

Сколець С.С.

<https://orcid.org/0000-0002-2589-1001>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравчук С.О.

<http://orcid.org/0000-0002-4118-0226>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ МЕХАНІЗМІВ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО СЕГМЕНТА НА E2E-QoS МОБІЛЬНОГО ТРАФІКУ В МЕРЕЖАХ 4G/5G

Період масового впровадження технологій 5G вимагає прецизійного узгодження роботи радіо-сегмента та програмно-керованої транспортної інфраструктури. У даній роботі представлено метод комплексної оцінки наскрізної якості обслуговування (E2E QoS), що базується на врахуванні взаємозв'язку між фізичними параметрами радіоканалу та логікою SDN-маршрутизації. Практична реалізація підходу здійснена шляхом інтеграції симулятора ns-3, відповідального за моделювання RAN, та емулятора Mininet, що відтворює функціонування програмно-визначеної транспортної мережі. Запропонований інструментарій дозволив встановити релевантні показники пропускної здатності, латентності та джитера для різних частотних діапазонів і сценаріїв розповсюдження сигналу. Особливу увагу приділено режимам інтенсивного навантаження, коли оператор постає перед необхідністю впровадження пріоритетизації критичних потоків даних. У цих умовах метод забезпечує об'єктивну оцінку ефективності адаптивних SDN-політик порівняно з конвенційними алгоритмами маршрутизації. Оптимальне функціонування мережі 5G за таких обставин безпосередньо залежить від раціонального вибору частотного спектра та конфігурації черг обслуговування, що потребує одночасного вирішення завдань моделювання радіоінтерфейсу, інтеграції середовищ та багатофакторного аналізу метрик QoS. Для верифікації впливу параметрів RAN на підсумкову якість сервісів оцінено спектральну ефективність та стійкість з'єднання в умовах відсутності прямої видимості (NLoS). Експлуатаційні показники E2E QoS визначено на інтервалі моделювання 60 секунд із урахуванням динамічної зміни схем модуляції (від QPSK до 256-QAM) та варіативності трафіку різних типів. Аналіз ефективності транспортно-сегменту базується на порівнянні стратегій Shortest Path та QoS-based. Такий підхід враховує, що при утилізації каналів понад 75% критичний URLLC-трафік потребує виділення ізольованих черг для мінімізації затримок. Підсумковим елементом дослідження є розроблений метод оцінювання ймовірнісних показників інтегрованої системи, що дозволяє деталізувати множинні компоненти наскрізної затримки в тракту «користувач – послуга».

Ключові слова: наскрізне моделювання, ефективність, якість обслуговування, програмно-визначені мережі, радіодоступ, мережі 4G/5G, інтеграція ns-3 та Mininet.

Постановка проблеми. Сучасні мережі 4G/5G характеризуються високою гетерогенністю архітектури, що об'єднує сегменти радіодоступу (RAN), транспортну інфраструктуру та ядро [1]. Забезпечення наскрізної якості обслуговування (E2E-QoS) у таких системах ускладнюється суперечливими вимогами нових сервісів, де сценарій eMBB потребує високої пропускної здатності (від 1 Гбіт/с), URLLC – наднизької затримки

(<1 мс) при надійності 99,999%, а mMTC – підтримки до 10^6 пристроїв/км². Ключова проблема криється у детермінованому впливі параметрів радіоканалу (діапазони <6 ГГц чи 26 ГГц, умови LoS/NLoS, схеми модуляції MCS до 256-QAM) на характеристики трафіку, що надходить у транспортний сегмент.

Попри здатність віртуалізованих транспортних мереж з SDN-керуванням (OpenFlow 1.3)



динамічно адаптуватися до змін через пріоритетизацію потоків та зміну маршрутів, взаємодія між радіосегментом і транспортом залишається недостатньо дослідженою [2]. Традиційний фрагментарний підхід, де RAN та транспортний сегмент аналізуються ізольовано, не дозволяє оцінити реальні E2E-QoS (пропускну здатність, затримку, джитер, PDR) на шляху від абонента до сервісу. Наразі спостерігається дефіцит відтворюваних та відкритих моделей, які б інтегрували прецизійне моделювання радіодоступу (ns-3) із гнучкою SDN-емуляцією (Mininet) для кількісного аналізу впливу параметрів мережі на якість обслуговування змішаного трафіку. Усунення цієї прогалини є критичною умовою для розробки ефективних методів віртуалізації транспортного сегмента, спрямованих на підвищення E2E-QoS у мережах 4G/5G та створення технологічного підґрунтя для майбутніх стандартів 6G.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасний науковий дискурс у сфері телекомунікацій зосереджений на пошуку механізмів гармонізації процесів у динамічних сегментах радіодоступу (RAN) та програмно-керованих транспортних мережах (SDN). Окремий вектор вишукувань спрямований на подолання технологічного розриву між фізичними параметрами передачі сигналів у діапазонах 5G NR та логікою віртуалізованого керування мережевими ресурсами. Дослідження, представлене у статті, лежить у площині розробки інтегрованих моделей для верифікації наскрізної (E2E) продуктивності систем, що функціонують в умовах гетерогенного трафіку та змінного стану радіоканалів.

Перший напрямок досліджень присвячено вивченню впливу параметрів радіоканалу на продуктивність 5G. Ф. Дж. Лавакка та ін. (F. G. Lavacca et al.) [3] за допомогою ns-3 оцінили технології 5G (NSA) порівняно з LTE, інтегрувавши SDN-транспорт. Автори реалізували SDN-контролер з підтримкою OpenFlow 1.3 для топологічного відкриття та маршрутизації (Shortest Path та Vertical-Aware). Результати підтвердили приріст пропускної здатності RAN ($G_{\text{RAN}} \approx 1,33$ для одного користувача та $\approx 1,6$ для 10 – 100 осіб), а SDN-політики дозволили досягти транспортної ефективності $\eta_T = 1$, забезпечуючи вимоги eMBB без розширення каналів. Відзначено роль SDN-маршрутизації у мінімізації затримки та джитера.

Другий напрямок охоплює SDN-трансформацію backhaul/fronthaul сегментів. У праці С. Хорсандру та ін. (S. Khorsandroo et al.) [4] обґрунтовано переваги гібридних SDN-

архітектур для гнучкого керування ресурсами та QoS. С. Аммар та ін. (S. Ammar et al.) [5] проаналізували роль SDN, NFV та слайсингу в мережах 6G для ізоляції трафіку та оптимізації надійності. У вузькоспеціалізованих доменах Н. Мувад (N. Mouawad) [6] запропонував SDN-керування мобільністю для V2X-мереж, а М. Бешлей та ін. (M. Beshley et al.) [7] розробили алгоритми «smart queue» для NB-IoT, що знизили наскрізну затримку в 1.17–2.12 раза порівняно з базовими сценаріями.

Третій напрямок сфокусовано на комплексному поєднанню сегментів. У роботі Й.-Б. Ліна (Y.-B. Lin) [8] продемонстровано застосування механізму trTCM для гарантування швидкостей (CIR) у класах MBB та IoT із виходом на $\sim 100\%$ пропускну здатність. Ефективність QoS на базі слайсингу та віртуалізації підтверджено також у працях К. С. Ібарра-Ланчерос (K. S. Ibarra-Lancheros) [9], Р. Ботез (R. Botez) [10], М. С. Абуд (M. S. Abood) [11] та Р. В. Коельо (R. W. Coêlho) [12].

Попри значний прогрес у предметній галузі, більшість робіт мають фрагментарний характер (окремий аналіз RAN або SDN) і низьку відтворюваність. Існує дефіцит E2E-моделей, що інтегрують прецизійне моделювання радіоінтерфейсів (ns-3) із гнучкістю SDN-емуляції (Mininet). Залишається малодослідженим кумулятивний вплив фізичних параметрів 5G NR (NLoS, mmWave, MCS) та логічних SDN-політик на наскрізні QoS для різноманітного трафіку (eMBB, URLLC, змішаний). Заповненню цієї прогалини і присвячено наше дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є побудова та експериментальна перевірка наскрізної (E2E) моделі мережі для кількісної оцінки впливу параметрів радіодоступу (модуляція, умови розповсюдження) та SDN-політик на підсумкові QoS користувача. Для досягнення окресленої мети було поставлено наступні послідовні завдання:

1. Верифікувати архітектуру наскрізної (E2E) моделі, що забезпечує інтеграцію засобів прецизійного моделювання сегмента радіодоступу (ns-3) із гнучкою емуляцією програмно-керованої транспортної мережі (Mininet) на основі уніфікованого набору метрик QoS.

2. Реалізувати та дослідити сценарії функціонування мережі для різноманітних типів трафіку (eMBB, URLLC та змішаних потоків) шляхом кількісної оцінки впливу варіативності параметрів RAN та різних SDN-політик маршрутизації на підсумкову якість обслуговування.

3. Провести порівняльний аналіз отриманих даних для виявлення закономірностей взаємодії між радіо- та транспортним сегментами, на основі чого сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації віртуалізованих мереж 4G/5G.

Виклад основного матеріалу. Для висвітлення поставленої наукової задачі запропонована комплексна наскрізна (*End-to-End, E2E*) модель, що базується на синергії двох спеціалізованих середовищ моделювання: дискретно-подієвого симулятора *ns-3* та емулятора програмно-визначених мереж *Mininet*. Вибір відповідної гібридної архітектури дає змогу подолати обмеження традиційних методів у яких сегменти радіодоступу та транспортної мережі розглядаються у ролі ізольованих доменів. Запропонована структура покликана забезпечити можливість дослідження кумулятивного впливу фізичних процесів у радіоканалі на логіку керування трафіком у транспортному сегменті. Загальна архітектура інтегрованої системи, що ілюструє взаємодію сегментів RAN та SDN-транспорту в єдиному циклі моделювання, представлена на рис. 1.

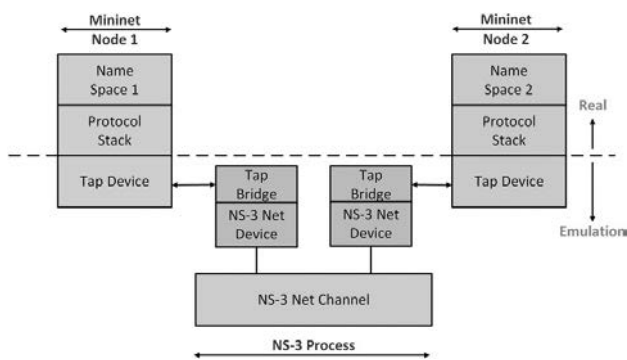


Рис. 1. Архітектура інтеграції симуляторів ns-3 та Mininet для E2E-моделювання

На відміну від традиційних підходів, де сегменти радіодоступу та транспортної мережі аналізуються окремо [3; 4], запропонована гібридна архітектура дозволяє комплексно оцінити кумулятивний вплив фізичних характеристик радіоканалу на ефективність SDN-політик у транспортному сегменті завдяки наступним функціональним компонентам:

1. *Сегмент радіодоступу (RAN)*. Реалізований на базі спеціалізованого модуля *5G-LENA* в середовищі *ns-3*. Даний компонент забезпечує прецизійне моделювання обладнання користувача (UE) та базових станцій (gNB/eNB), охоплюючи повний стек протоколів NR (New Radio). Модель дозволяє імітувати роботу мережі у частотних діапазонах sub-6 GHz та mmWave (26 GHz) з ураху-

ванням складних умов розповсюдження сигналу (LoS/NLoS) та адаптивного вибору схем модуляції MCS (від QPSK до 256-QAM) [7].

2. *Транспортна SDN-мережа*. Побудована в середовищі *Mininet* за тривірневою ієрархічною топологією (ядро, агрегація, доступ) [5]. Використання програмних комутаторів *Open vSwitch* у поєднанні із зовнішнім SDN-контролером (*Ryu/ONOS*) дозволяє реалізувати програмовані політики керування потоками на основі протоколу *OpenFlow 1.3*. Завдяки обраним рішенням стає можливою динамічна зміна маршрутів та пріоритезація трафіку з урахуванням поточного стану каналів зв'язку.

3. *Механізм системної інтеграції*. Фундаментальний принцип поєднання середовищ полягає у створенні віртуального «містка» (bridge) на рівні операційної системи. Трафік, що генерується в *ns-3*, проходить через віртуальний шлюз PGW (Packet Data Network Gateway), де він інкапсулюється в реальні Ethernet-пакети та спрямовується безпосередньо в порти комутаторів *Mininet*. Схема забезпечує автентичне збереження часових інтервалів та патернів втрат пакетів, що виникли в радіоканалі, під час їхньої подальшої обробки SDN-інфраструктурою.

Математичний опис функціонування розробленої моделі базується на аналізі часових характеристик проходження пакетів від джерела до отримувача. У підсумку якість обслуговування визначається наскрізною затримкою, тобто часом проходження пакета від джерела до отримувача через усі сегменти мережі. Цей показник розкладається на три складові:

$$T_{E2E} = T_{RAN} + T_{SDN} + T_{Proc}. \quad (1)$$

Тобто можна сказати, що загальна затримка дорівнює сумі: часу в радіоканалі (T_{RAN}), часу в транспортній мережі (T_{SDN}) та часу обробки в вузлах (T_{Proc}). Подібний розподіл показників забезпечує можливість детального аналізу внеску кожного домену в загальну наскрізну затримку. Завдяки цьому стає можливим визначення конкретного вузла або сегмента, який обмежує швидкість роботи системи при погіршенні мережевих параметрів.

Зауважимо, що радіоканал у цій моделі залишається найбільш мінливим компонентом. Його затримка залежить від відстані до базової станції, перешкод та обраної швидкості передачі. Для моделювання використано стандарт 3GPP TR 38,901, який описує втрати сигналу в діапазоні 26 ГГц:

$$PL_{NLoS} = 32,4 + 31,9 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(fc). \quad (2)$$

Рівняння (2) формалізує вплив дистанції та частоти на рівень Path Loss у складних умовах міського середовища без прямої видимості. Параметр 31,9 вказує на інтенсивне розсіювання та поглинання хвиль, що значно перевищує втрати у вільному просторі. Через енергетичний дефіцит, зумовлений NLoS, використання багаторівневих схем модуляції на кшталт 256-QAM стає неможливим, що зумовлює перехід до базової QPSK. Подібна вимушена деградація модуляційної схеми безпосередньо корелює з падінням швидкості потоку в 7–8 разів, що необхідно враховувати при плануванні транспортного сегмента. Розглянемо спектральна ефективність – ключовий показник, що визначає, скільки бітів на секунду можна передати на один герц смуги:

$$SE = \log_2(1 + SINR). \quad (3)$$

З рівняння випливає, що чим краще відношення сигналу до шуму (SINR), тим вища спектральна ефективність. При SINR = 20 дБ (хороший сигнал) $SE \approx 6,6$ біт/с/Гц, що відповідає 256-QAM. При SINR = 5 дБ (слабкий сигнал) SE падає до 1,7 біт/с/Гц (QPSK). Важливим етапом дослідження стало визначення умов функціонування RAN, оскільки саме вони визначають профіль трафіку, що надходить до SDN-контролера.

Транспортна мережа вносить затримку через комутацію пакетів та очікування в чергах. Для аналізу пріоритетних черг URLLC-трафіку використано класичну модель системи масового обслуговування:

$$W_q = \frac{\lambda E[s^2]}{2(1-\rho)}. \quad (4)$$

Середній час очікування пакета в черзі (W_q) залежить від інтенсивності надходження трафіку λ (пакетів/с), середнього часу обслуговування $E[s]$ та завантаження каналу ρ (частки зайнятого часу). Квадрат у чисельнику ($E[s^2]$) відображає варіабельність розмірів пакетів: чим більше розкид (eMBB з великими пакетами vs URLLC з малими), тим довші черги. При завантаженні каналу $\rho > 0,8$ знаменник прямує до нуля, і затримка різко зростає. Саме тому важлива пріоритизація: виділення окремої черги для URLLC із вищим пріоритетом дозволяє обслуговувати критичні пакети швидше, не чекаючи в загальній черзі за eMBB.

Визначення експлуатаційних умов RAN є фундаментальним етапом моделювання, оскільки ці параметри безпосередньо задають профіль навантаження на SDN-контролер у транспортній мережі. Запропонована система оцінювання інтегрована в ієрархічну структуру, що поєднує сегменти радіодоступу, транспорту та ядра мережі. Повна схема цієї архітектури з відображенням функціональних зон представлена на рис. 2.

На відміну від традиційних підходів, де кожен сегмент оптимізується окремо, запропонована модель дозволяє відстежити, як якість радіоканалу впливає на рішення SDN-контролера. Наприклад, при погіршенні умов LoS до NLoS у діапазоні 26 ГГц швидкість потоку падає, змінюється характер трафіку, що надходить до транспортної мережі, і виникає потреба в перерозподілі ресурсів. Роз-

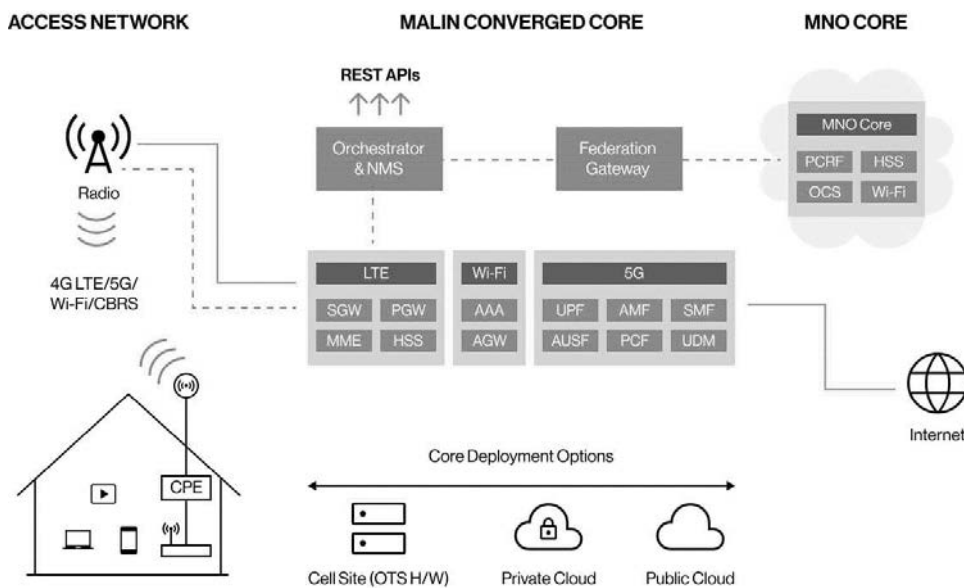


Рис. 2. Загальна архітектура 5G-мережі з виділенням сегментів RAN, транспортної мережі та ядра

глянемо Конфігурацію SDN-політик. У транспортному сегменті реалізовано два типи логіки маршрутизації.

Політика А (Shortest Path), що уявляє з себе стандартний алгоритм Дейкстри, що максимізує пропускну здатність шляху без врахування пріоритетів трафіку.

Політика Б (QoS-based), представлена адаптивним механізмом, що використовує пріоритетні черги для URLLC-трафіку через механізм set queue action OpenFlow 1,3 [11]. Формула (4) у цьому контексті показує, що при завантаженні каналу $\rho > 0,8$ відбувається різке зростання затримки. А виділення окремої черги для URLLC, у свою чергу, дозволяє обійти це обмеження для критичних пакетів.

Дослідження охоплює три типові сценарії навантаження мережі. Перший відтворює поведінку eMBB-сервісів – масове передавання даних, таке як відео у високій роздільній здатності або завантаження файлів. Для цього моделюються TCP-потоки з постійною швидкістю 50 Мбіт/с, де кожен пакет містить 1500 байт інформації. Другий сценарій імітує URLLC – критичні додатки, що потребують миттєвої реакції, наприклад керування промисловими механізмами або автономним транспортом. Тут використовуються короткі UDP-пакети по 100 байт, що надсилаються кожен мілісекунду. Третій варіант поєднує обидва типи трафіку одночасно: два потоки eMBB працюють паралельно з чотирма потоками URLLC, що дозволяє оцінити, як вони конкурують за ресурси мережі. Тривалість кожного експерименту становить 60 секунд – цього достатньо для досягнення стаціонарного режиму та отримання репрезентативних результатів.

Ефективність системи оцінюється за п'ятьма ключовими показниками. Пропускна здатність відображає реальну швидкість доставки даних кінцевому користувачеві. Наскрізна затримка вимірює час проходження пакета від джерела до отримувача через усі сегменти мережі – радіоінтерфейс, транспорт і обробку в ядрі. Джитер характеризує стабільність цього часу:

$$\text{Jitter} = \sqrt{E[T^2]} - (E[T])^2 \quad (5)$$

З рівняння видно, що чим менше коливань, тим більше передбачувана поведінка мережі, що критично для чутливих до затримок додатків. Коефіцієнт доставки показує, який відсоток пакетів успішно долає весь шлях без втрат. Якщо окремі пакети приходять через 5 мс, а інші через 25 мс (високий джитер), система керування не може покладатися на передбачуваність мережі. SDN-політики пріоритезації саме й покликані зменшити цю варіабельність для критичного трафіку. Нарешті, спектральна ефективність вказує, наскільки раціонально використовується дорогий і обмежений радіоресурс – смуга частот.

Отримані експериментальні дані демонструють нелінійний характер взаємодії між параметрами радіодоступу та підсумковою якістю обслуговування. Результати моделювання eMBB-трафіку в різних умовах RAN зведено в табл. 1.

Представлені результати свідчать про принципову відмінність у поведінці діапазонів sub-6 ГГц та mmWave. У діапазоні 26 ГГц при прямій видимості досягається рекордна пропускна здатність 420 Мбіт/с завдяки застосуванню 256-QAM та широкій смузі 100 МГц. Водночас цей же діапазон демонструє катастрофічне падіння продуктивності при втраті прямої видимості: швидкість падає до 58 Мбіт/с, що у 7,2 раза менше за ідеальні умови та на 70% нижче за показник діапазону 3,5 ГГц у аналогічних умовах NLoS.

Результати можна пояснити різким зростанням загасання сигналу в mmWave-діапазоні при блокуванні траси, що формула (2) відображає коефіцієнтом 31,9 замість 21,0 для LoS. Система адаптивно знижує MCS до QPSK, зберігаючи зв'язок, але ціною спектральної ефективності 0,9 біт/с/Гц проти 6,8 біт/с/Гц у сприятливих умовах. Подібна варіабельність продуктивності mmWave узгоджується з даними роботи [7] та має критичне значення для планування транспортного сегмента: мережа повинна бути готовою до раптових змін інтенсивності трафіку при переміщенні користувача між зонами LoS та NLoS.

Другий блок експериментів був спрямований на оцінку ефективності SDN-політик у сценарії змішаного трафіку. При завантаженні каналів на рівні 75% ($\rho \approx 0,75$) було порівняно стандартну

Таблиця 1

Порівняння продуктивності eMBB у різних сценаріях RAN

Сценарій	MCS	Throughput, Мбіт/с	E2E Delay, мс	PDR, %	SE, біт/с/Гц
3,5 ГГц, LoS	64-QAM	185	12	99,8	5,3
3,5 ГГц, NLoS	16-QAM	95	18	98,5	2,7
26 ГГц, LoS	256-QAM	420	8	99,9	6,8
26 ГГц, NLoS	QPSK	58	35	94,2	0,9

маршрутизацію Shortest Path з адаптивною QoS-based політикою. Особливу увагу приділено джитеру (варіація затримки) σ_T обчислюється як стандартне відхилення затримки за формулою (5).

Для кількісної оцінки запропонованих рішень було проведено серію експериментів у стресовому сценарії за умови завантаження мережевих ресурсів на 75%. Порівняльний аналіз класичної стратегії Shortest Path та розробленої QoS-орієнтованої політики дозволив визначити ступінь оптимізації ключових параметрів для різних класів трафіку. Зведені результати цього тестування, що демонструють переваги адаптивного керування для критичних сервісів, представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння SDN-політик у змішаному сценарії (перевантаження 75%)

Метрика	Shortest Path	QoS-based	Покращення
URLLC E2E Delay, мс	25	15	40%
URLLC Джитер, мс	8	4	50%
URLLC PDR, %	96,5	99,1	2,6%
eMBB Throughput, Мбіт/с	142	138	-2,8%

Аналіз даних представлених у таблиці 2 дозволяє зробити висновок про суттєву перевагу QoS-based підходу для критичного трафіку. Застосування пріоритетних черг зменшило наскрізну затримку URLLC-пакетів з 25 мс до 15 мс, тобто на 40%. Що ще важливіше, джитер скоротився наполовину – з 8 мс до 4 мс. Це означає, що система стала значно передбачуванішою: замість розкиду затримок у широкому діапазоні критичні пакети стабільно проходять за майже однаковий час. Покращення PDR на 2,6% (з 96,5% до 99,1%) додатково підтверджує надійність такого підходу.

Варто звернути увагу на механізм досягнення цього ефекту. На рис. 3 показано архітектуру взаємодії компонентів SDN у середовищі Mininet. SDN-контролер (Ryu) підтримує зв'язок з програмними комутаторами Open vSwitch через протокол OpenFlow 1.3. При отриманні пакета комутатор звертається до контролера за інструкцією щодо маршрутизації. У випадку QoS-based політики контролер аналізує поле DSCP (Differentiated Services Code Point) у заголовку IP-пакета, що надійшов з ns-3 через інтеграційний міст. Пакети URLLC маркуються вищим пріоритетом і спрямовуються до окремої черги з мінімальним часом очікування, тоді як eMBB-пакети обслуговуються за принципом «найкращих зусиль» у загальній черзі.

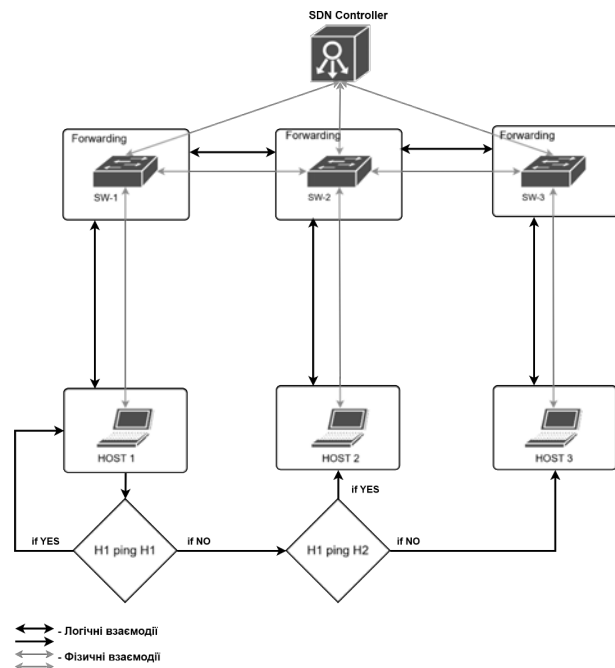


Рис. 3. Детальна схема взаємодії SDN-контролера, комутаторів та хостів у Mininet

Ціна запропонованого покращення полягає у незначному зниженні пропускної здатності eMBB з 142 Мбіт/с до 138 Мбіт/с, тобто на 2,8%. Цей компроміс цілком прийнятний, оскільки eMBB-сервіси за своєю природою толерантні до затримок, тоді як URLLC-додатки вимагають жорсткого дотримання часових обмежень. Отримані результати доводять, що інтелектуальне керування транспортним сегментом здатне компенсувати негативні наслідки нестабільності радіоканалу. Навіть коли якість з'єднання в діапазоні 26 ГГц погіршується через втрату прямої видимості, правильно налаштовані SDN-політики зберігають прийнятний рівень обслуговування для критичних додатків.

Висновки. Проведене дослідження спрямоване на подолання методологічного розриву між аналізом радіосегмента та транспортної інфраструктури в мережах 4G/5G. Традиційний підхід, за якого ці домени розглядаються ізольовано, не дає змоги повноцінно оцінити детермінований вплив фізичних процесів у радіоканалі на ефективність політик керування трафіком. Запропонована гібридна архітектура, що поєднує симулятор ns-3 для моделювання RAN та емулятор Mininet для дослідження SDN-транспорту, дала змогу встановити кількісні закономірності такої взаємодії.

До ключових результатів дослідження належать такі положення.

1. **Специфіка розповсюдження хвиль у mmWave-діапазоні.** Показано, що діапазон 26 ГГц

характеризується принципово відмінною динамікою залежно від умов прямої видимості. В сценарії LoS досягнуто пропускної здатності 420 Мбіт/с за спектральної ефективності 6,8 біт/с/Гц, що істотно перевищує показники смуги sub-6 ГГц. Водночас у випадку NLoS швидкість передачі зменшується до 58 Мбіт/с, що приблизно на 70% нижче порівняно з діапазоном 3,5 ГГц за аналогічних умов. Така деградація зумовлена експоненціальним зростанням загасання сигналу в міліметровому діапазоні, що у формулі (2) відображено підвищеним коефіцієнтом поглинання (31,9). Практичний аспект отриманих результатів полягає в необхідності підвищення щільності розміщення базових станцій або впровадження альтернативних маршрутів поширення сигналу для мінімізації зон NLoS.

2. Ефективність адаптивного керування трафіком.

Встановлено, що застосування SDN-політик пріоритетизації здатне компенсувати негативний вплив нестабільності радіоканалу на показники QoS. У сценарії змішаного навантаження (75% утилізації каналу) використання QoS-based підходу забезпечило зменшення затримки URLLC-пакетів на 40% (з 25 мс до 15 мс) та джитера на 50% порівняно зі стандартним алгоритмом Shortest Path. При цьому зниження пропускної здатності eMBB-потоків не перевищило 2,8%, що підтверджує ефективність і збалансованість розподілу ресурсів. Досягнутий ефект пояснюється централізованим керуванням чергами на основі протоколу OpenFlow 1.3, що забезпечує пріоритетну обробку критичних пакетів у вузлах комутації.

3. Ідентифікація критичних ланок системи.

Запропонована наскрізна (E2E) модель забезпечує можливість виявлення «вузьких місць» на різних ієрархічних рівнях мережі. Використання аналітичного розкладу загальної затримки (формула (1)) дозволяє диференціювати напрями оптимізації: підвищення SINR у радіоканалі, масштабування транспортної мережі в умовах перевантаження або нарощування обчислювальних ресурсів вузлів обробки.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні методу інтеграції гетерогенних середовищ моделювання із забезпеченням часової когерентності трафіку під час переходу від RAN до SDN-транспортного сегмента. На відміну від підходів, орієнтованих на аналіз окремих доменів, запропонований метод дозволяє досліджувати їхню кумулятивну взаємодію в межах єдиного циклу моделювання.

Практичне значення результатів полягає у можливості застосування розробленої моделі для проектування та оптимізації операторських мереж 5G. Отримані залежності дають змогу обґрунтовано обирати частотні діапазони з урахуванням топографічних умов і конфігурувати SDN-політики для забезпечення гарантованого обслуговування критичних сервісів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією механізмів машинного навчання для предиктивного керування SDN-політиками на основі динамічного прогнозування стану радіоканалу. Окремим напрямом розвитку є розширення моделі на мережі 6G, зокрема з підтримкою терагерцового діапазону та використанням інтелектуальних відбивних поверхонь (RIS).

Список літератури:

1. Сколець С. С., Кравчук С. О. Віртуалізація мережних функцій у 5G: підходи, архітектура та перспективи розвитку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36, № 1. С. 25–35. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/23>
2. Кравчук С. О. Теорія мобільних інфокомунікаційних систем. Архітектура системи : підручник. Київ : Ігор Сікорський Київський політехнічний інститут, 2023. 683 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/2e689abc-2852-4367-859e-c6a084b9cb20/download>
3. Lavacca F. G., Salvo P., Ferranti L., Speranza A., Costantini L. Performance Evaluation of 5G Access Technologies and SDN Transport Network on an NS3 Simulator. *Computers*. 2020. Vol. 9, № 2. P. 43. DOI: 10.3390/computers9020043.
4. Khorsandroo S., Sánchez A. G., Tosun A. S., Arco J. M., Doriguzzi-Corin R. Hybrid SDN evolution: A comprehensive survey of the state-of-the-art. *Computer Networks*. 2021. Vol. 192. 107981. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.107981.
5. Ammar S., Lau C. P., Shihada B. An In-Depth Survey on Virtualization Technologies in 6G Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Networks. *arXiv:2312.01895*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2312.01895>
6. Mouawad N. SDN based Mobility Management and Quality of Service Provisioning for 5G Vehicular Networks. Université Paris-Saclay; Université Libanaise. 2020. URL: <https://theses.hal.science/tel-02973961>
7. Beshley M., Beshley H., Maksymyuk T., Strykhaluk B. End-to-End QoS “Smart Queue” Management Algorithms and Traffic Prioritization Mechanisms for Narrow-Band Internet of Things Services in 4G/5G Networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 8. P. 2324. DOI: 10.3390/s20082324.

8. Lin Y.-B., Tseng C.-C., Wang M.-H. Effects of Transport Network Slicing on 5G Applications. *Future Internet*. 2021. Vol. 13, № 3. P. 69. DOI: 10.3390/fi13030069.
9. Ibarra-Lancheros K. S., Puerto-Leguizamón G., Suárez-Fajardo C. A. Quality of service evaluation based on network slicing for software-defined 5G systems. *Ingeniería y Universidad*. 2018. Vol. 22, № 3. P. 27–50. URL: <https://www.redalyc.org/journal/3442/344256704002/344256704002.pdf>
10. Botez R., Pasca A.-G., Sferle A.-T., Ivanciu I.-A., Dobrota V. Efficient Network Slicing with SDN and Heuristic Algorithm for Low Latency Services in 5G/B5G Networks. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 13. P. 6053. DOI: 10.3390/s23136053.
11. Abood M. S., Wang H., Virdee B. S., et al. Improved 5G network slicing for enhanced QoS against attack in SDN environment using deep learning. *IET Communications*. 2024. Vol. 18, № 1. P. 38–52. DOI: 10.1049/cmu2.12735.
12. Coêlho R. W., Silva R. A., Leonardo E. J., Martimiano L. A. F. IoT and 5G Networks: A Discussion of SDN, NFV and Information Security. *Journal of the Brazilian Computer Society*. 2024. Vol. 30, № 1. P. 1–15. DOI: 10.5753/jbcs.2024.3021.

Skolets S.S., Kravchuk S.O. COMPREHENSIVE E2E QoS ASSESSMENT METHOD VIA INTEGRATED RAN AND SDN-TRANSPORT MODELING IN 5G NETWORKS

The period of mass 5G technology deployment necessitates precise coordination between the radio segment and the software-defined transport infrastructure. This paper presents a method for comprehensive end-to-end quality of service (E2E QoS) assessment, based on the interrelation between physical radio channel parameters and SDN routing logic. The practical implementation of this approach was achieved through the integration of the ns-3 simulator, responsible for RAN modelling, and the Mininet emulator, which reproduces the functionality of the software-defined transport network. The proposed toolkit enabled the determination of relevant throughput, latency, and jitter metrics across various frequency bands and signal propagation scenarios. Special emphasis is placed on high-load regimes, where operators face the necessity of implementing prioritization for critical data flows. Under these conditions, the method provides an objective evaluation of the effectiveness of adaptive SDN policies compared to conventional routing algorithms. The optimal performance of a 5G network in such circumstances directly depends on the rational selection of the frequency spectrum and service queue configurations, requiring the simultaneous resolution of radio interface modelling, environment integration, and multi-factor QoS metric analysis. To verify the impact of RAN parameters on the resulting service quality, spectral efficiency and connection stability were evaluated under Non-Line-of-Sight (NLoS) conditions. E2E QoS operational performance indicators were determined over a 60-second simulation interval, accounting for dynamic changes in modulation schemes (from QPSK to 256-QAM) and the variability of different traffic types. The efficiency analysis of the transport segment is based on a comparison between Shortest Path and QoS-based strategies. This approach considers that when link utilization exceeds 75%, critical URLLC traffic requires isolated service queues to minimize latency. The final element of the study is a developed method for evaluating the probabilistic performance indicators of the integrated system, which allows for the detailing of multiple end-to-end delay components within the «user-to-service» path.

Keywords: end-to-end modelling, efficiency, Quality of Service (QoS), Software-Defined Networking (SDN), Radio Access Network (RAN), 4G/5G networks, ns-3 and Mininet integration.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026