Водночас рівень втрат нижче 1% для Ethernet і до 5% для Wi-Fi вважається допустимим згідно з профільними рекомендаціями IEEE та ITU-T.

Алгоритм прийняття рішень реалізовано в межах аналітичного модуля симулятора, на етапі генерації рекомендацій після обчислення score-функції за правилами нечіткої логіки з чіткими порогами. Якщо затримка перевищує критичне значення, система пропонує перевести частину навантаження на Ethernet — наприклад, щонайменше 40 пристроїв у сценарії з 100 вузлами. У випадку перевищення втрат або виявлення перевантаженого сегмента, формуються поради щодо зміни конфігурації мережі або пріоритизації критичного трафіку.

Загальний вигляд рекомендацій структуровано у вигляді інтерфейсного блоку, де кожен параметр оцінюється окремо: якщо параметр у межах норми — змін не потрібно; якщо поріг перевищено — надається конкретна дія або порада щодо переналаштування. Такий формат сприяє простоті інтеграції симулятора у сценарії проектування та обслуговування мережі.

Узагальнюючи наведені результати, можна стверджувати, що розроблений метод симуляційного моделювання дозволяє не лише оцінювати

якість взаємодії між Ethernet і Wi-Fi в умовах змінного навантаження, але й забезпечує формування обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації конфігурації мережі з урахуванням актуальних параметрів QoS.

Висновки. У статті представлено метод оптимізації взаємодії між Ethernet і Wi-Fi у гібридних телекомунікаційних інфраструктурах шляхом створення програмного симулятора. Запропоноване рішення дозволяє здійснювати параметризоване моделювання трафіку з урахуванням змінної кількості вузлів, затримок, втрат і навантаження в обох сегментах мережі. Результати симуляцій підтвердили ефективність підходу для виявлення конфігурацій, що викликають критичні втрати або перевищення затримок. Автоматичне формування рекомендацій на основі порогових значень QoS забезпечує обґрунтовану підтримку прийняття рішень щодо балансування навантаження, перемикання інтерфейсів або модифікації топології. Методика довела свою придатність для практичного використання у задачах проектування, оцінювання та адаптації корпоративних мереж, що функціонують в умовах високої динаміки навантаження і обмежених ресурсів. У подальшому дослідженні планується розширення симуляційної моделі шляхом включення показників енергоспоживання, стійкості до атак та інтеграції з мережами наступного покоління (5G/6G).

Список літератури:

1. Kosek-Szott K., Lo Valvo A., Szott S., Gallo P., Tinnirello I. Downlink channel access performance of NR-U: Impact of numerology and mini-slots on coexistence with Wi-Fi in the 5 GHz band. *Computer Networks*. 2021. Vol. 195. Article No. 108188.
2. Garroppo R.G., Scutellà M.G. Design model of an IEEE 802.11ad infrastructure for TSN-based industrial applications. *Computer Networks*. 2023. Vol. 230. Article No. 109771.
3. Oechsle S., Frick F., Lechler A., Verl A. A modular configuration and management framework for distributed real-time applications based on converged networks using TSN. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 118. P. 38–43.
4. Böhm S., König H. Radio-in-the-Loop simulation and emulation modeling for energy-efficient and cognitive Internet of Things in smart cities: A cross-layer optimization case study. *Computer Communications*. 2024. Vol. 218. P. 157–165.
5. Belli D., Barsocchi P., Palumbo F. Connectivity Standards Alliance Matter: State of the art and opportunities. *Internet of Things*. 2024. Vol. 25. Article No. 101005.
6. Rahim J.A., Nordin R., Amodu O.A. Open-Source Software Defined Networking Controllers: State-of-the-Art, Challenges and Solutions for Future Network Providers. *Computers, Materials and Continua*. 2024. Vol. 80. No. 1. P. 747–800.
7. Sarah A., Nencioni G., Khan M.M.I. Resource Allocation in Multi-access Edge Computing for 5G-and-beyond networks. *Computer Networks*. 2023. Vol. 227. Article No. 109720.
8. Talebkhah M., Sali A., Khodamoradi V., Khodadadi T., Gordan M. Task offloading for edge-IoV networks in the industry 4.0 era and beyond: A high-level view. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2024. Vol. 54. Article No. 101699.
9. Stanco G., Navarro A., Frattini F., Ventre G., Botta A. A comprehensive survey on the security of low power wide area networks for the Internet of Things. *ICT Express*. 2024. Vol. 10. No. 3. P. 519–552.
10. Stanco G., Botta A., Gallo L., Ventre G. DewROS2: A platform for informed Dew Robotics in ROS. *Robotics and Autonomous Systems*. 2024. Vol. 182. Article No. 104800.

Dyra V.V. METHODS OF OPTIMIZING ETHERNET AND WI-FI INTERACTION IN HYBRID TELECOMMUNICATION INFRASTRUCTURES

The article discusses the problem of optimizing the interaction between wired (Ethernet) and wireless (Wi-Fi) technologies within hybrid telecommunication infrastructures. Modern corporate, industrial, and distributed computing environments are characterized by high traffic volumes, device mobility, and the need to ensure guaranteed quality of service (QoS). Given the differences in access mechanisms, frequency resource limitations, and dynamic traffic load, the challenge arises of selecting the optimal configuration for using Ethernet and Wi-Fi interfaces. To address this, the authors propose a simulation modeling method, implemented as a software tool. The developed simulator allows for investigating the impact of key parameters (node count, loss probability, and base delays) on QoS metrics in a hybrid network.

The mechanism is implemented using Python, with the random and matplotlib libraries. Configuration parameters are set during initialization, after which the system simulates traffic in Ethernet and Wi-Fi segments separately, considering the stochastic nature of losses and delays as a function of traffic load. Simulation results are aggregated, visualized, and analyzed. Based on this, a score function for performance is formed, and text recommendations for configuration optimization are automatically generated.

Within the experimental study, a series of simulations was conducted with node counts ranging from 10 to 100. The results showed that Wi-Fi exhibited significantly higher levels of delay and loss fluctuations as the network scaled. In contrast, Ethernet demonstrated greater stability, confirming the need for load balancing in favor of the wired segment as network traffic increases.

The proposed method enables the identification of critical configurations, the prediction of QoS degradation, and the making of informed decisions regarding the reconfiguration of hybrid infrastructures. The approach is notable for integrating automated analysis and recommendation generation, greatly enhancing the usability and efficiency of the simulator in practical network design and operation environments. The methodology is promising for further development, particularly for integration with real-time monitoring systems, multi-interface management, and adaptive routing in multi-level networks.

Key words: heterogeneous network, QoS, traffic simulation, Wi-Fi, Ethernet, configuration optimization, hybrid infrastructure, delay, packet loss, automated modeling.