

УДК 004.8:65.05:681.5

DOI: 10.31673/2786-8362.2024.025073

Брезіцький С.М., Герасимчук В.С.

## ІНТЕГРАЛЬНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ПРОДУКТИВНОСТІ ПАКЕТНИХ МЕРЕЖ: АНАЛІЗ ТА ФОРМУВАННЯ

**Brezitskyi S.M., Herasymchuk V.S. Integral methods for evaluating the performance of packet-switched networks: analysis and formulation.** The article discusses integral methods for evaluating the performance of packet-switched networks, which ensure stability and service efficiency under multi-service traffic conditions. In modern telecommunications networks, ensuring Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) is critically important as they help achieve high user satisfaction and ensure reliable communication. Standard approaches for assessing network performance typically rely on individual metrics, such as latency, packet loss, and jitter, but they do not always provide a comprehensive understanding of the network's overall state. The integral quality metrics proposed in the study allow the combination of different parameters to produce a generalized performance assessment that accounts for short-term fluctuations under high loads and changing traffic.

The goal of the study is to develop integral metrics that enable network operators to improve performance monitoring and service quality in multi-service networks. The calculation of the integral connection quality metric is described, based on comparing the area where the parameter exceeds a threshold value with the maximum possible area. The formulas for the integral metric and its applications in comparing different communication channels are presented. The impact of nonlinear effects in packet traffic transmission, particularly the exponential growth of indicator values with performance degradation, is considered. A formula for the integral metric is proposed, which incorporates an exponential evaluation function for a more accurate performance assessment. Using this approach, the developed method allows for comparative analysis of network connection performance based on generalized quality metrics that reflect network behavior under mixed traffic conditions.

The developed methods and metrics can form the basis for improving network management systems in dynamic load conditions and heterogeneous user requirements. This not only ensures high service quality but also increases user satisfaction under various network operating conditions.

**Keywords:** network performance, Quality of Service (QoS), Quality of Experience (QoE), bandwidth, integral assessment, single-threshold assessment, multi-threshold assessment, integral quality metric

**Брезіцький С.М., Герасимчук В.С. Інтегральні методи оцінки продуктивності пакетних мереж: аналіз та формування.** У статті розглянуто інтегральні методи оцінки якості роботи мереж з комутацією пакетів, які забезпечують стабільність та ефективність обслуговування в умовах мультисервісного трафіку. У сучасних телекомунікаційних мережах критично важливим є забезпечення якості обслуговування (QoS) та якості сприйняття (QoE), що дозволяють досягти високого рівня задоволеності користувачів та забезпечують надійність зв'язку. Стандартні підходи до оцінки мережевої продуктивності зазвичай базуються на окремих показниках, таких як затримка, втрати пакетів і джитер, проте вони не завжди дозволяють отримати повне уявлення про загальний стан мережі. Інтегральні показники якості, що пропонуються у дослідженні, дають можливість об'єднати різні параметри для отримання узагальненої оцінки продуктивності, яка враховує короткочасні зміни в умовах високих навантажень і змінного трафіку.

Метою дослідження є розробка інтегральних показників, які дозволять мережевим операторам покращити моніторинг продуктивності та якість обслуговування в мультисервісних мережах.

Описано розрахунок інтегрального показника якості з'єднання, що базується на порівнянні площі, де параметр перевищує порогове значення, з максимально можливою площею. Представлено формули для інтегрального показника та варіанти його застосування при порівнянні різних каналів зв'язку. Розглянуто вплив нелінійних ефектів у передачі пакетного трафіку, зокрема експоненційного зростання значень показників при погіршенні продуктивності. Запропоновано формулу для інтегрального показника, що враховує експоненційну функцію оцінки для точнішої оцінки продуктивності. З урахуванням такого підходу розроблений метод дозволяє проводити порівняльний аналіз продуктивності мережевих з'єднань на основі узагальнених показників якості, що відображають поведінку мережі за умов змішаних типів трафіку.

Розроблені методи та показники можуть бути основою для покращення систем управління мережею в умовах мінливих навантажень та неоднорідних вимог користувачів. Це дозволяє не лише забезпечувати високу якість обслуговування, але й підвищити задоволеність користувачів у різноманітних умовах роботи мережі.

**Ключові слова:** продуктивність мережі, якість обслуговування (QoS), якість сприйняття (QoE), пропускна здатність, інтегральна оцінка, однопорогова оцінка, багатопорогова оцінка, інтегральний показник якості

## Вступ

Мережеві з'єднання є основою сучасних інформаційно-комунікаційних систем. Їх продуктивність напряму впливає на якість обслуговування (QoS) та задоволеність користувачів [1]. Продуктивність можна визначити як здатність мережі забезпечувати задану якість послуг навіть за умов пікового навантаження або в умовах різноманітного трафіку [2]. Для таких послуг, як VoIP (голосовий трафік), відеоконференції або потокове відео, критичними параметрами є затримка, джитер, втрати пакетів і пропускна здатність [3].

Зростаюча різноманітність типів трафіку створює нові виклики щодо оцінки продуктивності мереж. Традиційні методи оцінки, що базуються на окремих нормативних показниках, дозволяють оцінювати мережеві з'єднання лише для певного типу навантаження, але не враховують змішаних типів трафіку. Наприклад, вимоги до передачі голосу реального часу є жорсткішими, ніж для потокового відео, але обидва види трафіку можуть проходити через одне й те саме з'єднання. Це ускладнює оцінку продуктивності. Потрібно адаптивне рішення, яке враховувало б специфіку кожного виду трафіку і визначало допустимі діапазони для кожного показника продуктивності.

Проблематика оцінки продуктивності зростає з розвитком технологій IoT, де вимоги до надійності і швидкості передачі даних стають ще більш критичними [4]. Для вирішення цієї проблеми необхідно створити інтегральний метод оцінки, що дозволить ефективно визначати продуктивність мережі та адаптуватися до змін в навантаженні.

**Аналіз останніх досліджень.** Сучасні дослідження у сфері забезпечення якості обслуговування (QoS) та якості сприйняття (QoE) в мережах з комутацією пакетів зосереджені на оцінці показників продуктивності мереж та їх впливу на якість наданих послуг. Базові підходи в цій галузі, висвітлені в численних роботах, зокрема, [5] класифікують та визначають базові метрики QoS для IP-мереж, такі як затримка, джитер, втрати пакетів. Проте, фокусування на окремих параметрах не завжди забезпечує повне відображення загальної продуктивності мережі, особливо в умовах різноманітного трафіку.

Дослідження у сфері QoE довели, що суб'єктивне сприйняття якості користувачем є критичним для оцінки якості обслуговування, адже воно напряму впливає на задоволеність клієнтів послугами зв'язку. Наприклад [6] показали, що QoE базується на сприйнятті користувачами різних аспектів послуг, що вимагає інтегрального підходу до аналізу якості. Однак визначення QoE для мультисервісних мереж залишається складним завданням, адже воно залежить від численних факторів, включаючи характер трафіку і умови мережевого середовища.

Робота [7] деталізує концепції QoE, підкреслюючи, що ефективна оцінка QoE вимагає комплексного підходу до взаємозв'язку між технічними параметрами QoS та суб'єктивним сприйняттям користувача. Їх дослідження демонструє важливість кореляції між QoS та QoE, вказуючи на необхідність інтеграції показників якості для створення повнішої картини продуктивності мережі.

Інтегральні методи оцінки якості надання послуг, такі як узагальнені метрики та багатопорогові оцінки, обговорюються в дослідженні [8]. Автори зазначають, що використання кількох параметрів для інтегральної оцінки дозволяє краще контролювати якість обслуговування, особливо для мультимедійного трафіку. Висновки дослідження підтверджують, що застосування інтегральних показників QoS, які враховують кореляцію між метриками, підвищує точність оцінки QoE для кінцевих користувачів.

Ранні дослідження на цю тему [9] розглядали проблему забезпечення якості у статичних умовах IP-мереж. Їхній підхід до інтегрованих послуг передбачав підтримку якості обслуговування за рахунок виділення ресурсів для певних потоків, що обмежувало застосування цих моделей в умовах сучасних динамічних мереж. Це спонукало до пошуку нових методів, здатних враховувати коливання продуктивності за умов непередбачуваного навантаження, що є особливо актуальним для мультисервісних середовищ.

Таким чином, хоча сучасні дослідження значно просунулися у визначенні та вимірюванні QoS і QoE, залишаються невирішеними питання формування комплексних інтегральних показників якості для різних класів трафіку. Особливої уваги потребує створення методів, які

враховують короточасні відхилення у продуктивності та їхній вплив на загальну якість обслуговування в умовах мультисервісних мереж, що стане основою для подальшого вдосконалення управління мережею та задоволення вимог користувачів.

**Метою роботи** є розробка інтегрального методу оцінки продуктивності мережевих з'єднань, який дозволяє об'єднати ключові показники якості у єдиний інтегральний показник і підтримувати адаптивність до різних класів трафіку.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- розроблено одно- та багатопорогові інтегральні критерії, що враховують специфіку різних видів трафіку.
- введено поняття «зони деградації» як інструменту управління продуктивністю в умовах змінних навантажень.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Для оцінки якості роботи мережевого з'єднання на заданому часовому інтервалі для формування інтегральної оцінки використовується набір значень нормативних показників мережевої продуктивності (NP), отриманих протягом цього періоду. На основі цих значень розробляється метод розрахунку підсумкового інтегрального показника NP.

Передбачається, що оцінюваний параметр роботи мережевого з'єднання  $P$  в межах заданого часового інтервалу з тривалістю  $T_m$  має діапазон значень від 0 до  $P_{max}$  та одне порогове значення  $P_{thres}$ . Якщо параметр знаходиться в межах  $[0, P_{thres}]$ , то мережеве з'єднання забезпечує належну якість передачі пакетного трафіку. У разі значень параметра в діапазоні  $(P_{thres}, P_{max})$ , мережа не забезпечує належної якості передачі, і спостерігається поступова деградація якості від 100% (повна підтримка всіх типів трафіку) при значенні  $P_{thres}$  до 0% (повне припинення надання сервісів) при значенні  $P_{max}$ . Загальний час, коли значення параметра перевищує порогове значення  $P_{thres}$  за час оцінки  $T_m$ , визначається як сума інтервалів часу  $dt$ , коли параметр перевищує поріг  $P_{thres}$ .

$$T_{thres} = \sum_{i=1}^n dt(i) \quad (1)$$

де  $n$  – кількість часових інтервалів перевищення порогового значення за час  $T_m$ ,  
 $dt$  – тривалість інтервалу часу для розрахунку одиничного значення параметра.

Значення інтегрального показника якості  $Q_p$  відображає ступінь погіршення якості надання послуги або сервісу у щодо оцінюваного параметра і визначається як відношення площі під кривою зміни значень параметра, що перевищують рівень  $P_{thres}$  (області  $S_{par}$  на рис.1) до загальної площі всіх можливих значень параметра вище цього рівня (область  $S_{thres}$  на рис. 1) за час проведення оцінки.

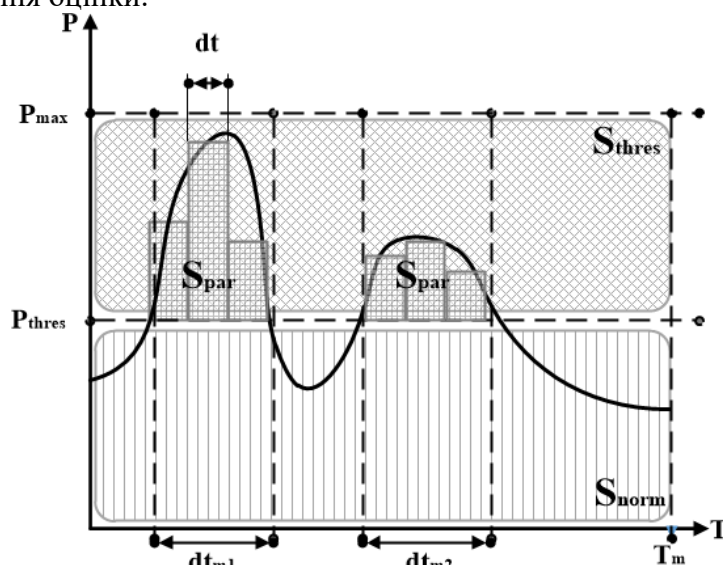


Рис. 1. Формування оцінки параметра з урахуванням профілю графіка значень параметра за час проведення оцінки

Площа кожної області  $S_{par}$  формується як сукупність елементарних площ, які обчислюються шляхом множення величини перевищення параметром встановленого порогового значення на тривалість одиничного інтервалу часу, що застосовується для обчислення одиничного значення оцінюваного параметра

$$S_{par} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres}(t))dt \quad (2)$$

При цьому значення оцінюваного параметра  $P(t)$  в (2) визначається наступним чином

$$\begin{cases} P(t), \text{ при } P_{thres} < P(t) \leq P_{max}, \\ P_{thres} \text{ при } P(t) \leq P_{thres}, \\ P_{max} \text{ при } P_{max} < P(t) \end{cases}$$

Загальна площа  $S_{thres}$  визначається наступною формулою

$$S_{thres} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres}(t))dt \quad (3)$$

За фізичним змістом значення  $S_{thres}$  відображає максимальне погіршення продуктивності мережевого з'єднання за час  $T_m$  по оцінюваному параметру, в той час як значення  $S_{par}$  показує фактичне погіршення продуктивності з'єднання по оцінюваному параметру за час  $T_m$ . Загальна формула для визначення інтегрального показника, що оцінює ступінь погіршення якості роботи мережевого з'єднання за оцінюваним параметром на інтервалі часу проведення оцінки, з урахуванням (2) та (3) має наступний загальний вигляд

$$Q_p = \left(1 - \frac{S_{par}}{S_{thres}}\right) * 100\% \quad (4)$$

Якщо протягом всього інтервалу часу оцінки значення оцінюваного параметра не перевищують порогове значення, то інтегральний показник буде рівним 100%.

Оскільки площа під графіком зміни значень параметра з малою амплітудою і великою тривалістю може бути такою ж, як і площа під графіком зміни значень параметра з великою амплітудою та малою тривалістю, необхідний додатковий критерій для розрізнення значень  $Q_p$ , отриманих у таких випадках. Таким критерієм є загальна тривалість часу, протягом якого значення параметра перевищують порогове значення протягом оцінюваного періоду. Оскільки для інтервалу найбільшої інтенсивності навантаження, що триває три години, використовується поняття періоду найбільшої навантаженості (ПНН), пропонується називати сумарну тривалість часу, протягом якого значення параметра перевищують порогове значення за час оцінки  $T_{thres}$ , часом найбільшого навантаження (ЧНН). Значення ЧНН може виражатися в абсолютних і відносних значеннях. Відносне значення ЧНН розраховується відносно тривалості часу проведення оцінки

$$T_{nno} = \frac{T_{thres}}{T_m} \quad (5)$$

Відносна величина ЧНН використовується для «вирівнювання» інтервалів часу під час оцінювання при порівняльному аналізі каналів зв'язку, що мають різну тривалість роботи (забезпечення надання послуг зв'язку) на загальному інтервалі часу оцінки. Наприклад, це може бути викликано розкладом роботи споживача послуг зв'язку. Зв'язування значень  $Q_p$  з  $T_{thres}$  (1) або  $Q_p$  з  $T_{nno}$  (5) дозволяє здійснювати порівняльний аналіз якості роботи мережевих з'єднань за обсягом переданого трафіку або на інтервалі часу певної тривалості. За потреби можливо встановити порогове значення для ЧНН на періоді оцінки. Наприклад, в угодах щодо рівня якості надання послуг зв'язку (SLA) часто зазначається максимально допустима тривалість погіршення якості обслуговування у вигляді абсолютних чи відносних показників. Таким чином, інтегральна оцінка якості функціонування мережевого з'єднання може слугувати індикатором відповідності умовам SLA.

Аналогічна оцінка якості роботи мережевих з'єднань може виконуватися з урахуванням зниження значень параметра при встановленні порогового значення за мінімальним значенням

оцінюваного параметра (це «дзеркальний» метод розрахунку інтегрального показника, описаний вище).

Оскільки інтегральна оцінка якості роботи мережевого з'єднання є функцією, що залежить від значень двох параметрів (величини перевищення порогового значення і тривалості часу перевищення порогового значення), значення інтегральної оцінки являє собою двовимірну функцію, а можливі варіанти значень функції оцінки утворюють у просторі певну поверхню [10], зображену на рис. 2. Обмеження значень параметрів функції оцінки утворюють граничну площину у просторі. Точка, в якій гранична площина стикається з поверхнею значень функції оцінки, слід вважати критичною.

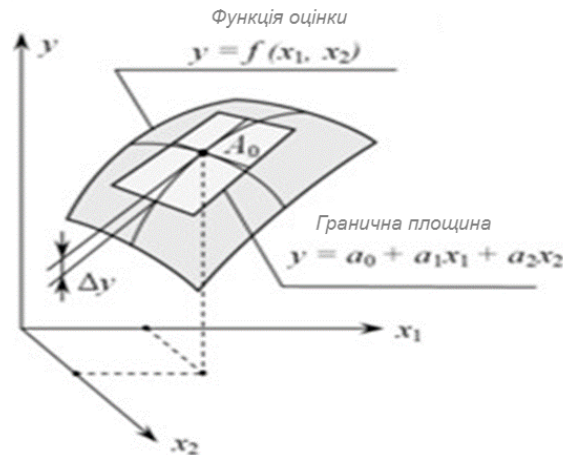


Рис. 2. - Функція оцінки і гранична площина

### Врахування особливостей нелінійної роботи систем передачі пакетного трафіку.

Системи зв'язку, що здійснюють передачу пакетного трафіку, на початкових етапах характеризуються слабкою реакцією на погіршення показників NP. Це обумовлено наявністю черг/буферів для тимчасового зберігання даних і специфікою роботи протоколів пакетної передачі. Проте при подальшому погіршенні показників NP настає момент, коли значення цих показників починають погіршуватися різко, за експоненціальною залежністю, особливо стосовно таких параметрів, як затримка, джитер і рівень втрат при передачі пакетів між відправником і отримувачем [11, 12]. Дана особливість мереж з комутацією пакетів описана у нормативній документації галузі зв'язку [13] та візуалізована на рис. 3

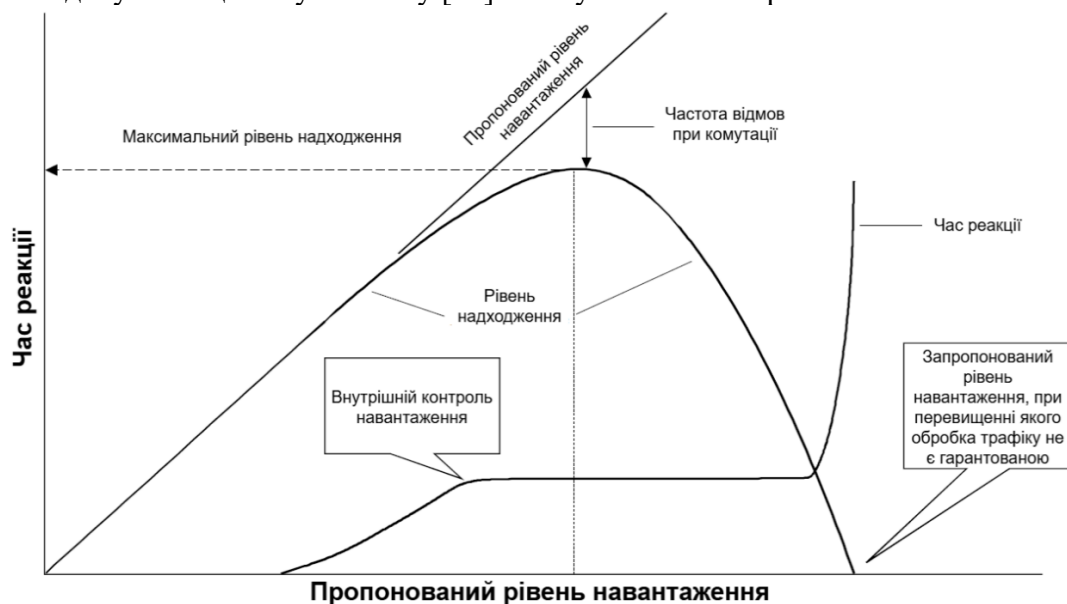


Рис. 3. Зміна показників якості пакетної мережі залежно від рівня навантаження мережевого пристрою

У сучасних мережах з комутацією пакетів політики обробки трафіку зазвичай використовують нелінійні алгоритми для обробки потоків пакетів даних, враховуючи значення поля пріоритету чи важливості пакета [14, 15]. У технічній літературі також описуються подібні зміни показників якості (NP) пакетної мережі залежно від рівня навантаження на мережу. На рис. 3 представлено залежність рівня використання мережі від навантаження при передачі даних за допомогою протоколу Ethernet.

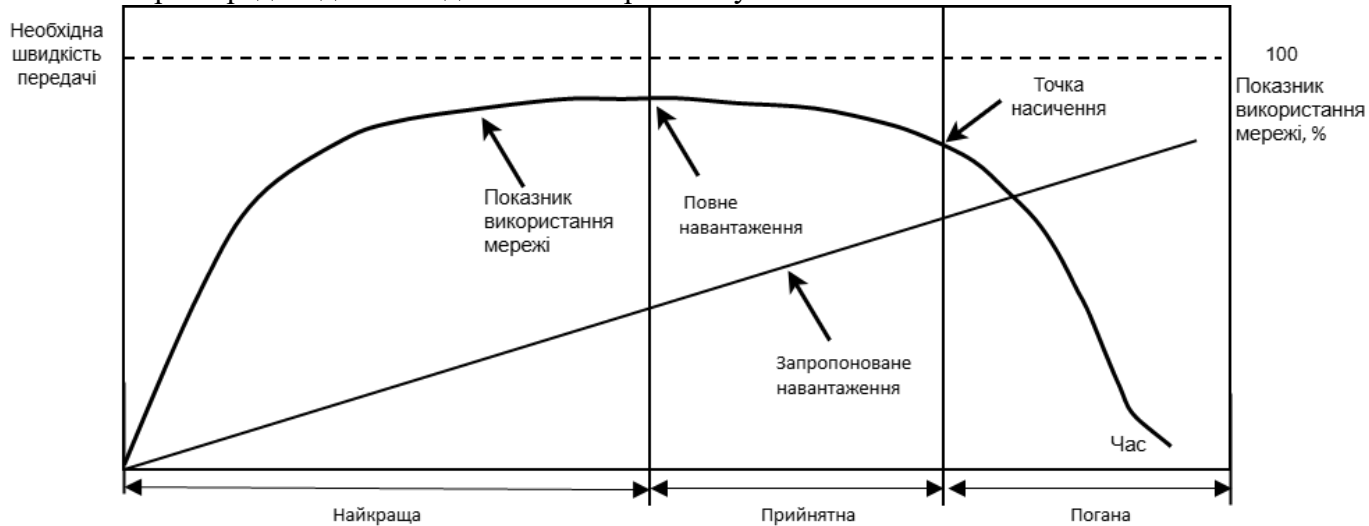


Рис. 3. Залежність показника використання мережі від корисного навантаження

Показник використання мережі можна розглядати як узагальнений показник якості, оскільки для різних сервісів при передачі трафіку через мережу найбільш критичними можуть бути різні нормативні показники якості [16].

Як один із нелінійних параметрів можна враховувати, що значення показника на інтервалі часу оцінки не завжди доступні на 100%. Часто трапляються випадки, коли дані щодо значення оцінюваного параметра відсутні на певних часових відрізках протягом усього періоду оцінки. Це змінює кількість наявних значень показника за період оцінки при повторних вимірах. У загальному випадку кількість значень показника за період оцінки є випадковою величиною, яка наближається до відношення тривалості інтервалу оцінки до інтервалу отримання одиничного значення показника. Сума часових інтервалів, протягом яких значення параметра доступні, визначається як -  $T_{av}$  час доступності статистичних даних щодо роботи мережевого з'єднання. Відповідно, розрахунок інтегрального показника якості повинен базуватися на часі доступності даних параметра на період оцінки.

Щоб врахувати нелінійний вплив тривалості перевищення оцінюваним параметром заданого порогового значення на загальний результат оцінки продуктивності мережевого з'єднання, а також для врахування нелінійної залежності часу реакції між показниками NP, було обрано експоненційну оціночну функцію. Ця функція демонструє різке зростання значень при коротких інтервалах перевищення порогу параметра, але переходить до лінійної залежності при тривалих інтервалах перевищення, порівнянних із загальним часом оцінки. Графік такої оціночної функції подано на рис. 4.

Формула для обчислення інтегрального показника (4) з урахуванням часу доступності значень параметра, часу перевищення порогового значення параметра та при застосуванні експоненціальної оцінювальної функції матиме наступний вигляд

$$Q_p = \left(1 - \left(\frac{S_{par}}{S_{thres}}\right) e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}\right) * 100\% \quad (6)$$

При цьому значення тривалості часових інтервалів співвідносяться наступним чином

$$0 \leq T_{thres} \leq T_{av}, T_{av} \leq T_m$$

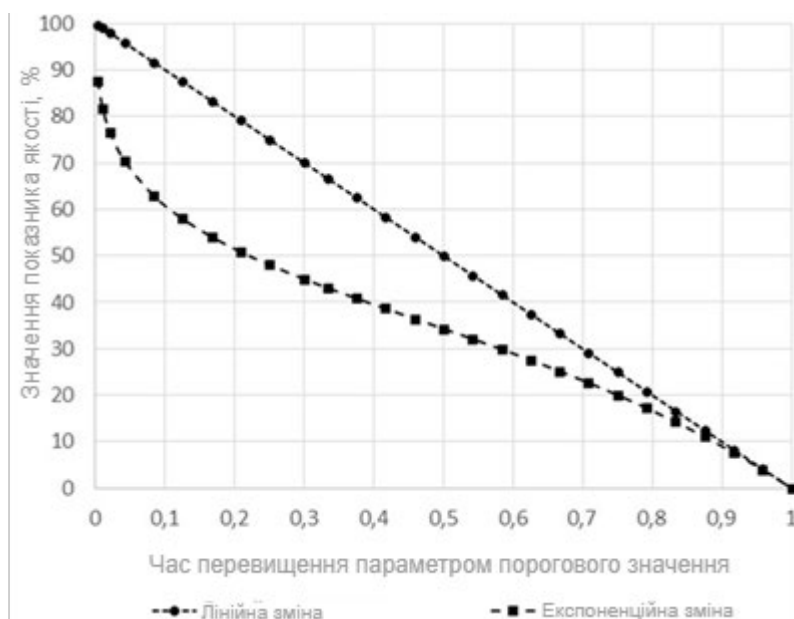


Рис. 4. Графіки лінійної та експоненціальної оціночних функцій для показника якості

Значення показника залишається позитивним протягом усього часу оцінки. Згідно з наведеною формулою, інтегральний показник спершу різко змінюється на початковому етапі перевищення оцінюваним параметром встановленого порогового рівня, а потім поступово переходить до лінійного зростання зі збільшенням часу перевищення порогу в межах інтервалу доступності значень параметра. Це запобігає погіршенню значення інтегрального показника з плином часу. При  $T_{thres} = T_{av}$  формула розрахунку значення показника (6) набуває вигляду

$$Q_p = \left(1 - \frac{S_{par}}{S_{thres}}\right) * 100\%$$

Для визначення ступеня достовірності отриманої інтегральної оцінки якості використовується коефіцієнт достовірності, що характеризує частку значень параметра з максимально можливою їх кількістю на інтервалі проведення оцінки, використаних для розрахунку значення інтегрального показника якості. Формула розрахунку коефіцієнта достовірності  $K_t$  має вигляд

$$K_t = \frac{T_{av}}{T_m}$$

При значенні коефіцієнта достовірності менше заданої величини отриманий результат інтегральної оцінки продуктивності має малий ступінь достовірності та її використання не рекомендується.

Отже, інтегральний показник дає змогу оцінити якість роботи мережевого з'єднання протягом періоду оцінки, враховуючи повноту збору значень оцінюваного параметра за цей період.

**Багатопорогова інтегральна оцінка якості роботи мережевого з'єднання.** Для різних послуг зв'язку висувуються різні вимоги до показників якості [17, 18]. Відповідно, одне й те саме мережеве з'єднання в певний момент часу може бути придатним для передачі трафіку для одних послуг зв'язку, але не відповідати вимогам інших. У результаті, протягом доби загальна тривалість часу, протягом якого мережеве з'єднання було придатним для передачі трафіку конкретної послуги, може змінюватися. У таких випадках для оцінки якості роботи мережевого з'єднання з передачі пакетного трафіку необхідно використовувати кілька порогових значень (два і більше). Багатопорогова оцінка може застосовуватися в таких форматах:

- за рівнем перевищення порогового значення параметра – оцінка перевищення різних порогових значень оцінюваного параметра з урахуванням відмінностей у вимогах до цільових

діапазонів значень параметра під час передачі пакетного трафіку різних класів (оцінка за областями значень параметра  $S_{thres1}$  і  $S_{thres2}$  на рис. 5),

- за "ефективністю" передачі пакетного трафіку в межах різних діапазонів значень параметра – оцінка якості передачі однорідного пакетного трафіку при різних вимогах до показників якості (оцінювання за областями значень параметра  $S_{thres1}$  і  $S_{thres2}$  на рис. 6).

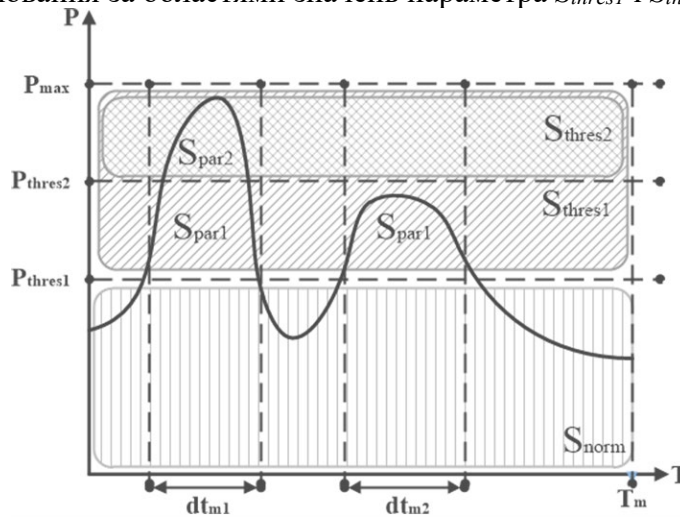


Рис. 5. Оцінка якості мережевого з'єднання за величиною значення параметра

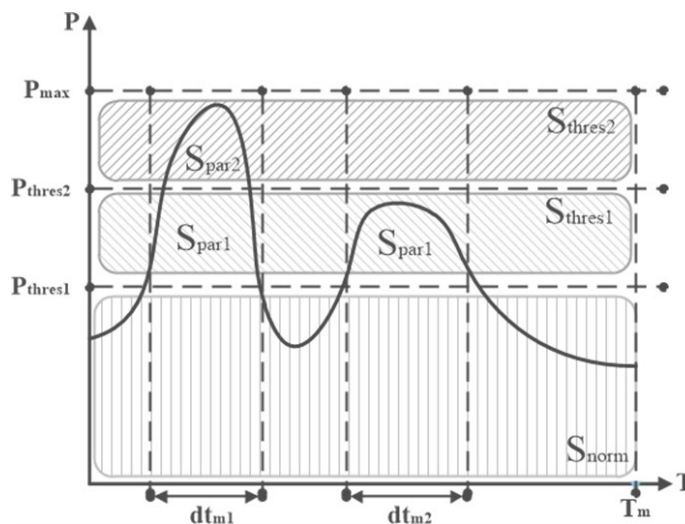


Рис. 6. Оцінка «ефективності» мережевого з'єднання в межах порогових інтервалів значень параметра

Значення показника ступеня погіршення якості мережевого з'єднання для різних класів трафіку, обчислені на основі перевищення параметра порогового значення, визначатимуться згідно з рис. 5 за наведеними формулами:

$$S_{thres1} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres1}(t)) dt \tag{7}$$

$$S_{thres2} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres2}(t)) dt \tag{8}$$

для  $P_{thres2} < P(t) \leq P_{max}$

$$S_{par2} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres2}(t)) dt \tag{9}$$



для  $P_{thres1} < P(t) \leq P_{max}$

$$S_{par1} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres1}(t)) dt \quad (10)$$

Значення сформованих показників якості (6) з врахуванням (7), (8), (9), (10) розраховуються за формулами:

$$Q_{p1} = \left(1 - \left(\frac{S_{par1}}{S_{thres1}}\right) e^{-(1-T_{thres1}/T_{av1})}\right) * 100\% \quad (11)$$

$$Q_{p2} = \left(1 - \left(\frac{S_{par2}}{S_{thres2}}\right) e^{-(1-T_{thres2}/T_{av2})}\right) * 100\% \quad (12)$$

Отримані значення показника ступеня погіршення якості роботи мережевого з'єднання для різних класів трафіку при проведенні оцінки «ефективності» передачі пакетного трафіку по діапазнам значень параметра будуть обчислюватися згідно рис. 6 за формулами:

$$S_{thres1} = \int_0^{T_m} (P_{thres2}(t) - P_{thres1}(t)) dt \quad (13)$$

$$S_{thres2} = \int_0^{T_m} (P_{max}(t) - P_{thres2}(t)) dt \quad (14)$$

для  $P_{thres2} < P(t) \leq P_{max}$

$$S_{thres1} = \int_0^{T_m} (P_{thres2}(t) - P_{thres1}(t)) dt \quad (15)$$

для  $P_{thres1} < P(t) \leq P_{thres2}$

$$S_{par1} = \int_0^{T_m} (P(t) - P_{thres1}(t)) dt \quad (16)$$

Значення сформованих показників якості (6) з врахуванням (13), (14), (15), (16) розраховуються за формулами:

$$Q_{p1} = \left(1 - \left(\frac{S_{par1}}{S_{thres1}}\right) e^{-(1-T_{thres1}/T_{av1})}\right) \times 100\% \quad (17)$$

$$Q_{p2} = \left(1 - \left(\frac{S_{par2}}{S_{thres2}}\right) e^{-(1-T_{thres2}/T_{av2})}\right) \times 100\% \quad (18)$$

Оцінка за «ефективністю» передачі пакетного трафіку по діапазнам значень параметра дозволяє виконувати аналіз і оцінку величин «сплесків» значень параметра в областях допустимих значень та визначати необхідність ступеня модернізації мережевих з'єднань у плані розширення або перерозподілу класів трафіку по мережевих з'єднаннях. Коефіцієнт модернізації визначається формулою:

$$K_m = \frac{Q_{p2}}{Q_{p1}}$$

Чим більше значення  $K_m$ , тим швидше потрібна модернізація мережевого з'єднання. Аналіз зростання значення  $K_m$  для мережевого з'єднання за величиною зміни та тривалості періоду, за який відбулася зміна, дає змогу створювати прогноз за тривалістю часу, що залишився до повної непридатності мережевого з'єднання для передавання трафіку будь-яких класів. Даний функціонал забезпечує реальну економічну ефективність для операторів зв'язку в плані своєчасності планування технічних заходів для підтримки продуктивності мережі на належному рівні.

Використовуючи для оцінки якості мережевого з'єднання кількох порогових значень, будемо мати деякий набір значень  $Q_p$ . При цьому найбільш критичним є мінімальне значення

$Q_p$ , яке визначає ступінь найбільшої деградації якості мережевого з'єднання для передавання трафіку різних класів. У цьому випадку з урахуванням (11), (12) та (17), (18) підсумкове значення  $Q_p$  визначається формулою:

$$Q_p = \text{MIN}(Q_{p1}, Q_{p2}, \dots, Q_{pn})$$

де  $n$  – кількість порогових значень (максимальне значення відповідає кількості класів трафіку, переданих по мережевому з'єднанні).

Аналогічна багатопорогова оцінка якості роботи мережевих з'єднань може проводитися в сторону зменшення значень параметра під час встановлення порогових значень за мінімальним значенням оцінюваного параметра ("дзеркальне" відображення вищеприписаного багатопорогового оцінювання).

### Висновки

Проведене дослідження дозволяє дійти висновку, що розробка інтегрального методу оцінки продуктивності мережевих з'єднань є ефективним інструментом для визначення продуктивності мережі. Запропоновані одно- та багатопорогові методи враховують особливості різних класів трафіку і дозволяють адаптувати оцінку продуктивності залежно від поточних умов. Введення зони деградації забезпечує гнучкість оцінки і дозволяє підтримувати належний рівень якості обслуговування навіть за умов змінного навантаження. Запропоновані інтегральні показники якості роботи мереж дозволяють більш точно контролювати продуктивність мережевих з'єднань, що дає змогу підвищити стабільність мережі та задоволеність користувачів.

### Список використаної літератури:

1. Quality of service (qos) performance analysis in a traffic engineering model for next-generation wireless sensor networks / T. Mazhar et al. *Symmetry*. 2023. Vol. 15, no. 2. P. 513. URL: <https://doi.org/10.3390/sym15020513>.
2. Quality of Service (QoS) / ed. by T. Eckert. Cham : Springer International Publishing, 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81961-3>.
3. Eckert, T., Bryant, S. (2021). Quality of Service (QoS). In: Toy, M. (eds) *Future Networks, Services and Management*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81961-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81961-3_11)
4. VoIP performance evaluation and capacity estimation using different qos mechanisms / A. Refaet et al. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2020. Vol. 881. P. 012146. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/881/1/012146>.
5. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications / A. Al-Fuqaha et al. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2015. Vol. 17, no. 4. P. 2347–2376. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095>.
6. Gozdecki J., Jajszczyk A., Stankiewicz R. Quality of service terminology in IP networks. *IEEE communications magazine*. 2003. Vol. 41, no. 3. P. 153–159. URL: <https://doi.org/10.1109/mcom.2003.1186560>.
7. Quality is in the eye of the beholder: Meeting users' requirements for internet quality of service / Bouch, A., Kuchinsky, A., Bhatti, N. *Association for Computing Machinery*. 2000. P.297-304. URL: <https://doi.org/10.1145/332040.332447>
8. Varela M., Skorin-Kapov L., Ebrahimi T. Quality of service versus quality of experience. *Quality of experience*. Cham, 2014. P. 85–96. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-02681-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02681-7_6).
9. Alreshoodi M., Woods J. Survey on qoe\qos correlation models formultimedia services. *International journal of distributed and parallel systems*. 2013. Vol. 4, no. 3. P. 53–72. URL: <https://doi.org/10.5121/ijdps.2013.4305>.
10. RFC 1633: integrated services in the internet architecture: an overview. *IETF Datatracker*. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1633>.
11. Telecommunications performance engineering / ed. by A. R. Afima, I. o. E. Engineers. London : Institution of Electrical Engineers, 2003. 288 p.

12. Vasseur J.-P., Guichard J., Faucheur F. L. Definitive MPLS network designs. Brand: Cisco Press, 2005. 552 p.
13. Held G. Enhancing LAN performance. CRC Press, 2004.  
URL: <https://doi.org/10.1201/9780203496053>.
14. Recommendation ITU-T E.412 (01/2003). Network management controls.
15. Lundqvist P., Barreiros M. QOS-Enabled networks: tools and foundations. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2015. 256 p.
16. Designing for Cisco Network Service Architectures (ARCH) Foundation Learning Guide / M. Al-shawi, A. Laurent. - Fourth Edition. - USA, Indianapolis: Cisco Press, 2017. - 904 p.
17. Recommendation ITU-T G.1010 (11/2001). End-user multimedia QoS categories.
18. Recommendation ITU-T Y.1541 (12/2011). Network performance objectives for IP-based services.
19. Recommendation ITU-T M.2301 (07/2002). Performance objectives and procedures for provisioning and maintenance of IP-based networks.

*Автори статті*

**Брезицький Сергій** – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0004-2562-890X

**Герасимчук Владислав** – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0003-8944-1952

*Authors of the article*

**Brezitskyi Serhii** – postgraduate, State University of Information and Communication Technology, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0004-2562-890X

**Herasyimchuk Vladyslav** – postgraduate, State University of Information and Communication Technology, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0003-8944-1952