

УДК 621.391

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАФІКУ В МЕРЕЖІ LTE-ADVANCED

DOI 10.36994/2788-5518-2021-01-01-02²

Стрелковська І.В., д.т.н., проф. Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна, strelkovskaya@onat.edu.ua

Соловська І.М., к.т.н., доц. Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна, i.solovskaya@onat.edu.ua

Кордон Д.В., Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна, yuki.akihiro.senpai@gmail.com

Анотація. Розглянуто особливості забезпечення характеристик якості QoS в мережі LTE-Advanced, регламентовані 3GPP TR 23.401 на базі концепції наскрізної якості обслуговування E2E. Для знаходження характеристик QoS в мережі LTE-Advanced визначено принципи формування потоків трафіку EPS різних класів обслуговування QCI для ділянок мережі (мережі радіодоступу E-UTRAN та опорної пакетної мережі EPC). Запропоновано вирішення задачі знаходження характеристик якості QoS обслуговування трафіку в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, таких як пропускна спроможність, довжина черги IP-пакетів та середній час затримки пакетів для односпрямованих віртуальних наскрізних каналів обслуговування потоків трафіку EPS в мережі мобільного зв'язку E-UTRAN/LTE-Advanced. За допомогою вузлового тензорного методу з k-класами обслуговування трафіку досліджено дві мережні характеристики якості QoS – середній час затримки IP-пакетів та довжина черги IP-пакетів в мережі мобільного зв'язку E-UTRAN/LTE-Advanced. Розглянуто два класи обслуговування QCI для потоків трафіку EPS гарантованої GBR та негарантованої Non-GBR швидкості передачі для послуг потокового відео (Buffering streaming) та послуг на базі TCP/IP. Отримано значення середнього часу затримки IP-пакетів в мережі LTE-Advanced для наскрізного каналу за замовчуванням без гарантованої швидкості передачі Non-GBR та виділеного наскрізного каналу з гарантованою швидкістю передачі GBR. Знайдено значення середнього часу затримки IP-пакетів з урахуванням часу затримки IP-пакетів в буферних пристроях eNodeB та обслуговуючих шлюзах S-GW. Надано практичні рекомендації щодо використання результатів дослідження отриманих характеристик якості обслуговування трафіку мережі E-UTRAN/LTE-Advanced. Отримані значення характеристик QoS для різних класів обслуговування QCI кожного виду трафіку при спільному використанні доступних мережних ресурсів E-UTRAN/LTE-Advanced дозволяє обґрунтовано обрати відповідні апаратно-програмні засоби мережі, такі як базові станції eNodeB, обслуговуючі S-GW та пакетні шлюзи P-GW пакетної мережі EPC.

Ключові слова: мережа E-UTRAN/LTE-Advanced, якість обслуговування QoS, E2E, потік трафіку EPS, середній час затримки IP-пакетів, довжина черги IP-

² Стрелковська І.В., Соловська І.М., Кордон Д.В.

пакетів, потік з гарантованою швидкістю GBR, потік без гарантованої швидкості Non-GBR, клас обслуговування QCI, вузловий тензорний метод з k-класами обслуговування трафіку

DEFINING CHARACTERISTICS OF SERVICE QUALITY TRAFFIC IN THE LTE-ADVANCED NETWORK

I.V. Strelkovska, Dr.habil., Prof. State University of Intellectual Technologies and Communications, Odesa, Ukraine, strelkovskaya@onat.edu.ua

I.M. Solovska, Ph.D., Ass. Prof. State University of Intellectual Technologies and Communications, Odesa, Ukraine, i.solovskaya@onat.edu.ua

D.V. Kordon, State University of Intellectual Technologies and Communications, Odesa, Ukraine, yuki.akihiro.senpai@gmail.com

Abstract. Features of providing QoS quality characteristics in the LTE-Advanced network regulated by 3GPP TR 23.401 on the basis of the concept of end-to-end quality of service E2E are considered. To find the characteristics of QoS in the LTE-Advanced network, the principles of formation of EPS traffic flows of different QCI service classes for network sections (E-UTRAN radio access network and EPC reference packet network) are defined. The solution of the problem of finding the QoS quality characteristics of traffic service in the E-UTRAN/LTE-Advanced network, such as bandwidth, queue length of IP packets and average packet delay time for unidirectional virtual end-to-end channels of EPS traffic flow services in the mobile network E -UTRAN/LTE-Advanced. Two network QoS quality characteristics were investigated using the node tensor method with k-classes of traffic service - the average delay time of IP packets and the queue length of IP packets in the E-UTRAN/LTE-Advanced mobile communication network. Two QCI service classes are considered for EPS traffic flows of guaranteed GBR and non-guaranteed Non-GBR baud rate for video streaming services (Buffering streaming) and TCP/IP-based services. The value of the average delay time of IP packets in the LTE-Advanced network for the default end-to-end channel without a guaranteed non-GBR transmission rate and a dedicated end-to-end channel with a guaranteed GBR transmission rate was obtained. The values of the average delay time of IP packets were found, taking into account the delay time of IP packets in the buffer devices eNodeB and serving gateways S-GW. Practical recommendations are given for the use of the results of the study of the obtained characteristics of the quality of traffic service network E-UTRAN/LTE-Advanced. The obtained values of QoS characteristics for different QCI classes of each type of traffic while sharing available network resources E-UTRAN/LTE-Advanced allows you to choose the appropriate network hardware and software, such as eNodeB base stations, serving S-GW and packet gateways P- GW packet network EMF.

Keywords: E-UTRAN/LTE-Advanced network, QoS service quality, E2E, EPS traffic flow, average IP packet delay time, IP packet queue length, flow with guaranteed speed GBR, flow without guaranteed Non-GBR speed,, QCI service class, a nodal tensor method with k-classes of traffic service

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА В СЕТИ LTE-ADVANCED

Стрелковская И.В., д.т.н., проф. Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Одесса, Украина, strelkovskaya@onat.edu.ua

Соловская И.М., к.т.н., доц. Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Одесса, Украина, i.solovskaya@onat.edu.ua

Кордон Д.В. Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Одесса, Украина, yuki.akihiro.senpai@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены особенности обеспечения характеристик качества QoS в сети LTE-Advanced, которые регламентированы 3GPP TR 23.401 на базе концепции сквозной качества обслуживания E2E. Для нахождения характеристик QoS в сети LTE-Advanced определены принципы формирования потоков трафика EPS различных классов обслуживания QCI для участков сети (сети радиодоступа E-UTRAN и опорной пакетной сети EPC). Предложено решение задачи нахождения характеристик качества QoS обслуживания трафика в сети E-UTRAN/LTE-Advanced, таких как пропускная способность, длина очереди IP-пакетов и среднее время задержки пакетов для однонаправленных виртуальных сквозных каналов обслуживания потоков трафика EPS в сети мобильной связи E-UTRAN/LTE-Advanced. С помощью узлового тензорного метода с k-классами обслуживания трафика исследованы две сетевые характеристики качества QoS – среднее время задержки IP-пакетов и длина очереди IP-пакетов в сети мобильной связи E-UTRAN/LTE-Advanced. Рассмотрены два класса обслуживания QCI для потоков трафика EPS гарантированной GBR и негарантированной Non-GBR скорости передачи для услуг потокового видео (Buffering streaming) и услуг на базе TCP/IP. Получено значение среднего времени задержки IP-пакетов в сети LTE-Advanced для сквозного канала по умолчанию без гарантированной скорости передачи Non-GBR и выделенного сквозного канала с гарантированной скоростью передачи GBR. Найдено значение среднего времени задержки IP-пакетов с учетом времени задержки IP-пакетов в буферных устройствах eNodeB и обслуживающих шлюзах S-GW. Даны практические рекомендации по использованию результатов исследования полученных характеристик качества обслуживания трафика сети E-UTRAN/LTE-Advanced. Полученные значения характеристик QoS для различных классов обслуживания QCI каждого вида трафика при совместном использовании доступных сетевых ресурсов E-UTRAN/LTE-Advanced позволяет обоснованно выбрать соответствующие аппаратно-программные средства сети, такие как базовые станции eNodeB, обслуживающие S-GW и пакетные шлюзы P-GW пакетной сети EPC.

Вступ

Розвиток мереж мобільного зв'язку (MM3) в Україні відбувається сьогодні на базі технології LTE-Advanced (Long Term Evolution), впровадження якої дозволяє збільшити швидкості передачі даних та значно розширити номенклатуру послуг, які надаються в мережі. Важливим питанням розвитку мереж LTE-Advanced (Rel. 10-12) є забезпечення необхідного рівню якості обслуговування QoS (Quality of service) для надання сучасної номенклатури мультимедійних послуг. До характеристик QoS, згідно [1-3], віднесені: пропускна спроможність, час затримки та ймовірність втрат пакетів, довжина черги IP-пакетів. [3].

Завдання підтримки характеристик якості QoS в мережі LTE-Advanced вирішуються за рахунок забезпечення певної конфігурації мережі та диференційованої якості обслуговування за умови відповідного управління

канальним та буферним ресурсом мережі. Під конфігурацією мережі радіодоступу E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial radio access network) розуміється організація взаємодії між базовими станціями eNodeB за допомогою інтерфейсу X₂, адже вибір топології з'єднання між eNodeB має вплив на забезпечення показників якості QoS. Зменшення часу затримки IP-пакетів та ймовірності їхніх втрат об'єктами мережі може бути досягнуто за рахунок вибору оптимального маршруту та ефективного використання механізмів обслуговування черг в буферних пристроях eNodeB [1-3]. Зважаючи на те, що номенклатура мультимедійних послуг безперервно розширюється, а вимоги щодо QoS стають більш жорсткішими, задача знаходження характеристик якості QoS обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced є актуальною.

Особливості підтримки характеристик якості QoS в мережі LTE

В мережі LTE-Advanced забезпечення якості обслуговування QoS зумовлено необхідністю підтримки різної номенклатури послуг та забезпечення функціонування безлічі додатків, які надаються в мережі. Трафік, який обслуговується в потоках EPS (Evolved Packet Service), належить до різної номенклатури послуг (Відеовиклики (Live streaming) в реальному часі, Потокowe відео (Buffering streaming) з буферизацією, Мова, відео (Live streaming), інтерактивні ігри, Real-time Gaming, послуги на базі TCP/IP (e-mail, chat, sharing, ftp) та має різні вимоги до характеристик QoS, які наведені в табл. 1 [1]. Обслуговування потоків EPS в мережі LTE-Advanced, згідно 3GPP TR 23.401, виконується за допомогою наскрізного каналу за замовчуванням без гарантованої швидкості передачі Non-GBR та виділеного наскрізного каналу з гарантованою швидкістю передачі GBR. Потоки GBR забезпечуються виділеними ресурсами на час передачі, за умови нормованого часу затримки, а потоки EPS без гарантованої швидкості передачі даних Non-GBR використовуються з виділенням ресурсів за принципом «краще з можливого» (Best effort), а пропускна здатність з'єднання завжди не гарантована [1-3].

Процес встановлення з'єднання в мережі LTE-Advanced з забезпеченням наскрізної якості обслуговування QoS показаний на рис. 1. При підключенні абонентського пристрою UE (User Equipment) до мережі LTE-Advanced йому надається наскрізний канал за замовчуванням Non-GBR, який завжди є потоком з негарантованою швидкістю передачі, а на мережному рівні – обслуговування виконується базовими станціями eNodeB та сервісним шлюзом S-GW й пакетним шлюзом P-GW за допомогою виділеного віртуального наскрізного каналу підтримки QS, який може бути як потоком з гарантованою, так і з негарантованою швидкістю передачі [1-4].

Технічний рапорт 3GPP TR23.401 [1] регламентує наступні характеристики QoS для дев'яти класів обслуговування, кожному з яких відповідає свій ідентифікатор QCI (QoS Class Identifier), які наведені в табл. 1 [1].

Таблиця 1
Специфікації QoS для мережі LTE згідно 3GPP TR23.401 [1]

Клас QCI	Тип потоку	Пріоритет	Час затримки пакетів, мс	Ймовірність втрат пакетів PERL	Послуги
1	GBR	2	100	10^{-2}	Виклики VoIP в реальному часі
2		4	150	10^{-3}	Відеовиклики (Live streaming) в реальному часі
3		3	50		Real-time Gaming
4		5	300	10^{-6}	Потокове відео (Buffering streaming) з буферизацією
5	Non-GBR	1	100		IMS-сигналізація
6		6	300		Відео (Buffering streaming) з буферизацією, послуги на базі TCP/IP (e-mail, chat, ftp)
7		7	100	10^{-3}	Мова, відео (Live streaming), інтерактивні ігри
8		8	300	10^{-6}	Відео (Buffering streaming) з буферизацією, послуги на базі TCP/IP (e-mail, chat, sharing, ftp)
9		9	300		

Ідентифікатор QCI визначає групу послуг (див. табл. 1) та тип ресурсу (гарантований GBR або негарантований Non-GBR), встановлює пріоритет (від 1 до 9) для послуг, сумарний час затримки передачі пакетів (50-300 мс) та значення ймовірності втрат пакетів (10^{-2} – 10^{-6}). Кожному класу відповідає визначена номенклатура послуг. Наприклад, класи QCI 1, 2, 3 і 7 – це послуги реального часу протоколу UDP/IP, для яких в мережі LTE-Advanced критичним є значення середнього часу затримки IP-пакетів та ймовірності їхньої втрати PERL (Packet Error Loss Rate), мінімізація цих показників може бути досягнута тільки при використанні протоколу TCP/IP.

З'єднання в мережі LTE-Advanced з забезпеченням наскрізної якості обслуговування QoS (згідно 3GPP TR23.401) на ділянках мережі показаний на рис. 1. На першій ділянці *Bearer QoS* мережі радіодоступу E-UTRAN між абонентським пристроєм UE (User Equipment) та базовою станцією eNodeB за забезпечення параметрів QoS відповідає базова станція eNodeB, яка за

кожним потоком трафіку EPS закріплює ідентифікатор класу обслуговування QCI (QoS Class Identifier), процес обслуговування контролюється модулем керування мобільністю MME (Mobility Management Entity), який завантажує профіль QoS з реєстру домашніх користувачів HSS (Home Subscriber Server) і відправляє його всім мережним об'єктам опорної пакетної мережі EPS (Evolved Packet Core).

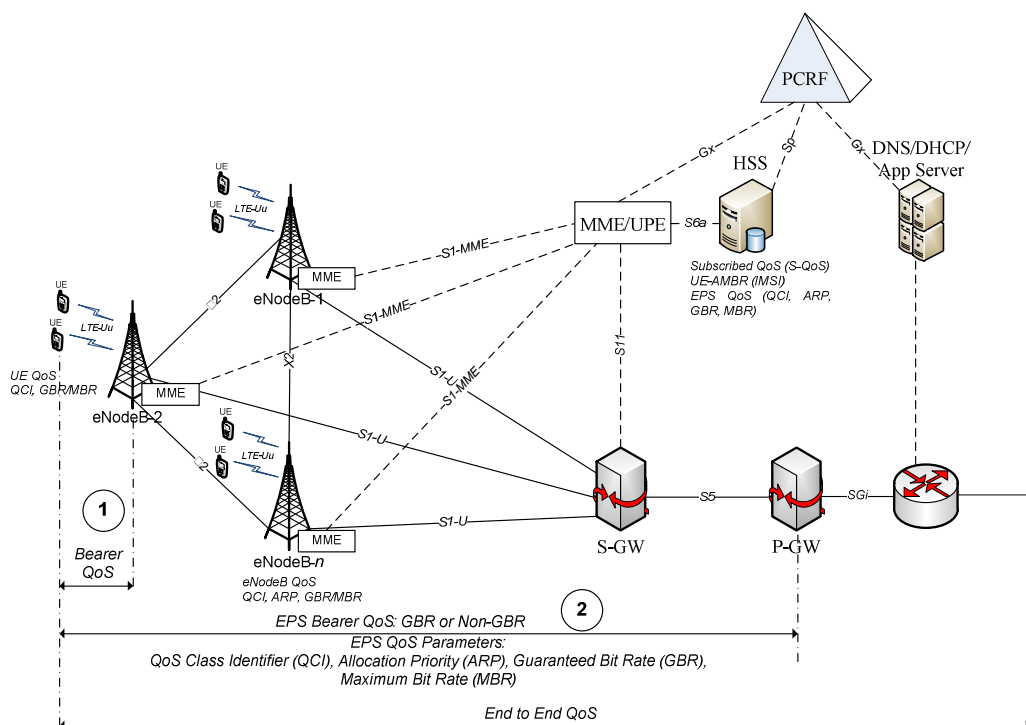


Рис. 1. З'єднання в мережі LTE-Advanced з забезпеченням наскрізної якості обслуговування QoS (згідно 3GPP TR23.401)

Параметри класу обслуговування QCI для виділеного наскрізного каналу надаються з PCRF (Policy and Charging Rules Function) [1]. На другій ділянці мережі LTE-Advanced *EPS Bearer QoS*, між базовою станцією eNodeB та обслуговуючим шлюзом S-GW (Serving GateWay) й пакетним шлюзом P-GW (Packet GateWay) потоки трафіку EPS, марковані на кожному інтерфейсі мають ідентифікатори класу обслуговування QCI та відрізняються як потоки з гарантованою швидкістю GBR та без неї Non-GBR [1]. Слід зазначити, що на ділянці між шлюзами S-GW та P-GW (інтерфейс S5) потік буде визначатися ідентифікатором GTP (GPRS Tunneling Protocol). Класифікація потоків EPS з односпрямованими радіоканалами RLC забезпечує підтримку шаблонів потоків трафіку TFT (Traffic Flow Template). Ці шаблони використовують інформацію з IP заголовка пакета таку, як IP-адреси відправника і одержувача та номери TCP/IP портів [1]. Структура Ethernet-frame зі зазначенням полів IP Header для визначення QoS показана на рис. 2.

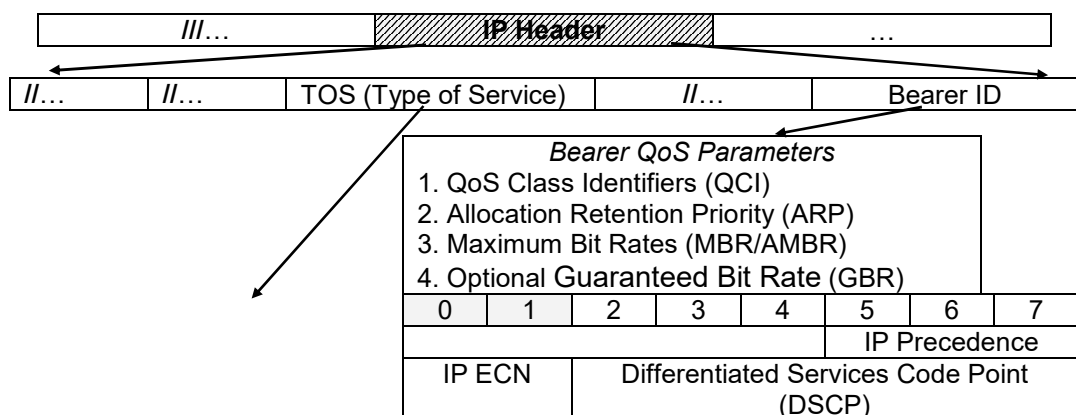


Рис. 2. Структура Ethernet-frame зі зазначенням полів для визначення QoS

Рішення задачі знаходження характеристик якості QoS обслуговування трафіку в мережі LTE

Розглянемо задачу визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced на ділянці *EPS Bearer QoS*, обравши для дослідження найбільш важливі для функціонування та надання послуг мережі характеристики, а саме: значення середнього часу затримки IP-пакетів та середньої довжини черги IP-пакетів.

Для вирішення поставленої задачі, будемо використовувати вузловий тензорний метод з k -класами обслуговування трафіку, який дозволяє одночасно досліджувати як структуру розглядаємої мережі LTE-Advanced, так і функціональні характеристики її об'єктів [5]. В роботі [6] запропоновано використання вузлового тензорного методу для дослідження характеристик якості QoS мережі LTE-Advanced та доведено, що результати використання цього методу дозволяють отримати результати для мережі в цілому за допомогою єдиного методу, що значно спрощує розрахунки.

Нехай вихідна структура фрагменту мережі радіодоступу E-UTRAN/LTE-Advanced, який показаний на рис. 3, задана за допомогою графу $G(N, V)$, де $N = \{N_j, j = \overline{1, m}\}$ – вузли графу, які задані базовими станціями eNodeB, а $V = \{v_j, i = \overline{1, n}\}$ – гілки графу, які задані трактами взаємодії.

Розглянемо виділений наскрізний канал для потоків EPS між базовою станцією eNodeB-2 та сервісним шлюзом S-GW ($N_5 \rightarrow N_2$), який обслуговує два класи трафіку QCI-4 та QCI-6, які відрізняються типом потоку (GBR та Non-GBR), пріоритетом, значенням середнього часу затримки та номенклатурою послуг [5-9].

Для рішення поставленого завдання відомо [7-8]:

– інтенсивності пакетного трафіку в трактах взаємодії мережі E-UTRAN/LTE-Advanced, які задані в табл. 2;

– довжина пакетної черги між вузлами $N_5 \rightarrow N_2$, умовної довжини 100 тис. пакетів для потоку EPS-1 (QCI-4, ARP-5 та тип потоку GBR) і 200 тис. пакетів для потоку EPS-2 (QCI-6, ARP-9 та тип потоку Non-GBR).

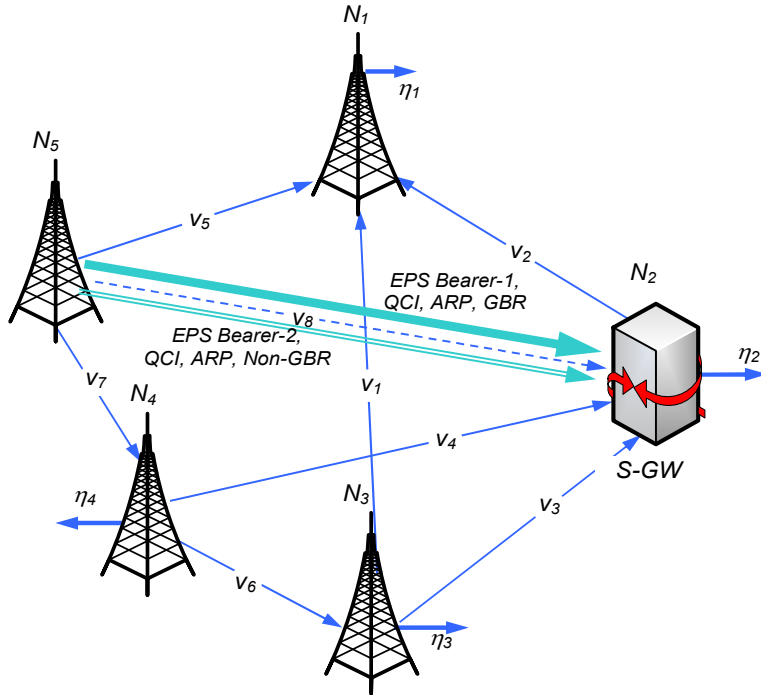


Рис. 3. Фрагмент мережі E-UTRAN/LTE-Advanced

Таблиця 2
Інтенсивності трафіку в трактах мережі E-UTRAN/LTE-Advanced

Інтенсивність трафіку потоку EPS-1, L_v тис. пакетів	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
	700	800	900	700	960	800	980	0
Інтенсивність трафіку потоку EPS-2, L_v тис. пакетів	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
	300	350	320	350	400	360	750	0

Необхідно знайти наступні характеристики QoS для потоків EPS-1 та EPS-2 в обслуговуванні трафіку мережі LTE-Advanced між базовою станцією eNodeB-2 та сервісним шлюзом S-GW:

- середнє значення часу затримки IP-пакетів в базових станціях eNodeB та шлюзі S-GW та трактах їхньої взаємодії в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced,
- значення довжини черги IP-пакетів в базових станціях eNodeB та шлюзі S-GW та трактах взаємодії в мережі E-UTRAN/LTE-Advanced.

Для вирішення поставленого завдання формуємо базисну матрицю розрізів B_η для заданої структури мережі (рис. 3) розмірності 8×16 , для кожного з наскрізних каналів для потоків EPS-1 та EPS-2, яка має вигляд [7-8]:

$$B_\eta = \left(\begin{array}{c|c} B_\eta^{11} & 0 \\ \hline 0 & B_\eta^{22} \end{array} \right),$$

$$B_\eta^{11} = \begin{pmatrix} b_{\eta 11}^{11} & b_{\eta 12}^{11} & \dots & b_{\eta 18}^{11} \\ b_{\eta 21}^{11} & b_{\eta 22}^{11} & \dots & b_{\eta 28}^{11} \\ b_{\eta 31}^{11} & b_{\eta 32}^{11} & \dots & b_{\eta 38}^{11} \\ b_{\eta 41}^{11} & b_{\eta 42}^{11} & \dots & b_{\eta 48}^{11} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$B_\eta^{22} = \begin{pmatrix} b_{\eta 11}^{22} & b_{\eta 12}^{22} & \dots & b_{\eta 18}^{22} \\ b_{\eta 21}^{22} & b_{\eta 22}^{22} & \dots & b_{\eta 28}^{22} \\ b_{\eta 31}^{22} & b_{\eta 32}^{22} & \dots & b_{\eta 38}^{22} \\ b_{\eta 41}^{22} & b_{\eta 42}^{22} & \dots & b_{\eta 48}^{22} \end{pmatrix}$$

Елементи базисної матриці розрізів $B_\eta - b_\eta^{kk}$, $k = \overline{1,9}$ визначаються згідно [7-10]

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо вузол } N_j \text{ є початком гілки } v_i, \\ 0, \text{ якщо вузол } N_j \text{ не є інцидентним гілці } v_i, \\ -1, \text{ якщо вузол } N_j \text{ є кінцем гілки } v_i. \end{cases}$$

Тоді базисна матриця B_η для фрагменту мережі LTE-Advanced має вигляд:

$$B_\eta = \left(\begin{array}{cccccccc|cccccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{array} \right) \quad (2)$$

В якості функціонального рівняння для знаходження середнього часу затримки IP-пакетів та довжини пакетної черги використовуємо формулу Літтла [7-10] та розглянемо рівняння в двох системах координат (СК), СК вузлових пар eNodeB та СК трактів мережі E-UTRAN/LTE-Advanced [7-10]:

$$H_v = L_v T_v, \quad H_\eta = L_\eta T_\eta \quad (3)$$

де H_v та H_η – середня довжина черги IP-пакетів в трактах взаємодії та базових станціях мережі LTE-Advanced, L_v та L_η – середня інтенсивність трафіку в трактах взаємодії, базових станціях та шлюзі S-GW мережі LTE-Advanced, T_v та T_η – середній час затримки IP-пакетів в трактах взаємодії, базових станціях та шлюзі S-GW мережі LTE-Advanced, відповідно.

Знайдемо інтенсивність трафіку L_η , яка обслуговується базовими станціями eNodeB та шлюзом S-GW розглядаємої мережі LTE-Advanced для кожного класу обслуговування QCI потоків EPS-1 та EPS-2 згідно виразу [7-10]:

$$L_\eta = B_\eta L_v B_\eta^t.$$

Тензор L_η має вигляд:

$$L_\eta = \begin{pmatrix} L_\eta^{11} & 0 \\ 0 & L_\eta^{22} \end{pmatrix},$$

$$L_\eta^{11} = \begin{pmatrix} I_{\eta 11}^{11} & I_{\eta 12}^{11} & I_{\eta 13}^{11} & I_{\eta 14}^{11} \\ I_{\eta 21}^{11} & I_{\eta 22}^{11} & I_{\eta 23}^{11} & I_{\eta 24}^{11} \\ I_{\eta 31}^{11} & I_{\eta 32}^{11} & I_{\eta 33}^{11} & I_{\eta 34}^{11} \\ I_{\eta 41}^{11} & I_{\eta 42}^{11} & I_{\eta 43}^{11} & I_{\eta 44}^{11} \end{pmatrix},$$

$$L_\eta^{22} = \begin{pmatrix} I_{\eta 11}^{22} & I_{\eta 12}^{22} & I_{\eta 13}^{22} & I_{\eta 14}^{22} \\ I_{\eta 21}^{22} & I_{\eta 22}^{22} & I_{\eta 23}^{22} & I_{\eta 24}^{22} \\ I_{\eta 31}^{22} & I_{\eta 32}^{22} & I_{\eta 33}^{22} & I_{\eta 34}^{22} \\ I_{\eta 41}^{22} & I_{\eta 42}^{22} & I_{\eta 43}^{22} & I_{\eta 44}^{22} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Результати розрахунків інтенсивностей трафіку L_η , які обслуговуються базовими станціями eNodeB та шлюзом S-GW, зведені в табл. 3.

Таблиця 3
Інтенсивності трафіку у вузлах eNodeB/S-GW мережі LTE-Advanced

Інтенсивність трафіку в базових станціях та шлюзі eNodeB/S-GW потоку EPS-1, L_η тис. пакетів	η_1	η_2	η_3	η_4
	2460	2400	2400	2480
Інтенсивність трафіку в базових станціях та шлюзі eNodeB/S-GW потоку EPS-2, L_η тис. пакетів	η_1	η_2	η_3	η_4
	1050	1020	980	1460

Для знаходження часу затримки IP-пакетів T_η в об'єктах мережі LTE-Advanced, використовуємо вираз (3), з якого знайдемо [7-10]:

$$T_\eta = [L_\eta]^{-1} H_\eta, \quad (5)$$

де $[L_\eta]^{-1}$ – матриця, обернена до L_η .

Тоді тензор затримки IP-пакетів T_η у вузлах мережі eNodeB/S-GW, має вигляд [7-10]:

$$T_\eta = \begin{pmatrix} T_\eta^{11} \\ T_\eta^{22} \end{pmatrix}$$

$$T_\eta^{11} = \begin{pmatrix} T_{\eta 11}^{11} & T_{\eta 12}^{11} \\ T_{\eta 21}^{11} & T_{\eta 22}^{11} \\ T_{\eta 31}^{11} & T_{\eta 32}^{11} \\ T_{\eta 41}^{11} & T_{\eta 42}^{11} \end{pmatrix}$$

$$T_\eta^{22} = \begin{pmatrix} T_{\eta 11}^{22} & T_{\eta 12}^{22} \\ T_{\eta 21}^{22} & T_{\eta 22}^{22} \\ T_{\eta 31}^{22} & T_{\eta 32}^{22} \\ T_{\eta 41}^{22} & T_{\eta 42}^{22} \end{pmatrix}$$

$T_{\eta pj}^{ii}$, $p = \overline{1,4}$, $i, j = \overline{1,2}$ – компоненти тензора T_η^{ii} .

Результати розрахунків середнього часу затримки IP-пакетів в T_η вузлах мережі eNodeB/S-GW зведені в табл. 4.

Таблиця 4
Середній час затримки пакетів у вузлах мережі eNodeB/S-GW

Середній час затримки пакетів у вузлах мережі eNodeB/S-GW для потоку EPS-1, T_η с	η_1	η_2	η_3	η_4
	0,05	0,10	0,07	0,05
Середній час затримки пакетів у вузлах мережі eNodeB/S-GW для потоку EPS-2, T_η с	η_1	η_2	η_3	η_4
	0,20	0,13	0,25	0,16

Для знаходження часу затримки IP-пакетів в трактах T_v взаємодії між вузлами eNodeB/S-GW мережі LTE-Advanced для наскрізних потоків трафіка EPS-1 та EPS-2 використаємо вираз [7-10]:

$$T_v = B_\eta^t T_\eta \quad (6)$$

тоді

$$T_v = \begin{pmatrix} T_v^{11} \\ T_v^{22} \end{pmatrix}$$

$$T_v^{11} = \begin{pmatrix} T_{v 11}^{11} & T_{v 12}^{11} \\ T_{v 21}^{11} & T_{v 22}^{11} \\ \vdots & \vdots \\ T_{v 81}^{11} & T_{v 82}^{11} \end{pmatrix}$$

$$T_v^{22} = \begin{pmatrix} T_{v11}^{22} & T_{v12}^{22} \\ T_{v21}^{22} & T_{v22}^{22} \\ \vdots & \vdots \\ T_{v81}^{22} & T_{v82}^{22} \end{pmatrix}$$

τ_{vpj}^{ii} $p=\overline{1,8}$, $i,j=\overline{1,2}$ – компоненти тензора T_v^{ii} – значення часу затримки пакетів.

Результати розрахунків часу затримки пакетів для наскрізних потоків трафіка EPS-1 та EPS-2 в трактах T_v взаємодії мережі LTE-Advanced зведені в табл. 5.

Таблиця 5
Час затримки пакетів в трактах між eNodeB/S-GW мережі LTE-Advanced

Час затримки пакетів в трактах взаємодії між eNodeB/S-GW для потоку EPS-1, T_v с	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
	-0,02	-0,05	0,03	0,05	0,05	0,02	0,05	0,10
Час затримки пакетів в трактах взаємодії між eNodeB/S-GW для потоку EPS-2, T_v с	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
	-0,05	-0,19	0,15	0,24	0,20	0,09	0,16	0,24

Примітка. Негативні значення в гілках v_1 і v_2 вказують на те, що слід змінити напрямок проходження трафіку в гілках вихідної мережі (рис. 3).

Таким чином, рішення поставленої задачі за допомогою вузлового тензорного методу з k-класами обслуговування трафіку, дозволяє знаходити значення характеристик якості QoS для різних класів обслуговування QCI потоків трафіку EPS в мережі LTE-Advanced EPS на ділянці Bearer QoS, такі як значення середнього часу затримок IP-пакетів і довжини черги IP-пакетів у вузлах eNodeB/S-GW і трактах мережі залежно від заданих значень інтенсивностей трафіку в трактах мережі LTE-Advanced. Результати

знаходження характеристик якості QoS – середнього часу затримки IP-пакетів та довжини черги IP-пакетів в мережі LTE-Advanced для двох класів обслуговування QCI та типів потоку трафіка EPS (GBR та Non-GBR) показані на рис. 4.

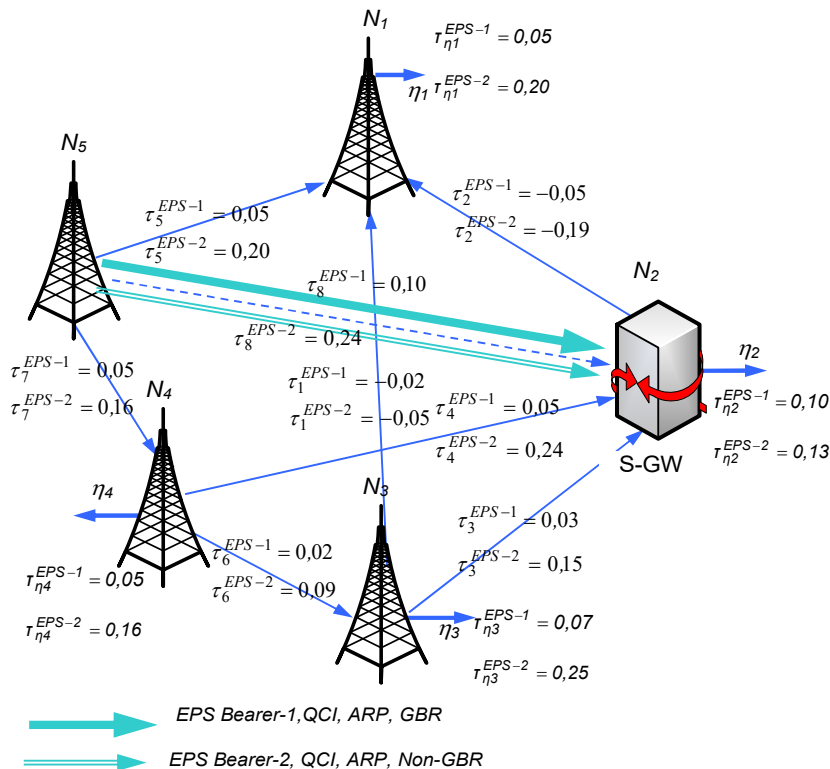


Рис. 4. Результати знаходження характеристик якості QoS для двох класів обслуговування QCI потоків трафіку EPS (GBR та Non-GBR)

При визначенні мережних характеристик якості обслуговування трафіку QoS необхідно також врахувати час затримки, який створюється в буферних пристроях eNodeB мережі. Тому, визначимо середній час затримки пакетів передавання трафіку з різними шляхами його доставки з урахуванням затримки пакетів в мережних вузлах eNodeB/S-GW. Результати розрахунків зведемо в табл. 6.

Проведені розрахунки середнього часу затримки IP-пакетів при передаванні трафіку потоку EPS-1 (QCI-4, ARP-5, тип потоку GBR) і потоку EPS-2 (QCI-6, ARP-9, тип потоку Non-GBR) різними шляхами його доставки з урахуванням затримки пакетів дозволяють обрати шляхи з найменшим та найбільшим часом затримки пакетів:

– шлях з найменшим часом затримки передавання пакетів для потоку EPS-1 eNodeB-5 – eNodeB-1 – S-GW-2 має час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx 0,25$ с, а для потоку EPS-2 – $\tau_{\text{затр}} \approx 0,57$ с;

– шлях з найбільшим часом затримки передавання пакетів для потоку EPS-1 eNodeB-5 – eNodeB-4 – eNodeB-3 – eNodeB-1 – S-GW-2 має середній час затримки $\tau_{\text{затр}} \approx 0,37$ с, а для потоку EPS-2 – $\tau_{\text{затр}} \approx 0,98$ с.

Таблиця 6

Результати розрахунку середнього часу затримки пакетів в трактах EPS Bearer з врахуванням часу затримки у вузлах мережі eNodeB/S-GW

Шлях передавання трафіку	Значення часу затримки пакетів при передаванні трафіку, с	Значення часу затримки пакетів у вузлах мережі eNodeB/S-GW τ_{η} , с	Значення часу затримки пакетів $\tau_{\text{затр}}$ з урахуванням часу затримки у вузлах, с
eNodeB-5 – S-GW-2 (v_8)	0,1	$\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 2} \approx 0,10$	0,20
	0,24	$\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 2} \approx 0,13$	0,37
eNodeB-5 – eNodeB-1 – S-GW-2 ($v_5 \rightarrow v_2$)	0,1	$\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 1} \approx 0,05$, $\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 2} \approx 0,10$	0,25
	0,24	$\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 1} \approx 0,20$, $\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 2} \approx 0,13$	0,57
Шлях передавання трафіку	Значення часу затримки пакетів при передаванні трафіку, с	Значення часу затримки пакетів у вузлах мережі eNodeB/S-GW τ_{η} , с	Значення часу затримки пакетів $\tau_{\text{затр}}$ з урахуванням часу затримки у вузлах, с
eNodeB-5 – eNodeB-4 – eNodeB-3 – S-GW-2 ($v_7 \rightarrow v_6 \rightarrow v_3$)	0,1	$\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 2} \approx 0,10$, $\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 3} \approx 0,07$, $\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 4} \approx 0,05$	0,32
	0,24	$\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 2} \approx 0,13$, $\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 3} \approx 0,25$, $\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 4} \approx 0,16$	0,78

Шлях передавання трафіку	Значення часу затримки пакетів при передаванні трафіку, с	Значення часу затримки пакетів у вузлах мережі eNodeB/S-GW τ_{η} , с	Значення часу затримки пакетів $\tau_{\text{затр}}$ з урахуванням часу затримки у вузлах, с
eNodeB-5 – eNodeB-4 – eNodeB-3 – eNodeB-1 – S-GW-2 ($v_7 \rightarrow v_6 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2$)	0,1	$\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 1} \approx 0,05$, $\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 2} \approx 0,10$, $\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 3} \approx 0,07$, $\tau^{\text{EPS-1}}_{\eta 4} \approx 0,05$	0,37
	0,24	$\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 1} \approx 0,20$, $\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 2} \approx 0,13$, $\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 3} \approx 0,25$, $\tau^{\text{EPS-2}}_{\eta 4} \approx 0,16$	0,98

Висновки

1. Для визначення характеристик якості обслуговування трафіку в мережі LTE-Advanced (згідно 3GPP TR23.401) запропоновано використання наскрізного каналу E2E для потоків трафіку EPS, які мають відзнаку класу обслуговування QCI та типу потоку трафіка (GBR та Non-GBR) в залежності від послуги, що надається. Запропоновано розподіл мережі LTE-Advanced на ділянки визначення характеристик якості обслуговування (згідно 3GPP TR23.401): *Bearer QoS* (між абонентським пристроєм UE та базовою станцією eNodeB) та *EPS Bearer QoS* (між базовою станцією eNodeB та обслуговуючим S-GW й пакетним шлюзом P-GW).

2. Запропоновано використання вузлового тензорного методу з k -класами обслуговування трафіку для дослідження характеристик якості QoS за класами обслуговування QCI та видами потоку трафіку (GBR та Non-GBR) в мережі LTE-Advanced.

3. За результатами дослідження отримані значення середнього часу затримки IP-пакетів при передаванні трафіку потоку EPS-1 (QCI-4, ARP-5, тип потоку GBR) і потоку EPS-2 (QCI-6, ARP-9, тип потоку Non-GBR) з різними шляхами його доставки. Встановлено, що значення часу затримки пакетів вздовж будь-якого маршруту доставки трафіку між вузлами $N_5 \rightarrow N_2$ становить для потоку EPS-1 – 100 мс та для потоку EPS-2 – 240 мс.

4. Розглянуто маршрути доставки потоків трафіку EPS з урахуванням часу затримки IP-пакетів у вузлах мережі eNodeB/S-GW, що дозволило обрати шляхи з найменшим та найбільшим часом затримки пакетів в мережі LTE-Advanced. Отримані результати дослідження дозволяють надати рекомендації

щодо розміру буферних пристроїв вузлів мережі (eNodeB та шлюзах S-GW), збільшення яких дозволить зменшити час затримки пакетів.

5. Проведене дослідження дозволяє враховувати особливості в обслуговуванні різних потоків трафіку EPS та враховувати характеристики кожного окремого виду трафіку в єдиному потоці при спільному використанні доступних мережних ресурсів, що дозволяє на етапі проектування мережі обрати відповідні апаратно-програмні засоби мережі.

Література

1. LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 12.6.0 Release 12).
2. 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 11). Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012.
3. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Quality of Service (QoS) concept and architecture (3GPP TS 23.107 version 10.1.0 Release 10), 2015.
4. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. – М.: Медиа-Паблишер, 2019.
5. Стрелковская И.В. Использование тензорного метода при расчете ТКС, представленной узловой сетью / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // Электронное научное специализированное издание – журнал – “Проблемы телекоммуникаций”, Харьков, ХНУРЕ, 2010. – № 1 (1). – <http://pt.journal.kh.ua>
6. Strelkovskaya I.V. LTE/MVNO networks structure optimization based on tensor decomposition / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Information and telecommunication sciences. – July-December 2014. – V. 5, № 2(9). – P. 14-20.
7. Стрелковская И.В. Тензорная модель мультисервисной сети с различными классами обслуживания трафика / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // Радиоэлектроника: Изв. высш. учеб. заведений. – 2013. – Т. 56, № 6. – С. 40-47. <https://doi.org/10.3103/S0735272713060058>
8. Стрелковская И.В. Оценка характеристик качества обслуживания разнородного трафика в мультисервисной сети // И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // Цифрові технології. Збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 13. – С. 32-38.
9. Strelkovskaya I. V. Tensor model of multiservice network with different classes of traffic service / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013): proc. of III International Conference, Polyana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine. 19-23 February, 2013. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2013. – P. 355-358. <https://doi.org/10.3103/S0735272713060058>
10. Стрелковська І.В. Деякі характеристики QoS в обслуговуванні мережі LTE / І.В. Стрелковська, Д.В. Кордон // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали десятої міжнар. наук.-пр. конф. м. Одеса 16-19 лист. 2020 р. – Одеса: ОНАЗ, 2020. – С. 384-386.

References

1. LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 12.6.0 Release 12).
2. 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 11). Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012.
3. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Quality of Service (QoS) concept and architecture (3GPP TS 23.107 version 10.1.0 Release 10), 2015.

4. Tikhvinskiy V.O., Terent'yev S.V., Koval' V.A. Seti mobil'noy svyazi 5G: tekhnologii, arkhitektura i uslugi. – M.: Media-Publisher, 2019.
5. Strelkovskaya I.V. Ispol'zovanie tenzornogo metoda pri raschete TKS, predstavlennoj uzlovoj set'ju / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Elektronnoe nauchnoe specializirovannoe izdanie – zhurnal – “Problemy telekommunikacij”, Har'kov, HNURE, 2010. – № 1 (1). – <http://pt.journal.kh.ua>
6. Strelkovskaya I.V. LTE/MVNO networks structure optimization based on tensor decomposition / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Information and telecommunication sciences. – July-December 2014. – V. 5, № 2(9). – P. 14-20.
7. Strelkovskaya I.V. Tenzornaja model' mul'tiservisnoj seti s razlichnymi klassami obsluzhivaniya trafika / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Radioelektronika: Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. – 2013. – T. 56, № 6. – S. 40-47. <https://doi.org/10.3103/S0735272713060058>
8. Strelkovskaya I.V. Ocenka harakteristik kachestva obsluzhivaniya raznorodnogo trafika v mul'tiservisnoj seti // I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // Cifrovi tehnologii. Zbirnik naukovih prac'. – 2013. – Vip. 13. – S. 32-38.
9. Strelkovskaya I. V. Tensor model of multiservice network with different classes of traffic service / I.V. Strelkovskaya, I.N. Solovskaya // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013): proc. of XII International Conference, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine. 19-23 February, 2013. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2013. – P. 355-358. <https://doi.org/10.3103/S0735272713060058>
10. Strelkovs'ka I.V. Deiaki kharakterystyky KoS v obsluhovuvannia merezhi LTE / I.V. Strelkovs'ka, D.V. Kordon // Infokomunikatsii – suchasnist' ta majbutnie: materialy desiatoi mizhnar. nauk.-pr. konf. m. Odesa 16-19 lyst. 2020 r. – Odesa: ONAZ, 2020. – S. 384-386.