

УДК 004.7:004.9

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.017138

Каток В.Б., к.т.н.; Скрипник В.В., PhD;  
Дунаєвський К.В.; Сазонов О.О.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЗАТРИМКИ ПОСЛУГ ТАКТИЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ

**Katok V.B., Skrypnik V.V., Dunaievskiy K.V., Sazonov O.O. Research on a queuing system model to minimize latency of tactile Internet services.** A distributed approach to the organization of network computing power is proposed, which allows, through the implementation of several levels of cloud computing centers of different power, to achieve a reduction in data transmission time over the network for a large number of connections. Let us consider a system for building promising communication networks taking into account the paradigm of peripheral computing. The system consists of four levels, each of which houses computing systems of different power. It is assumed that such an architecture will reduce the delay in signal transmission in both directions and thus come closer to meeting the requirements of TI.

**Keywords:** tactile internet, 5G networks, cloud computing, edge computing

**Каток В.Б., Скрипник В.В., Дунаєвський К.В., Сазонов О.О. Дослідження моделі системи масового обслуговування для мінімізації затримки послуг тактильного інтернету.** Пропонується розподілений підхід до організації обчислювальних потужностей мережі, що дозволяє за рахунок впровадження кількох рівнів хмарних обчислювальних центрів різної потужності досягти скорочення часу передачі даних по мережі для великої кількості з'єднань. Та розглянемо систему побудови перспективних мереж зв'язку з урахуванням парадигми периферійних обчислень. Система яка складається з чотирьох рівнів, кожна з яких розташовуються обчислювальні системи різної потужності. Передбачається, що подібна архітектура дозволить зменшити затримку передачі сигналу в обох напрямках і таким чином наблизитися до задоволення вимог ТІ.

**Ключові слова:** тактильний інтернет, мережі 5G, хмарні обчислення, периферійні обчислення

### Вступ

Тактильний інтернет (ТІ) – запропонований як концепція розвитку інфокомунікаційних систем, що передбачає передачу інформації в мережах зв'язку не тільки звичайних даних, аудіо- та відеоінформації, але також рухів і тактильних відчуттів.

Багато дослідників в галузі інфокомунікацій вважають, що ТІ дозволить сформувати дійсно інтерактивне середовище реального часу для дистанційної взаємодії між людиною і середовищем, або людиною і людиною шляхом реалізації одного або декількох систем взаємодії людина-машина (humanto machine, H2M). Транслюючи дії людини роботу або комп'ютерного інтерфейсу і отримуючи зворотний зв'язок у вигляді тактильної реакції, ТІ дозволяє значно розширити можливості наявних сьогодні додатків у таких областях як телемедицина, робота в осередках природних і техногенних катастроф, ігрова індустрія, віддалене навчання і так далі. Системи з інших багатообіцяючих і областей, що розвиваються, – віртуальної та доповненої реальності – можуть бути об'єднані з системами ТІ для отримання абсолютно нових додатків, що дозволяють передавати на відстань повний спектр відчуттів людини. Ключовим фактором реалізації тактильного інтернету є мінімізація затримки передачі даних, оскільки навіть незначні затримки можуть призводити до втрати відчуття реального часу та зниження ефективності взаємодії. Саме тому забезпечення надмалої затримки є однією з головних науково-технічних задач при побудові сучасних інфокомунікаційних мереж.

Безумовно, новий тип переданих даних, потребує від мереж зв'язку абсолютно нових характеристик показників якості обслуговування. Серед вимог найчастіше необхідно досягти:

- над малої затримки передачі даних (ПД) - сумарна затримка ПД в обох напрямках менше 1 мс;
- високої доступності послуг;
- високої надійності (операторського класу);
- захищеності та безпеки мережі;
- сумісності з існуючими мережевими технологіями.

**Аналіз останніх досліджень.** В [1,4] рівні представляє собою велику кількість хмарних платформ малої потужності, званих мікро-хмарами, але не враховані показники затримки інформації.

В [2,5] рівні за пропонованої архітектури використовуються обчислювальні центри більшої потужності як обчислювальної, так і з точки зору доступної дискової пам'яті - міні-хмари.

В [6,7] рівні системи розташовується основна хмарна платформа, підключена до елементів опорної мережі зв'язку і має значні обчислювальні ресурси та можливості для зберігання інформації.

В [8,10] Розглянуто застосування технології неортогонального множинного доступу (PD-NOMA), але непоказана похибка при впровадженні неортогональних сигналів.

**Постановка завдання.** У цій статті представлено сучасні технології ПД, включаючи оптичні технології та 4G, не завжди можуть гарантувати виконання подібних дуже серйозних вимог, тому великі поклади покладаються на нові технології. Багато робіт, наприклад, вказують на те, що при розробці протоколів і технологій мобільних мереж 5G слід закласти можливості забезпечення над малої затримки ПД по мережі зв'язку в поєднанні з іншими вимогами до мереж ТІ.

Крім технологій 5G у контексті забезпечення вимог ТІ часто згадуються інші технології, що дозволяють тією чи іншою мірою гарантувати наднизьку затримку ПД по мережі, наприклад програмно-конфігуровані мережі (Software-defined Networks, SDN), віртуалізація мережевих функцій (Network Function Virtualization NFV), а також (в контексті використання технологій 5G) архітектури при яких обчислювальні ємності розташовуються на периферії мобільної мережі (Mobile-Edge Computing MEC).

Mobile-Edge Computing- це новий напрямок розвитку архітектури мобільних мереж, призначено збільшення їх ефективності. Воно активно працює з Європейським інститутом зі стандартизації в галузі телекомунікації (ETSI). Згідно цьому напрямку, хмарні обчислювальні потужності, необхідні для функціонування мереж і сервісів, переносяться на кордон мобільної мережі, дозволяючи досягти:

- зменшення затримки ПД;
- розвантаження ядра мережі з точки зору обсягу переданих даних;
- забезпечення більшої пропускнуєї спроможності мережі;
- надання нових сервісів за рахунок використання додаткової (контекстної) інформації про проходження даних через мережу.

Перехід від централізованих і дорогих обчислювальних центрів до розподілених рішень, що складаються з значно менших потужних хмарних платформ, дозволить домогтися зменшення затримки ПД для більшості з'єднань до величин, що задовольняють вимогам до мереж ТІ.

Відповідно до звітів ETSI, існує кілька можливостей для розміщення/підключення невеликих хмарних обчислювальних систем (або MEC-серверів) [7]:

- до базової станції (БС) стільники LTE (станції eNodeB);
- к контроллеру 3G/4G радіомережі (Radio Network Controller, RNC);
- до кількох БС сот LTE (станій eNodeB);
- на межі опорної мережі (core network).

Концепція невеликих хмарних обчислювальних центрів, що розкладаються на периферії мережі, розробляється багатьма дослідницькими колективами. У деяких випадках для позначення таких центрів використовується термін «хмара» (cloudlet), поза деякими – «мікро-хмара» (micro-cloud). Серед іншого також слід зазначити, що запропонована компанією Cisco парадигма «туманних обчислень» (fog computing) може бути застосована навіть для мобільних мереж зв'язку, включаючи 5G. Особливої актуальності набуває проблема мінімізації затримки передачі даних, оскільки саме цей параметр є критичним для функціонування систем реального часу та визначає ефективність роботи сучасних телекомунікаційних сервісів.

**Метою роботи** є підключення хмарних обчислювальних систем для надання послуг сучасних інфокомунікаційних мереж з мінімальною затримкою.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

**Запроновано підхід до периферійних обчислень у мережах 5G.** Розглянемо систему побудови перспективних мереж зв'язку з урахуванням парадигми периферійних обчислень. Система складається з чотирьох рівнів, кожному з яких розташовуються обчислювальні системи різної потужності. Передбачається, що подібна архітектура дозволить зменшити затримку передачі сигналу в обох напрямках і таким чином наблизитися до задоволення вимог 5G.

Перший рівень представляє собою велику кількість хмарних платформ малої потужності, званих мікро-хмарами. Кожна мікро-хмара за допомогою оптоволоконного кабелю підключається за усталеними налаштуваннями к одній БС мобільної мережі (в перспективі-5G). Водночас не виключається підключення однієї мікро-хмари до кількох БС, зокрема, у разі використання в деяких районах фемтосот, для кожної з яких може не потрібне підключення окремої мікро-хмари. Таким чином, для потрапляння даних з будь-якого підключеного до мережі термінального мобільного пристрою до найближчого обчислювального центру необхідний лише один перехід (hop). Який підхід дозволяє:

- знизити у деяких випадках час ПД з допомогою зменшення кількості переходів, необхідні доставки інформації;
- зменшити навантаження на мережу;
- збільшити доступність системи;
- надавати нові сервіси за рахунок використання додаткової (контекстної) інформації про проходження даних через мережу;
- покращити захищеність даних, що передаються через мережу, завдяки відсутності необхідності передавати всі дані в єдиний обчислювальний центр.

На другому рівні запронованої архітектури використовуються обчислювальні центри більшої потужності (як обчислювальної, так і з точки зору доступної дискової пам'яті) - міні-хмари. Кожна міні-хмара з'єднана з кількома мікро-хмарами за допомогою високошвидкісного оптоволоконного доступу. В цілому, число мікро-хмар, що підключаються до кожної міні-хмари, є змінним і залежить від кількості користувачів, підключених до відповідних БС і набору використовуваних сервісів. Можна укласти, що архітектура зв'язків між мікро- та міні-хмарами є предметом для оптимізації.

На третьому рівні системи розташовується основна хмарна платформа, підключена до елементів опорної мережі зв'язку і має значні обчислювальні ресурси та можливості для зберігання інформації. У свою чергу, до основної хмари за допомогою високошвидкісних оптичних кабелів підключені всі міні-хмари.

В опорній мережі зв'язку також присутній один або кілька шлюзів у мережу Інтернет, що дозволяють при необхідності організувати доступ від основної хмари мережі до таких публічних хмарних сервісів, як Microsoft Azure, Amazon Elastic Compute Cloud та ін.

Розглянута архітектура відрізняється від запронованих раніше запровадженням додаткового рівня ієрархії. У описані моделі, які умовно можна назвати трирівневими: крім публічної хмарної платформи і основної хмари мережі, в них передбачався тільки один рівень периферичних хмар (хмарок або міні-хмар), в той час як в запронованій моделі периферичні обчислювальні ємності міні-хмари.

Потенційна перевага чотирирівневої моделі над трирівневою полягає в тому, що частина заявок на обслуговування може бути оброблена на рівні однієї БС за допомогою підключеної до неї мікро-хмари. Це призведе не тільки до розвантаження мережі в цілому, але й до прикращення середнього часу схвалення послуги за рахунок зменшення середньої кількості переходів, необхідних для встановлення з'єднання між хмарними сервісами та споживачами цих сервісів. Для підтвердження цієї тези було здійснено імітаційне моделювання.

**Аналіз систем обслуговування зі станозалежними параметрами.** Основним завданням при реалізації тактильного інтернету є мінімізація затримок під час передавання інформації. У межах теорії масового обслуговування адекватною моделлю для вирішення цієї задачі виступає система типу M/M/1, яку можна узагальнити для систем з однією чергою, де інтенсивності надходження та обслуговування пакетів залежать від поточного стану системи.

Подібні процеси прийнято називати процесами розмноження і знищення. До цього класу, зокрема, належать багатоканальні експоненціальні системи обслуговування типу М/М/м. Ще одним прикладом є система з блокуванням, у якій відсутня можливість формування черги через обмежені ресурси. Такі моделі широко застосовуються при дослідженні систем комутації каналів.

Узагальнення моделі М/М/1 на випадок які залежать від стану параметрів при пуассонівському процесі надходжень та експоненціальному розподілі часу обслуговування для системи, що перебуває у стані  $n$ , здійснюється шляхом визначення ймовірності одного надходження на нескінченно малому інтервалі часу  $(t, t + \Delta t)$  у вигляді  $\lambda_n \Delta t + o(\Delta t)$ , а ймовірність відсутності надходжень на цьому інтервалі визначається як  $(1 - \lambda_n \Delta t) + o(\Delta t)$ . Зберігається припущення про відсутність післядії, тому надходження протягом проміжку часу  $(t, t + \Delta t)$  не залежить від подій надходження на інших часових інтервалах. Таким чином, цей процес є ще одним прикладом марковського процесу.

Пуассонівський процес, при  $\lambda_n = \lambda$  - значення інтенсивності надходження пакетів не залежить від стану, є окремим випадком.

Процес надходження часто інтерпретують як процес розмноження, оскільки величину  $\lambda_n \Delta t$  можна розглядати як імовірність «народження» нового користувача за умови, що в системі вже перебуває  $n$  користувачів. Слід зазначити, що в межах цієї моделі протягом інтервалу часу  $(t, t + \Delta t)$  до системи може надійти не більше одного користувача.

Аналогічно до розглянутого вище процесу Пуассона для надходжень, процес відходження пакетів можна узагальнити на випадок залежності від стану системи. У цьому випадку процес обслуговування (або процес знищення) характеризується тим, що ймовірність відходження одного користувача протягом нескінченно малого інтервалу часу  $(t, t + \Delta t)$  дорівнює  $\mu_n \Delta t + o(\Delta t)$ , якщо в системі перебуває  $n$  користувачів. Відповідно, ймовірність того, що відходження не відбудеться, становить  $(1 - \mu_n \Delta t) + o(\Delta t)$ . Процес відходження пакетів, який залежить від стану системи (процес знищення), також належить до класу марковських процесів.

Поєднуючи два розглянуті вище процеси, аналогічно до системи обслуговування М/М/1 (за умови  $\Delta t \rightarrow 0$  та перебування системи у стані статистичної рівноваги), отримуємо рівняння рівноваги, яке описує об'єднаний процес розмноження і знищення, тобто систему обслуговування зі станозалежними параметрами у стаціонарному режимі:

$$(\lambda_n + \mu_n)p_n = \lambda_{n-1} p_{n-1} + \mu_{n+1} p_{n+1}. \quad (1)$$

Слід зазначити, що параметр  $\lambda_n$  характеризує інтенсивність надходження користувачів у стані  $n$ ,  $p_n$  – стаціонарну ймовірність перебування системи у стані  $n$ , а  $\mu_n$  – інтенсивність їхнього відходження (обслуговування) у цьому ж стані. Рівняння (1) відображає баланс між інтенсивністю виходу зі стану  $n$  (ліва частина) та інтенсивністю переходів у цей стан (права частина).

Варто підкреслити, що розв'язок рівняння (1) узагальнює наведений вище аналіз системи М/М/1. У цьому випадку рівняння рівноваги набуває вигляду:

$$\lambda_n p_n = \mu_{n+1} p_{n+1}. \quad (2)$$

Порівняємо рівняння (2) з наведеним вище співвідношенням, яке описує розв'язок для системи М/М/1 із пуассонівськими процесами обслуговування, що не залежать від стану.

Використовуючи рівняння (2), можна показати, що стаціонарна ймовірність  $p_n$  для процесу розмноження і знищення (системи обслуговування зі станозалежними параметрами) має вигляд:

$$p_n / p_0 = \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i / \prod_{i=1}^n \mu_i. \quad (3)$$

Невідома ймовірність стану  $p_0$  для системи обслуговування з обмеженою чергою, що може містити не більше  $N$  користувачів, визначається за допомогою нормуючої умови:  $\sum_{n=0}^N p_n = 1$

Така система обслуговування є стабільною. У випадку нескінченної черги ( $N \rightarrow \infty$ ) стабільність забезпечується за умови  $\rho_0 > 0$ .

Розглянемо систему з двома вихідними каналами, які підключені до статистичного концентратора або вузла комутації пакетів для зв'язку з сусіднім вузлом мережі. Пакети даних надходять у канали випадковим чином. Припускається, що довжина пакетів має експоненціальний розподіл із середнім значенням  $1/\mu_s$ . Така система відповідає моделі М/М/2.

Якщо на обробку надходить лише один пакет, він негайно обслуговується одним із каналів з інтенсивністю  $\mu$ . У випадку, коли надходить два або більше пакетів, обидва канали задіюються одночасно. За умови експоненціального розподілу часу обслуговування ймовірність завершення обслуговування в одному каналі протягом інтервалу  $(t, t + \Delta t)$  дорівнює  $\mu \Delta t$ , тоді як ймовірність завершення обслуговування хоча б в одному каналі на цьому інтервалі становить  $2\mu \Delta t$ . Імовірність одночасного завершення обслуговування в обох каналах дорівнює  $o(\Delta t)$  і прямує до нуля при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Таким чином, розглянута система відповідає процесу розмноження і знищення з параметрами:  $\lambda_n = \lambda$  (інтенсивність надходження не залежить від стану),  $\mu_n = \mu$  при  $n = 1$  та  $\mu_n = 2\mu$  при  $n \geq 2$ . Отже, для системи обслуговування типу М/М/2, використовуючи рівняння (3), отримуємо:

$$p_n/p_0 = (\lambda/2\mu)^{n-1}(\lambda/\mu) = 2\rho^n, n \geq 1, \rho \equiv \lambda/2\mu. \quad (4)$$

Параметр  $\rho$  визначається через величину  $2\mu$ , оскільки ефективна інтенсивність обслуговування для станів  $n \geq 2$  становить  $2\mu$ . За наявності в системі щонайменше двох пакетів вона працює з подвоєною інтенсивністю порівняно з одно-канальною системою, що призводить до зниження навантаження та, відповідно, зменшення затримок.

Для спрощення подальшого аналізу припустимо, що черга є нескінченною. У цьому випадку стаціонарні ймовірності визначаються із використанням нормуючої умови:

$$p_0 = (1-\rho)/(1+\rho), \rho \equiv \lambda/2\mu; \quad (5)$$

$$p_n = \frac{2(1-\rho)}{(1+\rho)} \rho^n, n \geq 1. \quad (6)$$

Тоді середнє завантаження (зайнятість) системи обслуговування визначається як:

$$\varepsilon(n) = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n = \frac{2\rho}{(1-\rho^2)}, \rho \equiv \lambda/2\mu. \quad (7)$$

Це значення завжди є меншим, ніж середнє завантаження в системі М/М/1, для якої  $\varepsilon(n)_{M/M/1} = \rho/(1-\rho)$ ,  $\rho = \lambda/\mu$ . Середній час затримки в системі обслуговування, що включає як час очікування, так і час обслуговування, можна визначити за допомогою формули Літтла:

$$E(T) = E(n)/\lambda = 1/\mu(1-\rho^2), \rho \equiv \lambda/2\mu. \quad (8)$$

Середній час затримки, як правило, є меншим, ніж у системі М/М/1. Крім того, слід зазначити, що оскільки інтенсивність обслуговування для станів  $n > 1$  дорівнює  $2\mu$ , система обслуговування типу М/М/2 може ефективно працювати при інтенсивності надходжень, яка перевищує більш ніж удвічі відповідний показник для системи М/М/1, за умови  $\lambda < 2\mu$ .

Таким чином, додавання додаткового каналу обслуговування дозволяє зменшити час затримки та підвищити продуктивність системи.

З точки зору характеристик систем обслуговування, подвоєння пропускної спроможності часто є ефективнішим рішенням, ніж введення додаткової лінії, за умови, що це виправдано економічними показниками або вимогами до надійності. Причина полягає в тому, що час обробки одного пакета зменшується вдвічі, тому при низькому рівні завантаження ( $\rho \ll 1$ ) система здатна обслуговувати більшу кількість пакетів за одиницю часу.

У випадку, коли в системі перебуває щонайменше два пакети, ймовірність завершення їх обслуговування є однаковою як для системи М/М/2 з інтенсивністю обслуговування  $\mu$ , так і для системи М/М/1 з подвоєною інтенсивністю обслуговування  $2\mu$ . Зі зростанням навантаження середній час затримки в обох випадках (як при введенні додаткової лінії, так і при подвоєнні пропускної здатності) прямує до однакової граничної величини.

Другий і третій приклади доцільно розглянути у взаємозв'язку. У другому прикладі узагальнюється модель М/М/2 на випадок, коли обслуговуюча лінія доступна кожному користувачу, що надходить у систему. Як у випадку комутації пакетів, так і комутації каналів, це означає, що кількість обслуговуючих каналів завжди відповідає кількості пакетів або викликів, які потребують обслуговування. У такій системі черги не виникає, як і ймовірності блокування.

За умови експоненціального розподілу часу обслуговування інтенсивність обслуговування для будь-якого  $n$  визначається як  $\mu_n = n\mu$ . При цьому вхідний потік вважається пуассонівським з інтенсивністю  $\lambda$ . Для випадку нескінченної кількості обслуговуючих каналів така система описується моделлю М/М/∞. Використовуючи рівняння (3), можна отримати, що:

$$p_n/p_0 = (\lambda/\mu)^n/n!, \quad (9)$$

та

$$p_0 = e^{-\rho}, \quad \rho \equiv \lambda/\mu. \quad (10)$$

Ймовірності перебування системи у станах у цьому випадку описуються розподілом Пуассона.

Третій приклад відноситься до систем обслуговування з «наполегливими» користувачами. У цій моделі розглядається система з керуванням вхідним потоком. Зокрема, інтенсивність надходжень, що залежить від стану, задається як  $\lambda_n = \lambda/(n + 1)$ , де  $\lambda$  – відома стала величина. При цьому система має лише одну обслуговуючу лінію, тому для всіх  $n$  виконується  $\mu_n = \mu$ .

Такий підхід може використовуватися для моделювання звернень до централізованих баз даних, де обслуговування виконується фактично однією лінією.

#### **Результати імітаційного моделювання**

Імітаційне моделювання передбачає визначення часу обробки даних при різних сценаріях.

**Сценарій 1:** необхідний для забезпечення сервісу обробка даних може бути проведена в мікро-хмарі без залучення обчислювальних центрів вищих рівнів.

**Сценарій 2:** мікро-хмара не здатна обробити запит, і необхідна обробка проводиться в міні-хмарі.

**Сценарій 3:** ні мікро-хмара, ні міні-облако не можуть обробити запит, і він відправляється в основну хмарну платформу мережі.

Для реалізації всіх трьох сценаріїв було проведено два експерименти з використанням двох різних платформ:

візуальної платформи віртуалізації Cloud Analyst на базі фреймворку CloudSim з додаванням додаткових інструментів для розширення функціональних можливостей ;

платформи на базі фреймворку CloudSim з розробленими в середовищі NetBeans новими інструментами.

**Експеримент 1.** Загалом в експерименті використовувалося п'ять віртуальних хмарних обчислювальних центрів різної конфігурації та різних потужностей: дві мікро-хмари у дворазових зонах, дві міні-хмари (до кожного з яких підключено одну мікро-хмару) та одна хмара опорної мережі.

Обидва експерименти на різних платформах імітаційного моделювання та з різним числом хмар показують, що сценарій 1, при якому в обробку залучаються мікро-хмари, дає найбільший вигравш у затримці ПД через мережу. Сценарій 2, що дозволяє обробляти міні-хмари, у свою чергу, забезпечує меншу затримку, ніж сценарій 3, у якому дані обробляються переважно хмарі мережі.

#### **Висновки**

Тактильний-інтернет як перспективний напрям розвитку інфокомунікаційних систем висуває жорсткі вимоги до характеристик мереж наступних поколінь, серед яких визначальною є мінімізація затримок передачі даних. Забезпечення над малих затримок (на рівні ~1 мс) є критично необхідною умовою для підтримки сервісів реального часу з тактильним зворотним зв'язком.

У статті обґрунтовано доцільність застосування децентралізованих підходів до обробки даних, зокрема використання периферійних обчислень (MEC), як ефективного засобу зниження латентності. Запропонована багаторівнева архітектура, що включає мікро-хмари, міні-хмари, центральну та віддалені хмарні платформи, забезпечує скорочення часу доставки та обробки даних за рахунок їх наближення до джерела генерації.

Результати імітаційного моделювання підтвердили, що введення рівня мікро-хмар є ефективним механізмом мінімізації затримок у мережі. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію параметрів архітектури та оцінювання її ефективності в різних сценаріях використання.

#### Список використаної літератури:

1. Л.Н. Беркман, Л.О. Комарова, О.І. Чумак. Системи електров'язку та сигнали Навчальний посібник. – Київ: ДУТ, 2015.
2. Л.Н. Беркман, О.Г. Варфоломеева, А. Г. Захаржевський, М. Г. Твердохліб, В. П. Ярцев . Управління якістю обслуговування в мережах NGN. – Київ: ДУТ, № 2 2015.
3. Л.Н. Беркман, В. В. Жебка. Розрахунок часу затримки проходження інформації з врахуванням структури мережі з комутацією пакетів . – Київ: ДУТ № 2 2014
4. Я.М. Антонюк , Б.Ф. Шияк, М.І. Антонюк. Оцінювання затримки передачі даних за фіксованими протоколами у сегментах комп'ютерних кампусних мереж № 4 2019
5. Н.В. Галаган, Л.Н. Беркман, В.Б. Каток, В.В. Скрипник, Ю.М. Зіненко Наукові Записки. – Київ: ДУІКТ, №2(8) 2025
6. Wang, J., Li, X., & Chen, Y. "Advances in 6G Wireless Communication Systems: Theory and Application". IEEE Communications Magazine, 2023.
7. Zhang, H., & Shi, Q. "Deep Learning for Signal Processing: A Comprehensive Overview". IEEE Signal Processing Magazine, 2023.
8. Liu, Y., & He, B. "Quantum Communications: Challenges and Future Directions". Journal of Quantum Information Science, 2023.
9. C. She, C. Yang, and T. Q. S. Quek, "Joint uplink and downlink resource configuration for ultra-reliable and low-latency communications," IEEE Transactions on Communications, vol. 66, no. 5, pp. 2266–2280, May 2018.N.
10. Gholipour, S. Parsaeefard, M. R. Javan, N. Mokari, H. Saedi, and H. Pishro-Nik, "Resource management and admission control for tactile internet in next generation of RAN," arXiv preprint arXiv:1907.01403, 2019.

#### Автори статті

**Каток Віктор** – кандидат технічних наук, головний радник з питань науково-технічної політики, АТ «Укртелеком», Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-2063-7872

**Скрипник Вікторія** – PhD, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-9854-8039

**Дунаєвський Костянтин** – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0004-2078-4348

**Сазонов Олександр** – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0008-1110-9120

#### Authors of the article

**Katok Viktor** – Candidate of Sciences (technical), Chief Advisor on Scientific and Technical Policy, JSC "Ukrtelecom", Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-2063-7872

**Scripnik Viktoriya** – PhD (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-9854-8039

**Dunaievskiy Kostiantyn** – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0004-2078-4348

**Sazonov Oleksandr** – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0008-1110-9120

---

Надійшла до редакції: 22.04.2026

Прийнята до друку: 29.04.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Каток В.Б., Скрипнік В.В., Дунаєвський К.В., Сазонов О.О.

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