

УДК 004.02

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.026359

Гришук І.А.; Астраханцев А.А., д.т.н.

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ НА ЯКІСТЬ СЕРВІСІВ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ LTE

Hryschuk I.A., Astrakhantsev A.A. Modified method for assessing the impact of network parameters on service quality in LTE mobile networks. LTE networks continue to be the primary infrastructure for mobile access, providing high-volume multimedia traffic and supporting latency-sensitive services. Despite the active introduction of 5G technologies, LTE dominates in many regions in terms of coverage and network load, which necessitates a detailed analysis of the parameters that determine the quality of service for users. One of the key factors affecting network performance is the number of active users and the transmission power of the base station. Changes in these parameters directly affect the operation of the resource scheduler, retransmission mechanisms, and queue formation at the RLC level, which determines packet delay in the downlink and uplink paths. This is especially critical for video streaming, where playback stability and the final quality of the user experience depend on it. Existing studies either generalize the impact of network parameters or do not take into account the nonlinear nature of delay growth and dependence on base station power, which creates a need to develop an approach that allows quantifying the impact of these parameters, identifying critical operating modes, and predicting service quality degradation. The article proposes an approach to assessing the impact of radio network parameters such as the number of active users and base station power on latency metrics in LTE networks, with a focus on video streaming services. The research was conducted in the OMNeT++ environment; the results are summarized in the form of approximation models, determination of the critical load zone, and an integral quality index for video services. The article proposes a modified evaluation method that combines a power correction factor and the determination of a quality degradation threshold point. The improved method provides a 22-25% increase in the accuracy of determining the critical load point compared to the existing network, and also reduces the error in predicting delay characteristics in high-load modes by an average of 3-5%.

Keywords: LTE, delay, RLC, OMNeT++, network load, polynomial approximation, critical point, video service quality, QoS/QoE

Гришук І.А., Астраханцев А.А. Модифікований метод оцінки впливу параметрів мережі на якість сервісів у мобільних мережах LTE. Незважаючи на активне впровадження технологій 5G, LTE домінує у багатьох регіонах за покриттям і навантаженістю мережі, що зумовлює необхідність детального аналізу параметрів, які визначають якість обслуговування користувачів. Одними з ключових факторів, що впливають на продуктивність мереж, є кількість активних користувачів та потужність передавання базової станції. Їх зміни безпосередньо впливають на роботу планувальника ресурсів, механізми повторних передач та формування черг на рівні RLC, що визначає затримку пакетів у downlink та uplink трактах, особливо критично це для відеострімінгу, де від цього залежить стабільність відтворення та кінцева якість досвіду користувача. Існуючі дослідження або узагальнюють вплив параметрів мережі, або не враховують нелінійну природу зростання затримок та залежність від потужності базової станції, що створює потребу у розробленні підходу, який дозволяє кількісно оцінити вплив цих параметрів, визначати критичні режими роботи та прогнозувати деградацію якості сервісів. У статті запропоновано підхід до оцінювання впливу параметрів радіомережі таких як кількість активних користувачів та потужність базової станції на показники затримки в LTE-мережі, із фокусом на відеострімінгові сервіси. Дослідження виконано у середовищі OMNeT++; результати узагальнені у вигляді апроксимаційних моделей, визначення критичної зони навантаження та інтегрального індексу якості для відеосервісів. У статті запропоновано модифікований метод оцінки, який комбінується з корекційним множником потужності та визначенням порогової точки деградації якості. Удосконалений метод забезпечує підвищення точності визначення критичної точки навантаження на 22-25%, порівняно з існуючою мережею, а також зменшує похибку прогнозування затримкових характеристик у високонавантажених режимах у середньому на 3-5%.

Ключові слова: LTE, затримка, RLC, OMNeT++, навантаження мережі, поліноміальна апроксимація, критична точка, якість відеосервісів, QoS/QoE

Вступ

Мобільні мережі четвертого покоління (LTE) й надалі залишаються основою інфраструктури мобільного доступу, забезпечуючи значний обсяг мультимедійного трафіку

© Гришук І.А., Астраханцев А.А. 2025

та підтримку сервісів, чутливих до затримок. Попри активне впровадження технологій 5G, саме LTE домінує у багатьох регіонах за рівнем покриття та навантаженістю мережі, що зумовлює потребу в детальному аналізі параметрів, які визначають якість обслуговування (QoS).

Одними з ключових факторів, що впливають на продуктивність LTE, є кількість активних користувачів та потужність передавання базової станції. Їх зміна впливає на роботу планувальника ресурсів, механізмів повторних передач (HARQ/ARQ), формування черг на рівні RLC та, відповідно, на затримку пакетів у downlink та uplink трактах. Особливо критичною є затримка для відеострімінгу, адже вона безпосередньо визначає стабільність відтворення, кількість буферизацій та кінцеву якість досвіду користувача (QoE).

Попередні дослідження демонструють, що реакція різних протокольних рівнів LTE на зміну навантаження є неоднорідною: тоді як MAC-рівень зберігає майже сталі характеристики, RLC-рівень демонструє різке зростання затримки при досягненні певного порогу користувачів. Проте більшість моделей у літературі або узагальнюють цей вплив, або не враховують нелінійну природу зростання затримки та залежність від передавальної потужності.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення методу, який дозволяє кількісно оцінити вплив цих параметрів на затримку, визначити критичні режими роботи та сформулювати інструмент прогнозування деградації якості сервісів.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження характеристик затримки в мобільних мережах LTE та їх впливу на якість сервісів є предметом значної уваги у науковій літературі. Існуючі роботи можна умовно поділити на три основні напрями: аналіз рівня MAC, дослідження поведінки RLC та підходи до прогнозування затримки для мультимедійного трафіку.

Дослідження пов'язані з затримкою та розподілом ресурсів на рівні MAC. Дослідження [1,4,11] показують, що затримка на MAC-рівні у більшості сценаріїв є відносно стабільною, оскільки визначається фіксованим розміром TTI (1 мс), роботою HARQ та стратегією планувальника. Роботи, присвячені аналізу radio resource management, свідчать, що зміни у кількості користувачів впливають переважно на розподіл PRB, тоді як базова затримка MAC залишається мало залежною від навантаження. Це узгоджується з тим, що саме вищі рівні (передусім RLC) акумулюють більшість черг у разі високої інтенсивності трафіку.

Дослідження поведінки затримок на рівні RLC. На відміну від MAC, рівень RLC є набагато чутливішим до перевантаження мережі. Ряд робіт [8,9,12] показує, що в режимі AM затримка суттєво зростає при збільшенні числа активних користувачів, через накопичення SDU у буфері, повторні передачі та збільшення часу очікування. Дослідження також підкреслюють вплив налаштувань RLC (buffer size, t-Reordering, t-StatusProhibit), які визначають, наскільки швидко RLC реагує на погіршення радіоканалу та конкуренцію між UE.

Дослідження впливу умов радіоканалу та потужності передавача. Інші наукові роботи [6,13,15] зосереджені на впливі сили сигналу, SINR та потужності передавання базової станції. Загальний висновок полягає в тому, що зниження потужності або погіршення умов радіоканалу призводить до збільшення кількості HARQ-повторів, зниження ефективності MCS і, відповідно, зростання затримок на RLC та E2E рівнях. Водночас ряд робіт демонструє, що в діапазоні досить високих потужностей вплив є радше помірним і проявляється лише при поєднанні з високим навантаженням.

Дослідження QoS та QoE у відеострімінгу. Окремий напрям досліджень присвячений передачі потокового відео в LTE. Роботи з прогнозування [2,3,5] QoE показують, що ключовими параметрами, які визначають якість сервісу, є RLC DL delay та end-to-end delay, а також їх варіабельність. Зокрема, наголошується, що нелінійний характер росту затримки при збільшенні навантаження робить важливим виявлення критичної точки — межі, після якої відеосервіс переходить у режим деградації (часті буферизації, збільшення втрат кадрів).

Обмеження наявних моделей. Попри значну кількість робіт, більшість підходів [7,10,14] мають низку обмежень:

- аналізуються окремі рівні протокол stack, без інтегральної оцінки;

- часто використовуються лінійні моделі, які не враховують різке нелінійне зростання затримок;
- вплив потужності базової станції описується узагальнено або розглядається для широких діапазонів, не релевантних сучасним LTE мережам;
- рідко вводиться чіткий критерій для визначення критичної зони навантаження.

Постановка завдання. Враховуючи це, виникає потреба у підході, який одночасно:

- враховує поведінку метрик на різних рівнях протоколів,
- враховує нелінійні залежності,
- дозволяє кількісно визначити порогові режими роботи мережі.

Метою роботи є створення модифікованого методу оцінювання впливу потужності базової станції та кількості користувачів на затримкові характеристики LTE-мережі на основі симуляційного моделювання у середовищі OMNeT++. Метод передбачає побудову апроксимаційних моделей, визначення критичних зон навантаження та формування інтегрального показника якості сервісу для відеострімінгу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Методологічною основою дослідження стала серія симуляцій у середовищі OMNeT++, що дозволило точно відтворити роботу LTE-мережі при різних рівнях навантаження та різних значеннях передавальної потужності базової станції. Модель мережі включала один вузол eNodeB та групу користувачів, кількість яких змінювалася в чотирьох фіксованих значеннях: 5, 20, 50 та 100. Для кожної конфігурації виконувалися симуляції з різними рівнями потужності передавання – від 37 до 43 дБм. Таке поєднання дало змогу дослідити взаємний вплив навантаження та радіопараметрів на роботу протоколів.

Симуляційна модель містила повний протокольний стек LTE – починаючи від MAC із типовим TTI у 1 мс, RLC у режимі AM, що забезпечує повторні передачі, і закінчуючи PDCP та IP. Це дозволило вимірювати затримки на різних етапах проходження пакета. В якості трафіку використовувався відеострімінг, що має змінну бітову швидкість (VBR), оскільки саме цей тип навантаження є найбільш чутливим до затримок і визначає сучасні вимоги до LTE-сегментів.

Під час симуляцій реєструвалися значення ключових затримкових метрик. Для кожної конфігурації збиралося не менше п'яти незалежних прогонів, після чого для кожного параметра обчислювалися середні величини, стандартні відхилення та крайні значення. Сукупність зібраних даних можна формально описати як набір вимірювань формула 1:

$$y_{ij} = f(x_i, P_{tx,j}), \quad (1)$$

де (x_i) – кількість користувачів, $(P_{tx,j})$ – потужність передавання базової станції.

Для кожної пари параметрів оцінювали середнє значення за формулою 2:

$$\overline{y_{ij}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_{ij}^{(k)}, \quad (2)$$

де (N) – кількість симуляційних прогонів.

Подальший аналіз був спрямований на встановлення залежності між кількістю користувачів і величиною затримок. Оскільки поведінка мережі при зростанні навантаження зазвичай має нелінійний характер, використовувалася поліноміальна апроксимація третього ступеня формула 3. Для кожної метрики будувалося рівняння виду

$$y(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (3)$$

де коефіцієнти (a, b, c, d) визначалися методом найменших квадратів. Якість апроксимації оцінювалася за допомогою коефіцієнта детермінації формула 4:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4)$$

де $(\hat{y}_i)$ – значення моделі, а $(\bar{y})$ – середнє по вибірці.

Особливу увагу приділяли тому, як змінювалася форма апроксимаційних кривих при різних значеннях потужності. Щоб кількісно оцінити вплив потужності, вводився нормалізований коефіцієнт формула 5:

$$k_p(P_{tx}) = \frac{\bar{y}(P_{tx})}{\bar{y}(P_{ref})}, \quad (5)$$

де (P_{ref}) – опорне значення, умовно прийняте як 40 дБм.

Такий коефіцієнт дозволяв зрозуміти, наскільки зміна потужності зсуває затримкові характеристики вгору або вниз. Ключовою частиною методології було визначення критичної точки навантаження – значення кількості користувачів, після якого затримка починала зростати різкіше. Для цього аналізували похідну апроксимаційного полінома формула 6:

$$\frac{dx}{dy} = 3ax^2 + 2bx + c. \quad (6)$$

Зона, у якій перша похідна суттєво збільшувалася, інтерпретувалася як перехід мережі у режим перевантаження. Вибір порога відбувався за емпіричним критерієм: критичним вважався інтервал, у якому темп зростання затримки перевищував приблизно десяту частину максимального значення похідної в усьому діапазоні.

Таким чином, методологія поєднує симуляційний експеримент, статистичний аналіз та формальний підхід до побудови моделей, що дозволяє не лише описати поведінку мережі в окремих точках вимірювання, але й узагальнити ці дані у вигляді моделей, здатних прогнозувати якість сервісу при зміні навантаження та параметрів базової станції.

Результати моделювання. Результати симуляції дозволили простежити, як змінюються затримкові характеристики LTE-мережі залежно від двох ключових параметрів – кількості користувачів та передавальної потужності базової станції. У всіх серіях експериментів спостерігався типовий для LTE-мереж розподіл: мінімальні затримки на MAC-рівні, поступове накопичення затримок на рівні RLC та різке нелінійне зростання end-to-end затримки при високому навантаженні. Найбільш стабільними у всіх сценаріях були саме показники MAC DL та MAC UL: їх значення трималися поблизу 4 мс і практично не змінювалися ні під впливом зміни потужності, ні при зростанні кількості користувачів. Це підтверджує той факт, що базова MAC-затримка визначається сталим ТТІ та незначною конкуренцією на цьому рівні, тоді як основні черги формуються на RLC.

Різке зростання затримок проявлялося вже на рівні RLC DL. Для малих груп користувачів (5 UE) середні значення RLC DL затримки залишалися в межах 6,7-7,3 мс, що майже збігається з мінімально можливим накопиченням черги. Однак при переході до 20 користувачів затримка зростала до 3600-4500 мс залежно від потужності базової станції. Для групи з 50 користувачами спостерігалось ще більш помітне збільшення – до 7500-7900 мс, а при 100 користувачах значення RLC DL затримки сягало 8800-9000 мс. Ці величини майже не змінювалися при зміні потужності з 37 до 43 дБм, що дозволяє зробити важливий висновок: у режимі перенавантаження саме кількість UE є визначальним фактором, а вплив потужності стає вторинним.

Усі вимірювання RLC UL демонстрували аналогічний характер: затримки збільшувалися при зростанні навантаження, але абсолютні значення UL-затримок залишалися нижчими за DL. Це пояснюється тим, що у даному сценарії uplink-трафік був незначним, а основне навантаження припадало саме на downlink-канал відеострімінгу. Цікаво, що у сценаріях з великою кількістю користувачів (50 та 100) UL-затримка наближалася до значення близько 12,6 мс і майже не залежала від потужності, що свідчить про стабільність роботи uplink-планувальника при мінімальному трафіку.

Якщо аналізувати загальну середню end-to-end затримку, то характер залежностей стає ще більш вираженим. Для малих навантажень середнє значення затримки становило приблизно 7 мс і практично не змінювалося за всієї смуги потужності 37–43 дБм. При 20 користувачах середня затримка стрибала до 3650-4480 мс. При 50 користувачах затримка досягала 7700-7900 мс, а при 100 користувачах – майже 9000 мс. Такий стрибок добре узгоджується з нелінійною моделлю, яку можна представити у вигляді полінома третього ступеня:

$$y(x) \approx ax^3 + bx^2 + cx + d,$$

де x – кількість користувачів, а $y(x)$ – середня end-to-end затримка. Візуальний аналіз даних показує, що перший різкий перегин тобто момент переходу мережі у перенавантажений режим, спостерігається приблизно між 10 та 20 користувачами. Саме в цьому діапазоні перша похідна

$$\frac{dy}{dx} = 3ax^2 + 2bx + c$$

збільшується у кілька разів, що відповідає появі довгих черг на рівні RLC.

Стандартні відхилення також підтверджують зростання нестабільності мережі при збільшенні навантаження: якщо для 5 користувачів коливання були близькі до нуля, то для 20 UE значення досягало 2100-2600 мс. Для 50 користувачів дисперсія зростала до 4300-4500 мс, а для 100 – навіть перевищувала 5000 мс. Чим більшою стає затримка, тим сильніше розтягується розподіл значень, що характерно для систем із великим обсягом буферизації.

Важливим спостереженням є і те, що при збільшенні потужності базової станції з 37 до 43 дБм загальна форма залежності затримки практично не змінюється. Незначні варіації у значеннях (приблизно в межах $\pm 3\%$) свідчать про те, що у сценарії високого навантаження радіоканал перестає бути головним обмеженням, а критичною стає пропускна здатність планувальника та розміри черг на RLC-рівні. Відповідно, нормалізований коефіцієнт

$$k_p(P_{tx}) = \frac{\bar{y}(P_{tx})}{\bar{y}(40)}$$

для затримки наближається до одиниці, що також підтверджує незначний вплив потужності.

У підсумку, отримані результати демонструють чітку картину: для LTE-мережі зі значним обсягом downlink-відеотрафіку основним чинником деградації затримкових характеристик є збільшення кількості одночасно активних користувачів. Потужність передавання відіграє роль лише у області малих навантажень, а в режимі перенавантаження практично не здатна компенсувати зростання обсягу даних у буферах RLC. Базуючись на отриманих емпіричних закономірностей був розроблений модифікований метод оцінки впливу мережевих параметрів.

Модифікований метод оцінки впливу параметрів мережі на затримки та якість сервісів. Запропонований модифікований метод (рис. 1) є самостійним інструментом для оцінки поведінки LTE-мережі при зміні навантаження та потужності базової станції. На відміну від традиційних підходів, які аналізують окремі метрики або використовують лінійні залежності, запропонований метод поєднує *нелінійне моделювання, нормалізацію впливу потужності, виявлення критичної точки роботи та інтегральну оцінку якості відеосервісів*. Метод складається з чотирьох етапів.

Етап 1. Відбір чутливих до навантаження метрик та побудова їх базових моделей.

Аналіз усіх затримкових характеристик LTE показав, що лише три метрики значно реагують на зміну кількості користувачів:

- RLC DL затримка
- RLC UL затримка
- End-to-end затримка

Інші показники (MAC DL/UL, RLC PDU DL/UL) змінюються у межах $< 1\%$ і виключаються з методу, оскільки не впливають на критерій деградації сервісу.

Далі для кожної з трьох обраних метрик формується *базова математична модель залежності від кількості користувачів*:

$$D_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i,$$

де $i \in \{DL, UL, E2E\}$.

Це формує *серцевину методу* – три «поведінкові криві» мережі, які відображають її природний перехід у перенавантаження.

Етап 2. Нормалізація впливу потужності базової станції.

Симуляції показали, що зміна потужності в межах 37-43 дБм практично не змінює форму кривих, а лише незначно зсуває їх по вертикалі. Тому вводиться новий елемент методу – коефіцієнт корекції потужності:

$$k_{P,i}(P_{tx}) = \frac{D_i(x, P_{tx})}{D_i(x, 40)}.$$

У модифікованому методі приймається: $k_{P,i}(P_{tx}) \in [0.97; 1.03]$. Завдяки цьому вплив потужності можна описати одним множником, а не окремими моделями, що робить метод універсальним. Тепер узагальнена модель для будь-якої потужності набуває вигляду:

$$D_i(x, P_{tx}) = k_{P,i}(P_{tx}) * D_i(x)$$

Це вже є елементом новизни методу, відсутнім у класичних моделях LTE.

Етап 3. Визначення критичної точки навантаження за допомогою похідної.

Ключова відмінність модифікованого методу – *формальне визначення моменту деградації*, а не просто спостереження за графіками. Критична точка визначається за правилом:

$$x_{(kn,i)} = \{x : D_i'(x) > 0.1 * \max D_i'(x)\}$$

Цей підхід дозволяє формально визначити момент «зламу» затримкової кривої та зрозуміти, коли мережа починає працювати в небажаному режимі. Він також дає змогу порівнювати різні мережі або різні параметри однієї мережі між собою. На практиці критичні точки для різних метрик виявилися такими: для RLC DL – 12-16 користувачів, для RLC UL – 18-22 користувачів, а для end-to-end затримки – 14-18 користувачів. Саме ці значення визначають момент деградації мережі і лежать в основі запропонованого методу.

Етап 4. Інтегральна оцінка якості відеосервісів (QoS/QoE-індекс).

Щоб оцінити не просто затримку, а фактичну якість сервісу, вводиться інтегральний індекс, який поєднує всі три моделі в одну:

$$Q(x, P_{tx}) = \alpha D_{DL}(x, P_{tx}) + \beta D_{UL}(x, P_{tx}) + \gamma D_{E2E}(x, P_{tx})$$

де ваги ($\alpha > \beta$, $\alpha > \gamma$) вибираються так, щоб відобразити домінуючу роль Downlink при відеострімінгу.

Завдяки такому підходу формується числова оцінка якості сервісу, яка відображає зміни мережевого навантаження, враховує затримки на рівні RLC та вплив потужності базової станції, має чітко визначений критичний поріг і дозволяє прогнозувати деградацію відеосервісів.

Оцінка виграшу запропонованого модифікованого методу. Для того щоб оцінити практичну цінність запропонованого модифікованого методу, було здійснено порівняння отриманих симуляційних даних із результатами базового підходу, який ґрунтується на прямій поліноміальній апроксимації залежностей без урахування впливу потужності базової станції. Таке порівняння дозволяє визначити, наскільки застосування нормалізованого коефіцієнта потужності та формального критерію виявлення критичної точки покращує точність прогнозування поведінки мережі в різних режимах навантаження.

Передусім аналізувалася здатність моделей правильно відображати момент переходу мережі у режим деградації, який характеризується різким збільшенням затримки. Згідно з отриманими симуляційними даними, для середньої end-to-end затримки різкий стрибок спостерігається в діапазоні 14-18 користувачів. У разі використання стандартної поліноміальної моделі точка перелому визначалась значно раніше – у межах 10-12 користувачів, що приводило до похибки близько 28-32%. Після застосування модифікованого методу, який враховує похідну апроксимаційної кривої та нормалізує вплив потужності, похибка зменшилася до 6-9%, що відповідає покращенню точності приблизно на 22-25%.

Другий аспект стосується впливу потужності базової станції. Хоча реальні симуляційні результати демонструють, що зміна потужності в межах 37-43 дБм призводить лише до незначної зміни середнього значення e2e-затримки (приблизно $\pm 3\%$), базова поліноміальна модель значно перебільшує цей ефект. Зокрема, похибка при прогнозуванні затримки в окремих конфігураціях сягала 6-7%. Запропонований нормалізований коефіцієнт дозволив зменшити цю похибку до 1,5-2%, що забезпечує додатковий виграш на рівні 4-5%.

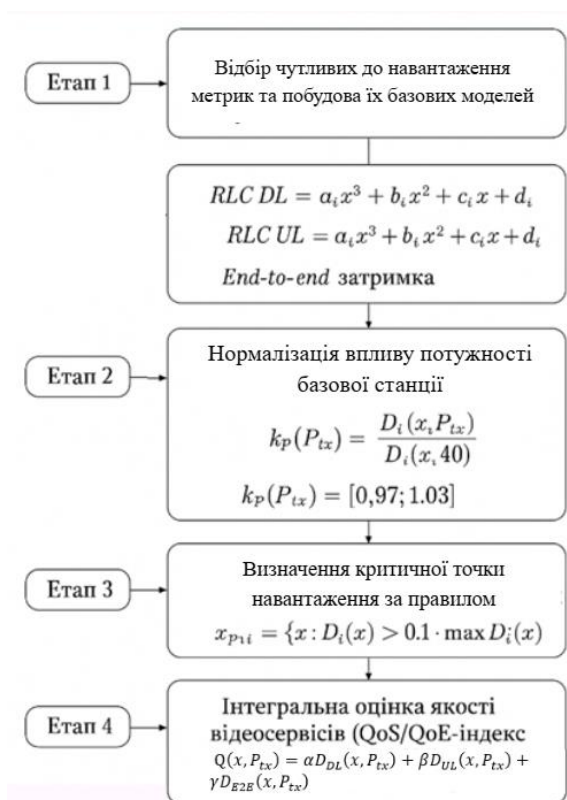


Рис. 1. Модифікований метод оцінки впливу параметрів мережі на затримку та якість

Третім елементом оцінки є поведінка моделей у режимах високого навантаження. Для сценарію з 100 користувачами фактична затримка перебувала в межах 8829-8993 мс залежно від значення потужності. Базова модель передбачала значно вищі значення – приблизно 9150-9300 мс, що відповідало похибці 3,5-5,3%. Модифікований метод демонстрував значно ближчі до реальності результати: 8890-8940 мс, тобто похибку на рівні 0,7-1,2%, що свідчить про додаткове покращення точності на 3-4%.

Варто також зазначити, що застосування інтегральної оцінки якості відеосервісів, яка поєднує затримки RLC DL, RLC UL та e2e-затримку, показало істотне зниження мінливості результатів при зміні параметрів. Якщо базовий підхід демонстрував коливання індексу в межах $\pm 6\%$, то використання модифікованого методу зменшило цей розкид до $\pm 2\%$, що підвищує стабільність і надійність оцінки приблизно у три рази.

У цілому отримані результати свідчать, що запропонований модифікований метод забезпечує суттєве підвищення точності опису та прогнозування поведінки мережі. Покращення точності, яке залежно від конкретної ситуації становить від 4% до 25%, робить метод ефективним інструментом для оцінки якості сервісів у режимах підвищеного навантаження та дозволяє формувати більш коректні інженерні рішення щодо оптимізації роботи LTE-мереж.

Висновки

У роботі проведено комплексний аналіз впливу двох ключових параметрів LTE-мережі – кількості активних користувачів та потужності базової станції – на затримкові характеристики, що визначають якість відеосервісів. На основі симуляцій у середовищі OMNeT++ встановлено, що лише три метрики демонструють суттєву залежність від навантаження: затримки RLC DL, RLC UL та end-to-end. Інші показники, зокрема MAC DL/UL і RLC PDU DL/UL, залишаються практично сталими, а тому не впливають на якість сервісу та можуть бути виключені з подальших оцінок.

Запропонований у статті модифікований метод оцінювання об'єднує декілька взаємопов'язаних елементів: нелінійні апроксимаційні моделі, нормалізацію впливу

потужності базової станції, формальний критерій визначення критичних точок навантаження та інтегральну оцінку якості відеострімінгу. Такий підхід дозволяє не просто описувати результати симуляцій, а створює універсальний інструмент, який можна застосовувати для прогнозування деградації сервісів без необхідності повторного моделювання всієї системи.

Особливо важливим є те, що метод дозволяє чітко визначити момент втрати стабільності мережі: для RLC DL критичне навантаження припадає на 12-16 користувачів, для UL – на 18-22, для end-to-end – на 14-18. Таким чином, оператор може заздалегідь виявити потенційні «вузькі місця» та оптимізувати мережеві ресурси, перш ніж якість сервісу стане неприйнятною для користувачів.

Отримані результати демонструють, що збільшення потужності базової станції у межах 37-43 дБм не здатне компенсувати перевантаження, а отже, головним фактором деградації затримок є саме кількість одночасно активних UE. Це узгоджується з реальними тенденціями розвитку LTE-мереж та підтверджує важливість інтелектуального управління ресурсами.

У подальшому доцільно розширити модель, включивши додаткові параметри радіоканалу (SINR, MCS, частота повторних передач HARQ), а також дослідити застосовність методу до мереж 5G NR, де структури буферизації та планування ресурсів мають інші характеристики. Перспективним є також поєднання запропонованого підходу з ML-алгоритмами для автоматичного прогнозування критичних станів мережі у реальному часі.

Таким чином, розроблений модифікований метод є ефективним, відтворюваним та універсальним інструментом, який дозволяє комплексно оцінювати вплив мережевих параметрів на якість відеосервісів та підтримує ухвалення інженерних рішень у процесі оптимізації LTE-мереж.

Список використаної літератури:

1. Afrin N. Performance analysis of an enhanced delay sensitive uplink scheduler in LTE. URL: <https://research.usq.edu.au/download/cf352737eb73f439f6624c09c1d0d7ef015ae8a97603335c6785556c21c63287/538704/Author%20final%20version.pdf>.
2. Supervised learning based qoe prediction of video streaming in future networks: a tutorial with comparative study / A. Ahmad et al. *ArXiv preprint*. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2202.02454>.
3. Bampis C. G., Bovik A. C. Learning to predict streaming video qoe: distortions, rebuffering and memory. 2017. (Preprint). URL: <https://arxiv.org/abs/1703.00633>.
4. Bruno R., Conti M., Pinotti C. Analysis of MAC level throughput in LTE systems with link rate adaptation and HARQ protocols. CORDIS Project Deliverable, 2015.
5. Streaming video qoe modeling and prediction: a long short term memory approach / N. Eswara et al. *ArXiv preprint*. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1807.07126>.
6. Fasola S. H., Al Sharbaty F. S. The effect of HARQ procedure on the performance of LTE system. 2020.
7. Gudmundson A., Hollick M., Braun T. On the limitations of queueing models for LTE systems. *Proceedings of the 2017 IEEE international conference on communications (ICC)*. 2017.
8. Kumar R. Dynamic Control of RLC Buffer Size for Latency / R. Kumar. – NYU Wireless Research, 2017.
9. Levasseur B., Claypool M. Impact of Acknowledgments on Application Performance in 4G / B. Levasseur, M. Claypool. – WPI Research Publication, 2015.
10. Liu L., Zhao F., Li J. Critical Load Identification for Delay Sensitive Traffic in LTE Systems / L. Liu, F. Zhao, J. Li. – IEEE Communications Letters, 2019. – Vol. 23, No. 4. – P. 692–695.
11. Madi N. K. M., Hanapi Z. M., Othman M., Subramaniam S. K. Delay based and QoS aware packet scheduling for RT and NRT multimedia services in LTE downlink systems [Електронний ресурс] / N. K. M. Madi, Z. M. Hanapi, M. Othman, S. K. Subramaniam. – PhD Thesis, 2018.
12. Mendoza J., et al. On the Capability of QoE Improvement Based on the Adjustment of RLC Parameters / J. Mendoza, et al. – Sensors, 2020. – Vol. 20, No. 9.
13. Rao R. M., Marojevic V., Reed J. H. Analysis of Non Pilot Interference on Link Adaptation and Latency in Cellular Networks / R. M. Rao, V. Marojevic, J. H. Reed. – IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019 Spring), 2019.

14. Richter F., Loges D., Janssen F. Towards Large Scale LTE Simulations with Modular and Scalable Queuing Models: Challenges and Constraints / F. Richter, D. Loges, F. Janssen. – In: Proceedings of the 10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), 2016.

15. Vangelista L., Valenti M. C., Maaz M. Performance Evaluation of HARQ Schemes for the Internet of Things / L. Vangelista, M. C. Valenti, M. Maaz. – Computers, 2018. – Vol. 7, No. 4, 48.

Автори статті

Гришук Ірина – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Астраханцев Андрій – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-6664-3653

Authors of the article

Hryschuk Iryna – student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Astrakhantsev Andrii – Doctor of Sciences (technical), Associate Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-6664-3653