

[DOI 10.28925/2663-4023.2026.34.1036](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2026.34.1036)

УДК 004.056.5:004.421.2

Черняшук Наталія Леонідівна

д.пед.н., професор

Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна

ORCID:0000-0002-3178-8377

cherniashchuk.nataliia@vnu.edu.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ЗАХИСТ ГОЛОСОВИХ ДАНИХ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ ВІД КІБЕРАТАК

Анотація. У статті представлено комплексний аналіз сучасних підходів до оптимізації передавання голосової інформації в комп'ютерних мережах та захисту її від можливих кіберзагроз. Розглянуто ключові фактори, що впливають на якість голосового зв'язку, зокрема затримку пакетів, джитер, втрати даних та нестабільність маршрутів у мультисервісних мережах. Особливу увагу приділено функціонуванню технологій VoIP, механізмів маршрутизації та інструментам забезпечення якості обслуговування (QoS), які сприяють пріоритизації трафіку та підвищенню стійкості передавання голосових пакетів.

У межах дослідження проведено порівняння ефективності статичного та динамічного розподілу ресурсів мережеских вузлів, а також проаналізовано роботу фізичного маршрутизатора й системи зі статичною віртуалізацією ресурсів. За допомогою імітаційної моделі досліджено поведінку голосового, відео- та даного трафіку за різних сценаріїв навантаження. Отримані результати показують, що застосування віртуалізації забезпечує більш рівномірне використання ресурсів, зменшення затримок і запобігання перевантаженням буферів у порівнянні з традиційними підходами. У той же час підкреслено наявні обмеження статичної віртуалізації за змінних інтенсивностей трафіку. Проведений аналіз підтверджує доцільність застосування віртуалізації ресурсів маршрутизаторів для підвищення якості та надійності передавання голосових даних у мультисервісних мережах. Результати дослідження можуть бути корисними для фахівців із мережеских технологій, розробників VoIP-рішень та дослідників у сфері кібербезпеки.

Ключові слова: оптимізація передавання, голосові дані, VoIP, комп'ютерні мережі, якість обслуговування (QoS), маршрутизація, затримка пакетів, динамічна віртуалізація, мультисервісні мережі, стабільність з'єднання.

ВСТУП

Сучасні комп'ютерні мережі підтримують широкий спектр послуг, серед яких особливе місце займає передача голосової інформації. З розвитком технологій VoIP (Voice over IP) та мультисервісних мереж забезпечення високоякісного голосового зв'язку стало критично важливим завданням. Основні проблеми при передачі голосових потоків включають затримки пакетів, їх втрату, джитер та нестабільність з'єднання, що безпосередньо впливає на сприйняття користувачем якості зв'язку. Для вирішення цих питань застосовуються різні методи оптимізації, зокрема управління ресурсами вузлів мережі, динамічна та статична віртуалізація маршрутизаторів, пріоритетизація трафіку та механізми контролю якості обслуговування (QoS). Дослідження методів оптимізації не лише підвищує стабільність і надійність передачі голосової інформації, а й забезпечує ефективніше використання обчислювальних і мережеских ресурсів.

Метою цього дослідження є аналіз сучасних підходів до оптимізації передачі голосової інформації в комп'ютерних мережах, порівняння ефективності статичних і динамічних конфігурацій мережеских ресурсів та розробка рекомендацій щодо підвищення якості обслуговування користувачів у мультисервісних середовищах.

Постановка проблеми. Передача голосової інформації в комп'ютерних мережах є одним із найважливіших видів комунікаційних послуг, особливо з урахуванням широкого впровадження технологій VoIP (Voice over IP) та мультисервісних мереж. Основні проблеми при передачі голосових потоків включають затримку пакетів, їх втрату, джитер та обмежену пропускну здатність каналу. Ці фактори значно впливають на сприйняття якості голосового зв'язку, що робить оптимізацію критично важливою задачею.



Сучасні методи оптимізації можна класифікувати за кількома основними напрямками:

1. Управління ресурсами вузлів мережі – використання статичної та динамічної віртуалізації маршрутизаторів дозволяє виділяти обчислювальні ресурси відповідно до поточного навантаження мережі, підвищуючи ефективність обробки голосового трафіку.

2. Механізми контролю якості обслуговування (QoS) – до них належать пріоритетизація голосових пакетів, розподіл пропускну здатності, управління чергами та застосування політик DiffServ або IntServ для забезпечення низьких затримок і мінімізації втрат пакетів.

3. Оптимізація маршрутизації та управління трафіком – сучасні алгоритми враховують характеристики мережі, такі як завантаженість каналу та кількість проміжних вузлів на шляху передачі, що допомагає мінімізувати затримки та джиттер.

4. Інтеграція індикаторів компрометації (IoC) у системи безпеки мережі – дана методика першочергово пов'язана із захистом інформації, використання IoC допомагає забезпечити стабільність та надійність передачі голосових потоків у разі потенційних кібератак.

Таким чином, сучасний стан досліджень демонструє значний прогрес у забезпеченні високоякісної передачі голосової інформації та підкреслює актуальність подальших робіт, спрямованих на динамічну оптимізацію ресурсів, інтеграцію QoS та прогнозне управління мережевим трафіком.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Kumar & Roy (2022) [1] запропонували метод на основі QoS та машинного навчання, який дозволяє виявляти аномалії у VoIP-трафіку, забезпечуючи захист від атак та оптимізацію ресурсів мережі. Такий підхід показує ефективність поєднання кібербезпеки та продуктивності в мережах передачі голосу.

Krasnowski, Lebrun & Martin (2021) [2] представили техніку Data over Voice, яка дозволяє передавати закодовані дані через голосові канали. Це створює нові можливості для захищеної комунікації, водночас підкреслюючи потребу в моніторингу стеганографії та контролі безпеки голосових потоків.

Zhou et al. (2024) [4] розробили методику стеганалізу голосового трафіку, що дозволяє виявляти приховані повідомлення навіть у складних сценаріях детекції. Це критично для захисту від інформаційних атак через VoIP.

Laurens et al. (2023) [3] продемонстрували side-channel атаки на автоматизовані телефонні системи. Дослідження показує, що VoIP-системи можуть бути скомпрометовані навіть при стандартному використанні, що підкреслює необхідність активного моніторингу та аналітики трафіку.

Biondi, Bognanni & Bella (2021) [5] відзначають, що VoIP-системи все ще вразливі до сучасних атак, особливо при відсутності оновлених заходів безпеки.

Kishore et al. (2024) [6] та Singh & Singh (2022) [9] проводять огляд VoIP-технологій та механізмів QoS, акцентуючи увагу на затримках, джитері, втраті пакетів та продуктивності систем. Вони підкреслюють, що оптимізація ресурсів і контроль QoS залишаються критично важливими для надійного голосового зв'язку.

Dallaf (2024) [8] досліджує оптимізацію SIP-VoIP систем у LAN, забезпечуючи баланс між продуктивністю та якістю обслуговування як у дротових, так і бездротових мережах.

Jaish & Al-Shammari (2023) [10] аналізують QoE користувачів VoIP, що дозволяє враховувати не лише технічні метрики, але й сприйняття кінцевого користувача при оцінці ефективності оптимізації та безпеки.

Wheeb (2023-2024) [15] досліджує продуктивність VoIP у бездротових мережах, що важливо для оптимізації та захисту голосових потоків у Wi-Fi та мобільних середовищах.

Публікації A1 Telecom (2024, 2025) [12, 14] та Electronicofficesystems.com (2023) [13] пропонують практичні стратегії оптимізації міжнародних VoIP-дзвінків та захист голосових даних через TLS, SRTP, VPN та аутентифікацію.

Мета статті – аналіз сучасних підходів до оптимізації передачі голосової інформації в комп'ютерних мережах, порівняння ефективності статичних і динамічних конфігурацій мережевих ресурсів та розробка рекомендацій щодо підвищення якості обслуговування користувачів у мультисервісних середовищах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рисунку 1 показана структура моделі імітаційного моделювання, яка складається з трьох віртуальних маршрутизаторів (1, 2, 3) та стандартного маршрутизатора з обробкою пакетів за принципом FIFO (4) на вході, який приймає агрегований потік даних. Маршрутизатор 1 обслуговує відеотрафік, маршрутизатор 2 – голосовий трафік, маршрутизатор 3 – дані, а маршрутизатор 4 забезпечує послуги Triple Play.

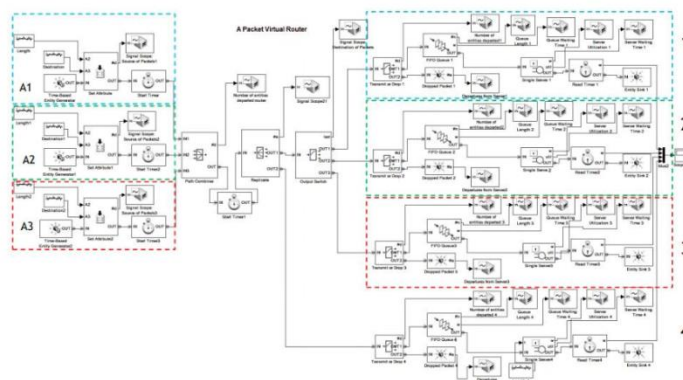


Рис. 1. Схема моделі маршрутизатора пакетів із (1, 2, 3) та без (4) віртуалізації ресурсів

Реальний мережевий трафік будь-якого типу складається з пакетів різної довжини та нерегулярних інтервалів між ними. Для генерації реалістичного трафіку використовується програма Wireshark, що дозволяє збирати всі необхідні характеристики потоків на основі експериментального тестування в мультисервісних мережах.

Для моделювання була застосована запропонована модель маршрутизатора пакетів з віртуалізацією ресурсів та без неї (див. рис. 1). Показано конфігурацію моделі за умов, коли три віртуальні маршрутизатори реалізовані в межах одного фізичного маршрутизатора, працюють незалежно та обслуговують лише ті класи трафіку, для яких необхідно підтримувати допустимий рівень якості обслуговування (QoS).

Процес моделювання генерує послуги передачі голосу, відео та даних, кожна з яких підтримує допустимий рівень QoS, рекомендований ІТУ-Т. Модель порівнює продуктивність маршрутизатора з точки зору часу обслуговування пакета або часу використання ресурсів процесора. Оскільки номінальна частота маршрутизатора є найважливішим показником продуктивності після аналізу специфікацій виробника, враховується середній час обробки пакета залежно від типу процесора.

Маршрутизатор за умов статичного розподілу ресурсів (рис. 2-4).

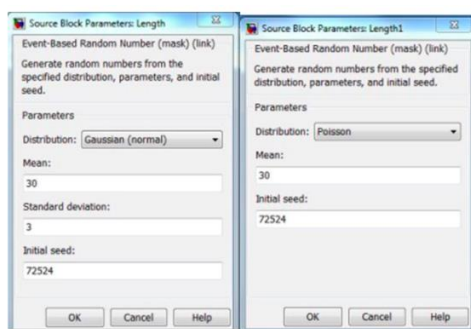


Рис. 2. Час роботи 30 μ s: а) процесор маршрутизатора 1 – 450 МГц; б) процесор маршрутизатора 2 – 450 МГц

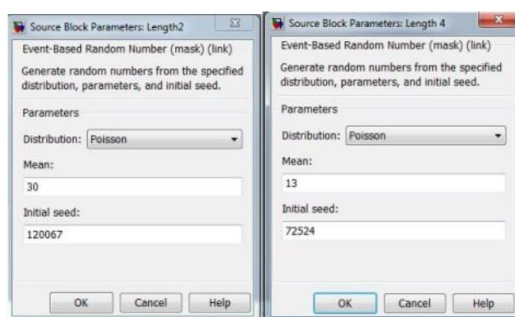


Рис. 3. Час роботи 30 μ s: в) процесор маршрутизатора 3 – 450 МГц; г) процесор маршрутизатора 4 (без віртуалізації) – 1400 МГц

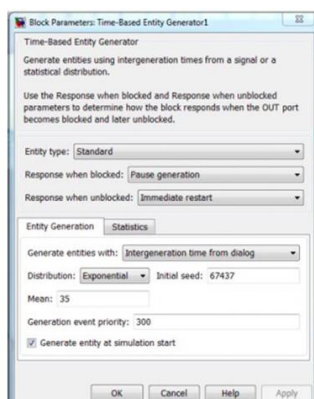


Рис. 4. Прийом голосової інформації

Потоки кількох сервісів генеруються трьома незалежними джерелами (рис. 5), кожне з яких відрізняється інтенсивністю пакетів і характеризується експоненційним розподілом інтервалів між пакетами. В результаті на виході мережевого пристрою формується комбінований гіперекспоненційний розподіл інтервалів, що відображає властивості реального трафіку мультисервісних мереж. Після визначення необхідних вхідних параметрів моделі, на рис. 5 показані моменти прийому пакетів для трьох типів сервісів: відео, голос і дані. Графіки (рис. 5-6) ілюструють роботу віртуальних маршрутизаторів, що обробляють відповідні потоки трафіку. Вони відображають кількість пакетів, згенерованих під час моделювання, та інтервали між їх надходженням. Рис. 8 показує, що після виходу три генератори відправляють пакети до блоку об'єднання шляхів, де вони агрегуються в один потік.

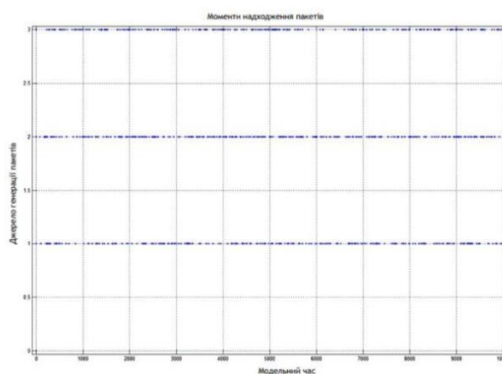


Рис. 5. Генерація часу надходження пакетів для сервісів: 1) Відео, 2) Голос, 3) Дані

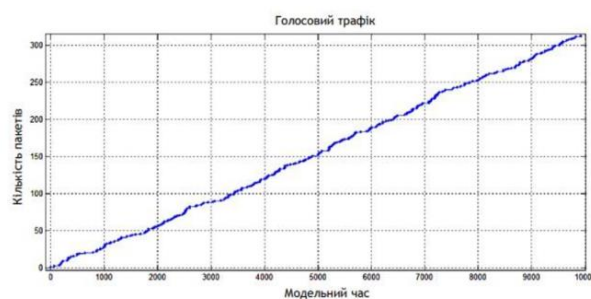


Рис. 6. Генерація голосового трафіку

На основі згенерованого мультисервісного потоку пакети передаються до віртуальних модулів цільового маршрутизатора, які забезпечують захист кожного вихідного порту мережевого пристрою. Робота цих віртуальних сервісних модулів представлена блоками Single Server1, Single Server2, Single Server3, а також невіртуалізованим варіантом – Single Server4. Рисунок 7 показує діаграми навантаження для кожного віртуального маршрутизатора залежно від інтенсивності вхідного трафіку.

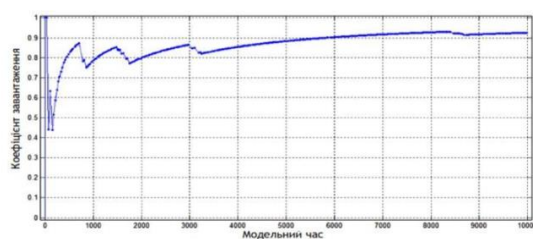


Рис. 7. Навантаження віртуального сервісного модуля потоками голосового трафіку

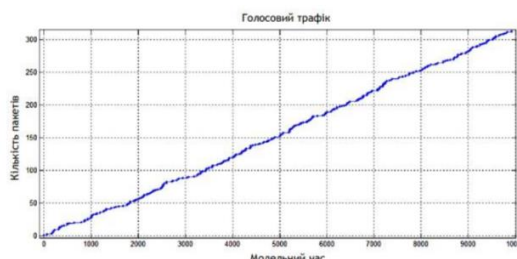


Рис. 8. Навантаження сервісного модуля фізичного маршрутизатора потоками Triple Play

Результати моделювання показують, що вузькі місця в системі можуть призводити до погіршення рівня якості обслуговування (QoS). Коли сервісний модуль завантажується під час обробки голосового трафіку, віртуальний маршрутизатор забезпечує належну обробку пакетів голосу (рис. 9). Для порівняння, на рисунку 9-10 показано навантаження на невіртуалізований маршрутизатор під час обробки агрегованого потоку, сформованого трьома джерелами. У цьому випадку навантаження значно зростає, наближаючись до загального рівня перевантаження (на відміну від сценарію з одним джерелом), що може призвести до зниження якості обслуговування при обмеженій ємності буфера [7; 8].

Під час моделювання здійснювався контроль навантаження на віртуальні маршрутизатори та невіртуалізовані буфери під час обробки ідентичних потоків за допомогою блоків Queue Length. Функції віртуальних буферів реалізовані як FIFO Queue1, FIFO Queue2, FIFO Queue3, а буфер невіртуалізованого маршрутизатора – як FIFO Queue4. Ємності буферів встановлено як необмежені, без втрати пакетів, для визначення максимальної кількості пакетів, накопичених за період моделювання. Дисципліна обслуговування у всіх буферах відповідала принципу «перший прийшов – перший обслуговується» (FIFO). Блоки Queue Length1-4 відображають кількість пакетів у черзі для відповідних сценаріїв віртуалізації.

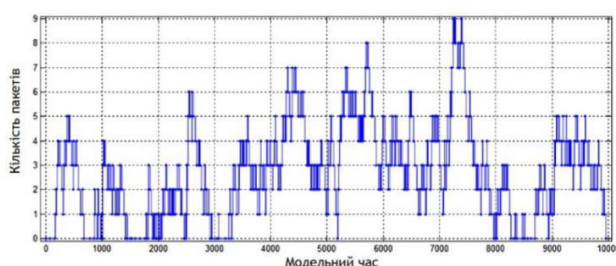


Рис. 9. Навантаження буфера віртуального маршрутизатора під час передачі голосового трафіку

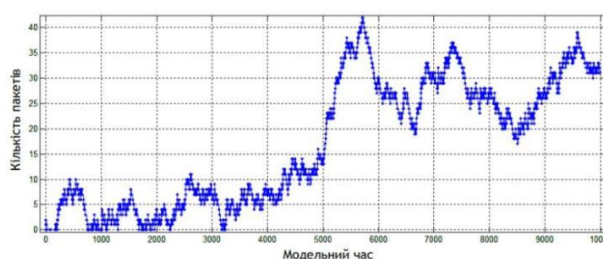


Рис. 10. Навантаження буфера фізичного маршрутизатора під час трафіку Triple Play

Аналіз результатів показує, що максимальна кількість пакетів у буфері віртуального маршрутизатора (11 пакетів) спостерігається під час обслуговування потоку даних. Водночас середнє навантаження буфера під час моделювання є найвищим для голосового трафіку – приблизно 6 пакетів. Це призводить до більшої затримки при обробці голосових пакетів порівняно з іншими потоками трафіку. На рисунку 11 наведено приклад навантаження буфера для невіртуалізованого маршрутизатора, який працює за стандартною дисципліною обслуговування FIFO. Можна помітити, що після 5000 одиниць часу моделювання у буфері накопичується значна кількість пакетів із комбінованого потоку. Порівняно зі статичною віртуалізацією ресурсів, недоліком цього підходу є складність визначення оптимального розміру буфера. Щоб уникнути перевантаження, ємність буфера повинна перевищувати 41 пакет.

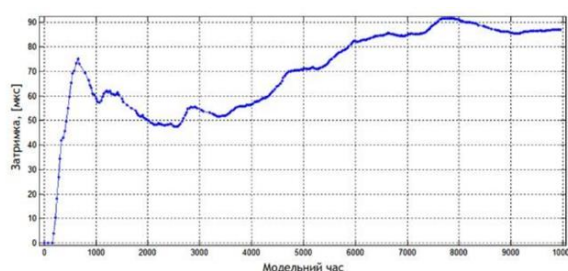


Рис. 11. Час очікування в буфері віртуального маршрутизатора під час передачі голосових даних

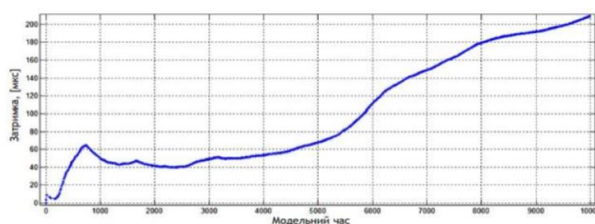


Рис. 12. Затримка кешування фізичного маршрутизатора протягом усього потоку даних

Під час обслуговування відеотрафіку загальна затримка CPU та інтерфейсу пакетів у фізичному маршрутизаторі зменшується у 2,5-3 рази порівняно з віртуальними маршрутизаторами, орієнтованими на класи сервісу. Це пояснюється тим, що ресурси фізичного процесора повністю виділені на обробку пакетів, тоді як при віртуалізації один фізичний процесор імітує роботу трьох віртуальних маршрутизаторів.

Таким чином, розроблена модель симуляції дозволяє порівняти затримки пакетів у сервісних потоках між системою зі статичною перенастроюю ресурсів маршрутизатора (три віртуальні маршрутизатори) та традиційною обробкою пакетів у черзі FIFO фізичного маршрутизатора.

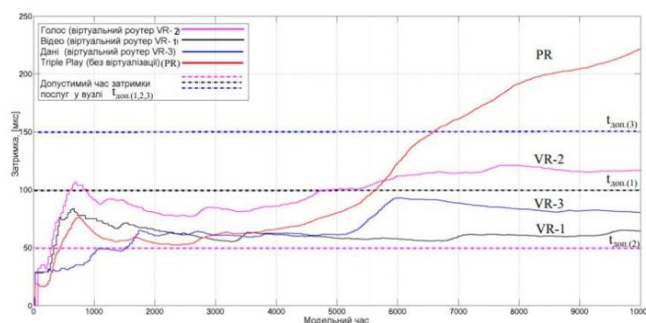


Рис. 13. Порівняння часу затримки пакетів між невіртуалізованим маршрутизатором і маршрутизатором зі статичною віртуалізацією ресурсів

На рисунку 13 показані затримки пакетів для кожного віртуального маршрутизатора під час обробки відповідного типу трафіку. Для кожного потоку встановлено допустимий час перебування



пакета в вузлі, визначений чутливістю сервісу до затримок відповідно до рекомендацій ITU-T. Якщо час перебування пакета перевищує допустимий рівень, якість обслуговування вважається зниженою.

Крива PR показує затримку потоку Triple Play у невіртуалізованому фізичному маршрутизаторі, що працює за стандартною чергою FIFO. Недоліком цього підходу є неможливість точно визначити, який пакет перевищив допустимий час, що ускладнює моніторинг QoS. Натомість система з віртуалізацією ресурсів дозволяє встановлювати індивідуальні межі затримки для кожного потоку та виявляти випадки перевищення допустимих порогів.

Згідно з результатами симуляції, починаючи з 6600 одиниць часу моделювання, мультисервісний потік у невіртуалізованому маршрутизаторі більше не відповідає вимогам QoS. У той же час статична віртуалізація ресурсів чітко демонструє свої переваги затримки для відеопотоків (VR1) та потоків даних (VR3) контролюються ефективніше, а для голосового трафіку (VR2) випадки перевищення допустимої затримки фіксуються точно.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розробка моделі симуляції маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів та без неї дозволяє комплексно оцінити вплив віртуалізації на продуктивність і використання ресурсів у мультисервісних мережах. Використання блоків SimEvents, таких як Time-Based Entity Generator, Single Server, FIFO Queue та Signal Score, забезпечує моделювання генерації пакетів, їх чергування, обслуговування та вимірювання затримок, що є критично важливим для оцінки якості обслуговування (QoS).

Аналіз результатів симуляції виявив кілька ключових закономірностей. По-перше, невіртуалізований маршрутизатор, що обробляє агрегований потік Triple Play, демонструє значне накопичення пакетів у буфері та збільшені затримки, що потенційно може призвести до порушень QoS. Це перевантаження пояснюється обмеженими можливостями одного фізичного процесора, який одночасно обробляє всі пакети, та неможливістю пріоритизації трафіку для окремих класів.

По-друге, статична віртуалізація ресурсів дозволяє виділити окремі віртуальні маршрутизатори для різних класів трафіку (голосового, відео та даних), що забезпечує більш збалансоване навантаження на буфери та кращий контроль затримок. Наприклад, максимальна кількість пакетів у трьох віртуальних буферах становила 26, тоді як у буфері невіртуалізованого фізичного маршрутизатора накопичилося понад 41 пакет. Це демонструє ефективніше управління ресурсами при використанні віртуалізації.

Проте статична віртуалізація має обмеження при змінній інтенсивності трафіку деякі віртуальні маршрутизатори можуть не отримати достатньо ресурсів, що знижує загальну продуктивність та рівень QoS. Переваги віртуалізації ресурсів включають розподіл навантаження між потоками, зменшення максимальних затримок і накопичення пакетів у буферах, а також можливість окремого контролю QoS для кожного класу сервісу.

Недоліки та обмеження статичної віртуалізації полягають у недостатній гнучкості при змінному трафіку та можливому перевантаженні окремих віртуальних маршрутизаторів під час нерівномірних потоків пакетів.

Загалом результати дослідження свідчать, що віртуалізація ресурсів у маршрутизаторах є ефективним механізмом оптимізації передачі голосової інформації та інших класів трафіку в мультисервісних мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kumar, V., & Roy, O. P. (2022). QoS-based machine learning approach for security of VoIP services. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(2), 214-220. <https://ijettjournal.org/assets/Volume-70/Issue-2/IJETT-V70I2P225.pdf>
2. Krasnowski, P., Lebrun, J., & Martin, B. (2021). *Introducing a novel data over voice technique for secure voice communication* (arXiv:2102.10869). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2102.10869>
3. Laurens, R., Christianto, E., Caulkins, B., & Zou, C. C. (2023). *Side-channel VoIP profiling attack against customer service automated phone system* (arXiv:2306.00095). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2306.00095>
4. Zhou, P., Fang, Z., Yang, Z., Zhou, Z., & Zhou, L. (2024). *Efficient streaming voice steganalysis in challenging detection scenarios* (arXiv:2411.13612). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2411.13612>
5. Biondi, P., Bognanni, S., & Bella, G. (2021). *VoIP can still be exploited-Badly* (arXiv:2111.15468). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2111.15468>



6. Kishore, M. K., Lavanya, D., Dennyapaul, K., Bhavani, G., & Manikanteswarao, S. (2024). A comprehensive review of VoIP technologies and performance metrics. *Journal of Electrical Systems*, 20(3), 9643-9650. <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/8536>
7. Ramly, A. M., Ng, Z. W., Khamayseh, Y., Kwan, C. S. C., et al. (2024). Review and enhancement of VoIP security: Identifying vulnerabilities and proposing integrated solutions. *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, 12(4), 109-136. <https://www.researchgate.net/publication/387551333>
8. Dallaf, A. (2024). Optimizing SIP-based VoIP systems for LAN infrastructures: Addressing performance demands and quality assurance in wired and wireless environments. *Quest Journal of Electronics and Communication Engineering Research*, 10(6), 15-27. <https://www.questjournals.org/jecer/papers/vol10-issue6/10061527.pdf>
9. Singh, H. P., & Singh, J. (2022). Performance progress in QoS mechanism in Voice over Internet Protocol system. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. <https://ijarcs.info/index.php/Ijarcs/article/view/1293>
10. Jaish, A. A., & Al-Shammari, B. K. J. (2023). Quality of experience for Voice over Internet Protocol (VoIP). *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 11(3). <https://ejuow.uowasit.edu.iq/index.php/ejuow/article/view/460>
11. VoIP traffic monitoring subsystem in a telecommunications environment. (2024). *Herald of Khmelnytskyi National University*, (3). <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/download/306/604/1954>
12. A1 Telecom. (2024, July 15). *Optimization of international VoIP calls: Strategies, tools, and technologies* [Blog post]. <https://a1call.me/blog/uk/2024/07/15/2771/>
13. Electronic Office Systems. (2023, December 15). *Are there any potential issues or challenges when implementing QoS in a VoIP system?* <https://www.electronicofficesystems.com/2023/12/15/are-there-any-potential-issues-or-challenges-when-implementing-qos-in-a-voip-system/>
14. A1 Telecom. (2025, February 25). *IP telephony: Voice data protection using TLS, SRTP, VPN, and authentication* [Blog post]. <https://a1call.me/blog/uk/2025/02/25/3523/>
15. Wheeb, A. H. (2023-2024). Performance analysis of VoIP in wireless networks. *UOB Journal*. <https://repository.uobaghdad.edu.iq/articles/2BZ9SIcBVTCNdQwC3UFL>

**Nataliia Cherniashchuk**

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor

Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine

ORCID:0000-0002-3178-8377

cherniashchuk.nataliia@vnu.edu.ua

OPTIMIZATION AND PROTECTION OF VOICE DATA IN COMPUTER NETWORKS AGAINST CYBERATTACKS

Abstract. This paper presents a comprehensive analysis of modern approaches to optimizing the transmission of voice information in computer networks and protecting it against potential cyber threats. The key factors affecting the quality of voice communication are examined, including packet delay, jitter, data loss, and route instability in multiservice networks. Particular attention is given to the functioning of VoIP technologies, routing mechanisms, and Quality of Service (QoS) tools that enable traffic prioritization and increase the stability of voice packet delivery.

The study compares the efficiency of static and dynamic allocation of network node resources and analyzes the operation of a physical router versus a system with static resource virtualization. Using a simulation model, the behavior of voice, video, and data traffic is examined under various load scenarios. The obtained results show that applying virtualization ensures more uniform resource utilization, reduces delays, and prevents buffer overload compared to traditional approaches. At the same time, the limitations of static virtualization under variable traffic intensity are highlighted.

The conducted analysis confirms the feasibility of applying router resource virtualization to improve the quality and reliability of voice data transmission in multiservice networks. The results may be useful for network technology specialists, VoIP solution developers, and researchers in the field of cybersecurity.

Keywords: transmission optimization, voice information, VoIP, computer networks, quality of service (QoS), routing, packet delay, dynamic virtualization, multiservice networks, connection stability.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Kumar, V., & Roy, O. P. (2022). QoS-based machine learning approach for security of VoIP services. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(2), 214-220. <https://ijettjournal.org/assets/Volume-70/Issue-2/IJETT-V70I2P225.pdf>
2. Krasnowski, P., Lebrun, J., & Martin, B. (2021). *Introducing a novel data over voice technique for secure voice communication* (arXiv:2102.10869). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2102.10869>
3. Laurens, R., Christianto, E., Caulkins, B., & Zou, C. C. (2023). *Side-channel VoIP profiling attack against customer service automated phone system* (arXiv:2306.00095). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2306.00095>
4. Zhou, P., Fang, Z., Yang, Z., Zhou, Z., & Zhou, L. (2024). *Efficient streaming voice steganalysis in challenging detection scenarios* (arXiv:2411.13612). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2411.13612>
5. Biondi, P., Bognanni, S., & Bella, G. (2021). *VoIP can still be exploited-Badly* (arXiv:2111.15468). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2111.15468>
6. Kishore, M. K., Lavanya, D., Dennypaul, K., Bhavani, G., & Manikanteswarao, S. (2024). A comprehensive review of VoIP technologies and performance metrics. *Journal of Electrical Systems*, 20(3), 9643-9650. <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/8536>
7. Ramly, A. M., Ng, Z. W., Khamayseh, Y., Kwan, C. S. C., et al. (2024). Review and enhancement of VoIP security: Identifying vulnerabilities and proposing integrated solutions. *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, 12(4), 109-136. <https://www.researchgate.net/publication/387551333>
8. Dallaf, A. (2024). Optimizing SIP-based VoIP systems for LAN infrastructures: Addressing performance demands and quality assurance in wired and wireless environments. *Quest Journal of Electronics and Communication Engineering Research*, 10(6), 15-27. <https://www.questjournals.org/jecer/papers/vol10-issue6/10061527.pdf>



9. Singh, H. P., & Singh, J. (2022). Performance progress in QoS mechanism in Voice over Internet Protocol system. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. <https://ijarcs.info/index.php/Ijarcs/article/view/1293>
10. Jaish, A. A., & Al-Shammari, B. K. J. (2023). Quality of experience for Voice over Internet Protocol (VoIP). *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 11(3). <https://ejuow.uowasit.edu.iq/index.php/ejuow/article/view/460>
11. VoIP traffic monitoring subsystem in a telecommunications environment. (2024). *Herald of Khmelnytskyi National University*, (3). <https://heraldts.khmnua.edu.ua/index.php/heraldts/article/download/306/604/1954>
12. A1 Telecom. (2024, July 15). *Optimization of international VoIP calls: Strategies, tools, and technologies* [Blog post]. <https://a1call.me/blog/uk/2024/07/15/2771/>
13. Electronic Office Systems. (2023, December 15). *Are there any potential issues or challenges when implementing QoS in a VoIP system?* <https://www.electronicofficesystems.com/2023/12/15/are-there-any-potential-issues-or-challenges-when-implementing-qos-in-a-voip-system/>
14. A1 Telecom. (2025, February 25). *IP telephony: Voice data protection using TLS, SRTP, VPN, and authentication* [Blog post]. <https://a1call.me/blog/uk/2025/02/25/3523/>
15. Wheeb, A. H. (2023-2024). Performance analysis of VoIP in wireless networks. *UOB Journal*. <https://repository.uobaghdad.edu.iq/articles/2BZ9SIcBVTCNdQwC3UFL>

Отримано редакцією журналу / Received: 20.01.26

Прорецензовано / Revised: 03.02.26

Схвалено до друку / Accepted: 24.09.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.