

УДК 621.396:004.7

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.018042

Горохов О.С.

УДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ РАДІОЧАСТОТНИМИ РЕСУРСАМИ В СЕГМЕНТОВАНІЙ МЕРЕЖІ РАДІОДОСТУПУ 5G

Gorokhov, O.S. Improving radio frequency resource management in a segmented 5G Radio Access Network. This article examines the problem of radio frequency resource management in a segmented 5G radio access network under conditions of limited physical resources in NR cells and increasing heterogeneous service quality requirements. It is shown that, even with network segmentation mechanisms in the core network, the implementation of end-to-end segmentation at the RAN level remains a complex scientific and practical problem, since it is precisely in the radio access domain that resources have strict physical constraints and are shared by multiple segments. Based on an analysis of 3GPP specifications and current scientific literature, it has been established that known approaches either focus on signaling and architectural support for network slicing or are oriented toward local planning schemes that do not fully account for the interests of network segments as independent optimization objects. An improved adaptive multi-level method for managing radio frequency resources in a segmented RAN is proposed, which combines control of the number of user devices in the RRC_CONNECTED state at the network segment group level with multi-criteria allocation of resource blocks at the RB level. Within a single algorithmic framework, planning modes based on QoS, RB reservation, and physical carrier isolation are supported. The results of the simulation study showed that the proposed method improves the overall SLA fulfillment rate to 0.877, compared to 0.844 for static reservation and 0.856 for QoS-only scheduling, while maintaining high spectrum utilization and less dynamic resource reconfiguration.

Keywords: 5G, network slicing, RAN slicing, S-NSSAI, gNodeB, QoS, SLA, resource blocks, RRC_CONNECTED, adaptive resource management

Горохов О.С. Удосконалення управління радіочастотними ресурсами в сегментованій мережі радіодоступу 5G. У статті досліджено проблему управління радіочастотними ресурсами в сегментованій мережі радіодоступу 5G в умовах обмеженості фізичних ресурсів NR-комірки та зростання різнорідних вимог до якості обслуговування. Показано, що за наявності механізмів мережевого сегментування в базовій мережі реалізація наскрізного сегментування на рівні RAN залишається складною науково-прикладною проблемою, оскільки саме в домені радіодоступу ресурси мають жорстке фізичне обмеження й використовуються спільно кількома сегментами. На підставі аналізу специфікацій 3GPP та сучасних наукових праць встановлено, що відомі підходи або зосереджені на сигнальній та архітектурній підтримці network slicing, або орієнтовані на локальні схеми планування, які не забезпечують повного врахування інтересів мережевих сегментів як самостійних об'єктів оптимізації. Запропоновано удосконалений адаптивний багаторівневий метод управління радіочастотними ресурсами в сегментованій RAN, який поєднує керування кількістю користувачьких пристроїв у стані RRC_CONNECTED на рівні груп мережевих сегментів із багатокритеріальним розподілом ресурсних блоків на рівні RB. У межах єдиного алгоритмічного каркасу підтримуються режими планування на основі QoS, резервування RB та фізичної ізоляції несучих. Результати модельного дослідження показали, що запропонований метод забезпечує підвищення загального рівня виконання SLA до 0,877 порівняно з 0,844 для статичного резервування та 0,856 для QoS-only планування, водночас зберігаючи високе використання спектра та меншу динамічність перенаштування ресурсів.

Ключові слова: 5G, network slicing, RAN slicing, S-NSSAI, gNodeB, QoS, SLA, resource blocks, RRC_CONNECTED, адаптивне управління ресурсами

Вступ

Однією з ключових ідей мереж п'ятого покоління є можливість одночасної підтримки різнорідних сервісів у межах єдиної фізичної інфраструктури. Саме тому мережеве сегментування розглядається як базовий механізм персоналізації логічних мережевих середовищ для сервісів із різними вимогами до пропускної здатності, затримки, надійності та рівня ізоляції. У контексті 5G SA мережевий сегмент уже не є лише логічною абстракцією рівня core network, а повинен підтримуватися в усіх доменах наскрізної архітектури, включаючи транспортну мережу та мережу радіодоступу.

Водночас саме домен RAN є найбільш проблемним для реалізації network slicing, оскільки в ньому радіочастотні ресурси мають жорстке фізичне обмеження, залежать від умов поширення, поточного навантаження, топології мережі та стану користувацьких пристроїв. На відміну від core network або transport network, де масштабування частини функцій може досягатися за рахунок віртуалізації, у мережі радіодоступу розподіл ресурсів завжди зумовлений кінцевим числом ресурсних блоків, спектральною смугою, рівнем інтерференції та радіоумовами.

Архітектурна й процедурна підтримка slice-aware функціонування в NG-RAN уже визначена в стандартах 3GPP. Під час встановлення PDU Session у NG-RAN передається S-NSSAI, який дає змогу виконувати відображення сесії на відповідний мережевий сегмент, а також застосовувати політики ресурсного керування з урахуванням вимог SLA. Однак стандарт задає лише сигнальну та функціональну основу для сегментування і не визначає завершеного методу адаптивного багатокритеріального розподілу ресурсних блоків між сегментами в динамічному багатосервісному середовищі.

Актуальність дослідження полягає в тому, що зі зростанням кількості сервісів URLLC, eMBB та mMTC підвищується конфліктність вимог до радіоресурсів. Статичне резервування частини смуги для окремих сегментів підвищує ізоляцію, але знижує гнучкість. Натомість суто QoS-орієнтовані схеми планування можуть забезпечувати високі результати для пріоритетного трафіку, але не гарантують збалансованого виконання SLA для всієї множини сегментів і не враховують стабільність рішень у часі. Тому потрібен метод, який одночасно враховує QoS, міжсегментну ізоляцію, спектральну ефективність, часову мінливість навантаження та допустиму динаміку переналаштування ресурсу.

Аналіз останніх досліджень. Проведений аналіз нормативних документів і наукових праць дає підстави стверджувати, що розвиток підходів до сегментування мережі 5G відбувається послідовно: від формування архітектурної основи сегментування — до пошуку ефективних механізмів динамічного управління ресурсами. Так, у специфікації 3GPP TS 23.501 [1] закладено системні засади підтримки мережевих сегментів у системі 5G через використання S-NSSAI, механізмів вибору сегмента та функції NSSF. Це забезпечує можливість ідентифікації, вибору та підтримки мережевих сегментів на рівні архітектури 5G, однак не визначає способу безпосереднього адаптивного розподілу радіочастотних ресурсів у мережі радіодоступу.

Подальший розвиток цієї ідеї відображено у специфікації 3GPP TS 38.300 [2], де вже безпосередньо для NG-RAN передбачено підтримку ізоляції ресурсів між сегментами, а також сегментно-орієнтоване встановлення ресурсів для PDU-сеансів за принципом «один S-NSSAI для одного PDU-сеансу». Отже, стандарт задає функціональну основу для реалізації сегментування в мережі радіодоступу та фактично формує передумови для побудови алгоритмів сегментно-орієнтованого управління ресурсами. Водночас у ньому не запропоновано завершеного методу, який би одночасно враховував поточний попит сегментів, пріоритети обслуговування, міжсегментну ізоляцію, стабільність рішень у часі та обмеження радіоресурсу комірки.

Узагальнення наукових праць підтверджує, що подальший розвиток досліджень ішов у напрямі підвищення адаптивності механізмів сегментування. Зокрема, в оглядовій праці X. Foukas та співавт. [3] підкреслено, що сегментування мережі 5G є перспективним засобом підтримки різнорідних сервісів, однак у цій сфері зберігається низка відкритих наукових питань. Це означає, що навіть за наявності сформованої концепції сегментування проблема конкретних механізмів керування ресурсами, особливо в домені RAN, ще не була вичерпно розв'язана.

Подальшим кроком у розвитку цієї тематики можна вважати перехід до адаптивних і багаторівневих методів управління. У роботі R. Firouzi та R. Rahmani [4] запропоновано дворівневий механізм сегментування для сервісів eMBB та URLLC в архітектурі O-RAN, де задача розподілу ресурсів розв'язується на верхньому та нижньому рівнях. Цей підхід підтверджує доцільність багаторівневого управління та показує, що поєднання рішень різних

рівнів дає змогу підвищити ефективність обслуговування чутливих до затримки сервісів. Разом з тим зазначений метод зосереджений переважно на мінімізації затримки та не розкриває повною мірою питання поєднання керування доступом користувачьких пристроїв до стану RRC_CONNECTED, мінімально гарантованого ресурсу для сегментів, міжсегментної ізоляції та стабільності переналаштування ресурсу в часі.

Інший напрям розвитку представлено у праці Т. А. Максимюка та співавт. [5], де адаптивне логічне розділення мережі 5G здійснюється на основі глибокого навчання. У цій роботі показано доцільність прогнозування інтенсивності трафіку та частки абонентів окремих сегментів мережі, а також продемонстровано, що такий підхід дає змогу підвищити ефективність використання радіочастотних ресурсів. Отже, ця праця розвиває ідею адаптивності, доповнюючи сегментування механізмами прогнозування. Проте її основний акцент зроблено саме на прогнозуванні структури трафіку, тоді як задача формалізованого багатокритеріального розподілу ресурсних блоків між сегментами з урахуванням часової стабільності та обмежень на навантаження RRC_CONNECTED залишається відкритою.

Постановка завдання. Враховуючи вище сказане, запропонований у даній роботі підхід доцільно розглядати як продовження і водночас удосконалення вже наявних методів. Якщо стандарти 3GPP формують архітектурну й функціональну основу сегментування, оглядові праці окреслюють невирішені проблеми, а сучасні дослідження пропонують адаптивні дворівневі або прогнозні механізми розподілу ресурсів, то запропонований метод розвиває ці підходи в напрямі їх узгодження в межах єдиної моделі управління радіочастотними ресурсами сегментованої RAN. Його сутність полягає в поєднанні двох взаємопов'язаних контурів: на верхньому рівні – керування допустимою кількістю користувачьких пристроїв у стані RRC_CONNECTED для груп сегментів, на нижньому – адаптивного багатокритеріального розподілу ресурсних блоків між сегментами відповідно до їх поточного попиту, пріоритетів, вимог до якості обслуговування та умов міжсегментної ізоляції. Така постановка не заперечує попередні результати, а розвиває їх, поєднуючи архітектурну сумісність із 5G/NG-RAN, багаторівневість управління та формалізоване врахування часової динаміки ресурсних рішень.

На відміну від відомих підходів, запропонований метод враховує не лише факт належності трафіку до певного сегмента та не лише прогнозовану інтенсивність навантаження, а й допустимі межі зміни виділеного ресурсу, мінімальні гарантовані обсяги ресурсів і потребу в збереженні стійкості рішень у часі. Саме тому його можна трактувати як наступний етап розвитку досліджень у цій галузі: від архітектурного опису сегментування — до побудови узгодженого методу адаптивного управління радіочастотними ресурсами в сегментованій мережі радіодоступу 5G.

Метою роботи є розроблення та дослідження удосконаленого адаптивного багаторівневого методу управління радіочастотними ресурсами в сегментованій мережі радіодоступу 5G, який забезпечує більш збалансоване виконання вимог SLA мережевих сегментів в умовах змінного навантаження порівняно зі статичним резервуванням і суто QoS-орієнтованим плануванням.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання: сформулювати теоретичну модель сегмента як об'єкта оптимізації в RAN; формалізувати задачу розподілу RB між сегментами з урахуванням мінімальних гарантій, попиту, стабільності та часової динаміки; поєднати механізм групового керування кількістю UE у стані RRC_CONNECTED із адаптивним RB allocation; запропонувати алгоритмічну модель реалізації методу; провести модельне дослідження й порівняти результати з базовими підходами.

Наукова новизна полягає в тому, що удосконалено метод управління радіочастотними ресурсами в сегментованій RAN шляхом поєднання групового керування доступом UE до стану RRC_CONNECTED та адаптивного багатокритеріального розподілу ресурсних блоків між сегментами з урахуванням QoS, міжсегментної ізоляції, спектральної ефективності, стабільності рішень і часових обмежень реакції системи керування. На відміну від відомих статичних і суто QoS-орієнтованих підходів, запропонований метод розглядає мережевий

сегмент як самостійний об'єкт оптимізації та забезпечує більш збалансоване виконання SLA в умовах змінного трафіку.

Виклад основного матеріалу дослідження

Теоретичне обґрунтування та формалізація задачі. У межах сегментованої RAN кожний мережевий сегмент доцільно розглядати як логічну сутність, що має власні вимоги до якості обслуговування, поточний трафіковий стан та обмеження, які впливають із SLA. Такий підхід дозволяє перейти від конфігураційного опису slicing до оптимізаційної моделі, у якій об'єктом керування є не окремий bearer або QoS-flow, а саме мережевий сегмент.

Нехай у межах однієї NR-комірки функціонує множина сегментів $S=S_1, S_2, \dots, S_n$, а загальний пул радіоресурсів представлено множиною $RB=RB_1, RB_2, \dots, RB_m$. Введемо бінарну змінну $x_{(i,m)}(t)$, яка набуває значення 1, якщо ресурсний блок RB_m у момент часу t призначено сегменту S_n , і 0 – в іншому разі. Тоді сумарний обсяг ресурсу, виділений сегменту, визначається сумою всіх призначених йому ресурсних блоків.

$$R_i(t) = \sum_{m=1}^M x_{(i,m)}(t), x_{(i,m)}(t) \in 0, 1$$

При цьому для кожного ресурсного блоку повинна виконуватися умова неперетинності призначень.

$$\sum_{i=1}^N x_{(i,m)}(t) \leq 1$$

Для кожного сегмента вводиться функція попиту на радіочастотні ресурси $D_i(t)$, яка відображає необхідний обсяг RB для забезпечення поточних вимог до пропускну здатності, затримки та надійності. Відхилення між фактичним і потрібним ресурсом можна подати як:

$$\Delta_i(t) = |D_i(t) - R_i(t)|$$

Тоді базова мета розподілу ресурсів полягає в мінімізації сумарного зваженого дефіциту з урахуванням пріоритетів сегментів.

$$J_1(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i \Delta_i(t)$$

Однак миттєва мінімізація дефіциту не є достатньою. У реальній RAN рішення щодо розподілу ресурсів повинні бути стабільними в часі, інакше різкі коливання призначень RB викликать нестабільність планування та погіршення якості обслуговування. Тому додатково вводиться обмеження на швидкість зміни виділеного ресурсу:

$$|R_i(t) - R_i(t-1)| \leq \delta_i.$$

Для сегментів із жорсткими часовими вимогами доцільно також увести умову реакції системи керування:

$$R_i(t + \tau_i) \geq D_i(t)$$

З урахуванням різноспрямованих вимог задача розподілу ресурсів подається як багатокритеріальна оптимізація, де одночасно враховуються виконання QoS/SLA, рівень міжсегментної ізоляції, ефективність використання спектра та стабільність рішень.

$$\min J(t) = \alpha J_{QoS}(t) + \beta J_{iso}(t) + \gamma J_{eff}(t) + \mu J_{stab}(t)$$

Саме така постановка дає змогу перейти від одновимірного планування за пріоритетами до системного управління сегментованою мережею радіодоступу, у якій кожний сегмент має власні гарантії, цілі та допустиму динаміку адаптації.

Запропонований метод адаптивного багаторівневого керування. На основі отриманої постановки пропонується удосконалений адаптивний багаторівневий метод управління радіочастотними ресурсами в сегментованій RAN. Його сутність полягає в об'єднанні двох взаємопов'язаних контурів керування: верхнього контуру admission-level регулювання та нижнього контуру адаптивного розподілу ресурсних блоків.

Верхній контур реалізує управління кількістю користувацьких пристроїв у стані RRC_CONNECTED на рівні груп мережевих сегментів. У багатосегментному сценарії такий підхід є принципово важливим, оскільки навантаження на RAN формується не лише інтенсивністю трафіку, а й кількістю активних UE, які одночасно споживають радіочастотні, сигнальні та обчислювальні ресурси. Для кожної групи сегментів задається допустимий поріг N_g^{max} , перевищення якого призводить до застосування правил обмеження admission, тимчасової корекції політики обслуговування або зменшення ресурсу, доступного для менш критичних сервісів.

Нижній контур виконує адаптивний розподіл ресурсних блоків між сегментами або групами сегментів. На відміну від статичного резервування, цей контур враховує поточний попит $D_i(t)$, мінімальні гарантії R_i^{min} , пріоритети SLA, ваги критичності сегментів, стабільність переналаштування та спектральну ефективність. На відміну від QoS-only планування, він не зводиться лише до пріоритетизації трафіку, а забезпечує контрольований баланс між усіма сегментами.

Практична реалізація методу передбачає підтримку трьох режимів: QoS-based planning, RB reservation та carrier isolation. У першому режимі головним пріоритетом є гнучке динамічне призначення RB за вагами QoS і SLA; у другому – забезпечення гарантованого мінімуму ресурсів для окремих сегментів; у третьому – фізична ізоляція сервісів шляхом рознесення по несучих або частотних ресурсах. Об'єднання цих режимів у межах єдиного алгоритмічного каркасу є важливою перевагою запропонованого методу, оскільки дозволяє адаптувати механізм сегання до конкретного сценарію експлуатації мережі.

З погляду наукової новизни метод відрізняється від відомих підходів тим, що поєднує slice-aware керування доступом до активного стану UE та slice-aware розподіл радіоресурсів у межах однієї моделі оптимізації, доповненої часовими параметрами стабільності й реакції системи керування.

Алгоритм реалізації методу. Алгоритм функціонування запропонованого методу подається як дискретний періодичний процес, що виконується на кожному інтервалі планування. Основні етапи алгоритму наведено нижче.

1. Формування поточного стану системи: визначаються активні сегменти, обсяги попиту $D_i(t)$, кількість UE у стані RRC_CONNECTED, доступний пул ресурсних блоків, історія попередніх рішень та параметри SLA.
2. Оцінювання навантаження на верхньому рівні: для кожної групи сегментів перевіряється виконання обмеження щодо максимальної кількості UE у стані RRC_CONNECTED. У разі перевищення активуються політики admission control або корекції бюджетів ресурсів.
3. Вибір режиму сегментування: залежно від типу сервісів, рівня навантаження та вимог до ізоляції обирається режим планування на основі QoS, резервування RB або ізоляція несучої.
4. Розподіл гарантованого мінімуму ресурсів: критичним сегментам призначаються мінімальні квоти RB, які забезпечують базове виконання SLA та недопущення деградації сервісу.
5. Розподіл залишкових ресурсів: вільні RB розподіляються пропорційно зваженому надлишковому попиту, що визначається функцією від $D_i(t)$, поточного дефіциту, пріоритету сегмента та історії попередніх рішень.
6. Накладання обмежень на динаміку адаптації: перевіряється виконання умов щодо максимально допустимої швидкості зміни виділеного ресурсу δ_i та часової реакції τ_i .
7. Оцінювання критеріїв якості: обчислюються рівень виконання SLA, індекс міжсегментної ізоляції, ефективність використання спектра та темп перерозподілу RB.
8. Оновлення стану системи та перехід до наступного інтервалу планування.

Методика моделювання. Для перевірки запропонованого методу виконано модельне дослідження в одній NR-комірці з трьома типами сегментів: URLLC, eMBB та mMTC. Вибір

саме таких сегментів зумовлений тим, що вони репрезентують три різні класи сервісних вимог: мінімальну затримку й високу надійність; підвищену пропускну здатність; масове підключення пристроїв із невеликим трафіком. Для кожного сегмента задавалися мінімальні гарантії ресурсів, вагові коефіцієнти пріоритету та часово-залежний попит на RB.

Загальна місткість комірки приймалася сталою, а навантаження моделювалося як перевантажений сценарій зі змінною інтенсивністю в різні інтервали часу. Для порівняння розглядалися три підходи: статичне резервування, QoS-only планування та запропонований адаптивний багаторівневий метод.

Для всіх підходів оцінювалися інтегральні показники: загальне SLA-виконання, SLA для кожного сегмента, індекс порушення ізоляції, зважений дефіцит ресурсів, середнє використання спектра та темп перерозподілу ресурсних блоків. Такий набір KPI відповідає багатокритеріальній постановці задачі та дозволяє оцінити не лише локальний вигравш одного сегмента, а й збалансованість роботи системи в цілому.

Результати дослідження та їх обговорення. Отримані результати показали, що статичне резервування забезпечує відносно стабільне, але недостатньо гнучке обслуговування сегментів. За такого підходу загальне SLA-виконання становило 0,844, а середнє використання спектра – 0,847. Це означає, що статичне резервування дає прийнятний рівень прогнозованості, однак втрачає ефективність у ситуаціях, коли фактичний трафік окремих сегментів істотно відрізняється від закладених квот.

QoS-only планування продемонструвало найвищі результати для критичного URLLC-трафіку та дуже високе використання спектра, але погіршило обслуговування низькопріоритетного mMTC-сегмента і призвело до суттєвого зростання темпу перерозподілу RB. Тобто такий підхід добре розв'язує задачу пріоритетного доступу, але не забезпечує належного балансу між сегментами та може породжувати надмірну динаміку керуючих рішень.

Найкращий інтегральний результат продемонстрував запропонований адаптивний багаторівневий метод. Він забезпечив загальне SLA-виконання на рівні 0,877, високе використання спектра та помітно меншу інтенсивність перерозподілу ресурсів, ніж QoS-only підхід. Це підтверджує, що поєднання admission-level контролю навантаження з адаптивним багатокритеріальним RB allocation є доцільним для сегментованої RAN.

Результати моделювання наведені в таблиці 1 та на рисунках 1 та 2.

Таблиця 1

Порівняльні метрики модельного дослідження

Метод	Загальне SLA	URLLC	eMBB	mMTC	Поруш. ізоляції	Зважений дефіцит	Викор. спектра	Темп зміни RB
Статичне резервування	0.844	0.900	0.770	0.863	0.012	0.285	0.847	0.052
QoS-only планування	0.856	1.000	0.859	0.709	0.030	0.172	0.946	0.103
Адаптивний багаторівневий метод	0.877	0.960	0.843	0.829	0.013	0.188	0.939	0.065

Порівняння показало, що запропонований метод не прагне максимізувати лише один KPI, а забезпечує компроміс між виконанням SLA, ізоляцією, спектральною ефективністю та стабільністю рішень. Саме включення до моделі обмежень типу δ_i і τ_i дозволило отримати контрольоване перенаштування ресурсів без різких стрибків у розподілі RB.

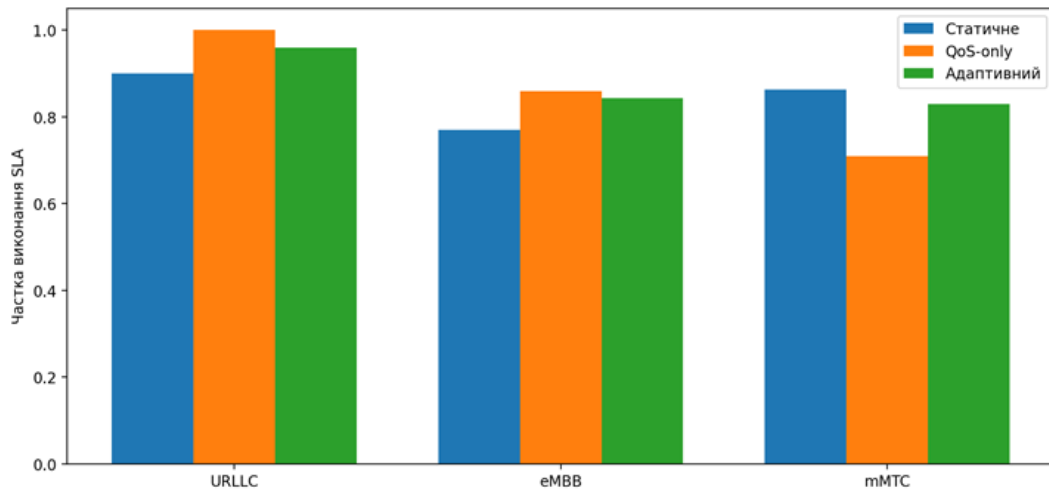


Рис. 1. Порівняння рівня виконання SLA по сегментах

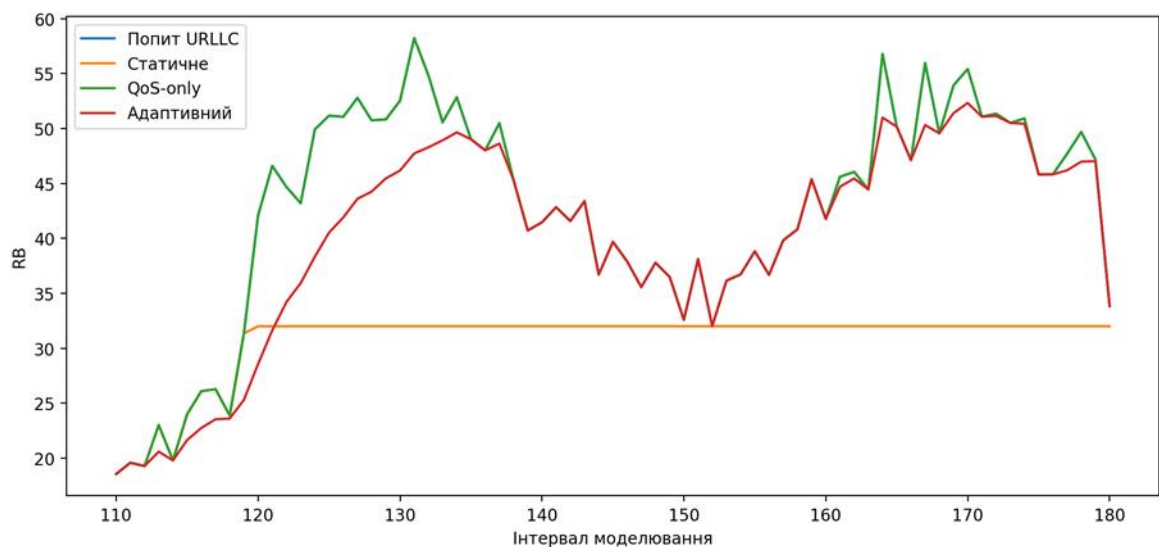


Рис. 2. Відстеження пікового навантаження URLLC

У практичному аспекті це означає, що метод краще відповідає реальним вимогам мережевого сегментування, де критичним є не лише миттєвий виграш для одного класу сервісів, а й прогнозованість роботи мережі, збереження мінімальних гарантій для менш пріоритетних сегментів і стійкість керування за умов змінного навантаження.

Отримані результати підтверджують доцільність переходу від конфігураційно-орієнтованих моделей RAN-slicing до адаптивного controller-based або gNodeB-based керування радіочастотними ресурсами, де сегмент виступає самостійним об'єктом оптимізації.

Висновки

У роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу удосконалення управління радіочастотними ресурсами в сегментованій мережі радіодоступу 5G в умовах обмеженості ресурсу NR-комірки та конфліктних вимог різних мережевих сегментів.

Показано, що хоча стандарти 3GPP створюють архітектурну основу для slice-aware функціонування NG-RAN, проблема безпосереднього адаптивного розподілу RB між сегментами залишається відкритою і потребує окремого наукового опрацювання. Недостатня дослідженість питання пояснюється тим, що більшість відомих підходів або зосереджені на сигнально-архітектурній підтримці сегментування, або орієнтовані на локальні правила планування без повного врахування сегмента як об'єкта оптимізації.

Запропоновано удосконалений адаптивний багаторівневий метод управління радіочастотними ресурсами в сегментованій RAN, який поєднує групове керування кількістю UE у стані RRC_CONNECTED та адаптивний багатокритеріальний розподіл ресурсних блоків між сегментами. Особливістю методу є одночасне врахування попиту сегментів на ресурс, мінімальних гарантій обслуговування, пріоритетів QoS, міжсегментної ізоляції, ефективності використання спектра, стабільності рішень і часових обмежень на швидкість адаптації.

Результати модельного дослідження підтвердили ефективність запропонованого підходу. Порівняно зі статичним резервуванням і QoS-only плануванням він забезпечив вищий інтегральний рівень виконання SLA, краще балансування між сегментами та зменшену інтенсивність переналаштування ресурсів за збереження високої спектральної ефективності.

До обмежень дослідження слід віднести модельний характер навантаження, використання однокоміркового сценарію та потребу в окремому налаштуванні вагових коефіцієнтів багатокритеріальної оптимізації. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні методу на багатокімркові сценарії, інтеграції з near-RT RIC та non-RT RIC у O-RAN, використанні прогнозних моделей трафіку та дослідженні конфліктів між кількома xApp/gApp-рішеннями у спільному середовищі з урахуванням нарізки мережі.

Список використаних джерел:

1. System architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 version 17.5.0 Release 17). ETSI TS 123 501 V17.5.0. Sophia Antipolis: ETSI, 2022. 570 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123500_123599/123501/17.05.00_60/ts_123501v170500p.pdf
2. NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2 (3GPP TS 38.300 version 17.0.0 Release 17). ETSI TS 138 300 V17.0.0. Sophia Antipolis: ETSI, 2022. 207p URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/17.00.00_60/ts_138300v170000p.pdf
3. Foukas X., Patounas G., Elmokashfi A., Marina M. K. Network Slicing in 5G: Survey and Challenges. IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, no. 5. P. 94–100. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600951.
4. Firouzi R., Rahmani R. Delay-sensitive resource allocation for IoT systems in 5G O-RAN networks. Internet of Things. 2024. Vol. 26. Art. 101131. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101131.
5. Максимюк Т. А., Шубин Б. П., Мисаковець Д. О., Андрущак В. С., Думич С. С. Метод адаптивного логічного розділення мережі 5G на основі глибокого навчання. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2020. Т. 31 (70), № 5. С. 36–42. DOI: 10.32838/2663-5941/2020.5/07. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/5_2020/9.pdf

Автор статті

Горохов Олександр – аспірант, старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.
ORCID: 0000-0002-5053-3820

Author of the article

Horokhov Oleksandr – postgraduate, senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.
ORCID: 0000-0002-5053-3820

Надійшла до редакції: 19.03.2026

Прийнята до друку: 23.03.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Горохов О.С.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>