

УДК 621.391

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.206031

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕНЗОРНОЇ МОДЕЛІ АДАПТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ СПРИЙМАЄМОЇ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА R-ФАКТОРОМ

Євдокименко М. О.

Об'єктом дослідження є процеси маршрутизації та забезпечення якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам, в інфокомунікаційній мережі. Для проведення дослідження в роботі запропоновано вдосконалення тензорної моделі адаптивної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі із забезпеченням сприймаємої якості обслуговування за R-фактором. За основу було взято потокову модель маршрутизації, яка враховувала ймовірні втрати пакетів, викликані перевантаженням елементів мережі, та була представлена умовами реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації, збереження потоку та запобігання перевантаження каналів зв'язку. Для отримання в аналітичному вигляді умов забезпечення якості сприйняття за показником R-фактору здійснено тензорний опис інфокомунікаційної мережі. Це дозволило отримати аналітичні вирази для розрахунку середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, які були використані для формування QoS-умов за показником R-фактору.

В рамках запропонованої моделі рішення технологічної задачі адаптивної маршрутизації було зведено до розв'язання оптимізаційної задачі нелінійного програмування з розрахунку маршрутних змінних. Введений критерій оптимальності дозволив забезпечити адаптивний характер маршрутних рішень, коли підвищення QoS-вимог призводило до зростання об'ємів використаного мережного ресурсу. Для розв'язання поставленої задачі використовувались методи математичного програмування, які реалізовані в пакеті MatLab.

Проведене дослідження на фрагменті інфокомунікаційної мережі дозволило оцінити адекватність і ефективність запропонованого підходу. За допомогою отриманих результатів досліджень вдалося забезпечити виконання заданих QoS-вимог за показником R-фактору до послуг, що надаються кінцевим користувачам. При цьому, використання запропонованої моделі характеризується більшою ефективністю щодо балансування навантаження за множиною маршрутів в інфокомунікаційній мережі. Про це свідчило те, що при заданому значенні R-фактору, з ростом інтенсивності трафіку, що надходить до інфокомунікаційної мережі, здійснювалось поступове збільшення кількості задіяних маршрутів. Тобто мережний ресурс розподілявся поступово та ефективніше на 7–10 % відносно відомих аналогів, які під час вирішення цієї ж задачі одразу використовують всі доступні маршрути.

**Ключові слова:** інфокомунікаційна мережа, якість сприйняття, R-фактор, адаптивна маршрутизація, тензорна модель.

## **1. Вступ**

На сьогодні забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS) в інфокомунікаційних мережах (ІКМ) є ключовою метою при вирішенні завдань, пов'язаних з їх проектуванням та експлуатацією. Це підтверджується сучасною тенденцією до конвергенції мереж різних типів, стрімким зростанням обсягів різноманітного трафіку в мережах, появою мультимедійних додатків і сервісів, що працюють в режимі реального часу тощо. При цьому на перше місце виходить контроль за якістю сприйняття послуги на рівні користувача (Quality of Experience, QoE), що особливо важливо при наданні мультимедійних послуг.

Розглядаючи та аналізуючи управління трафіком як основний інструмент досягнення заданої якості обслуговування, слід зазначити, що найвища ефективність функціонування ІКМ досягається за умови реалізації адаптивної маршрутизації. Даний факт обумовлено використанням ресурсів (вузлів, каналів та шляхів) мережі відповідно до QoS-вимог, а також об'єму доступного каналного та буферного ресурсу. Орієнтуючись саме на такий підхід, виникає наступна актуальна науково-технічна задача: розробити модель адаптивної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі із забезпеченням сприймаємої якості обслуговування за показниками QoE. Вирішення сформульованої задачі передбачає забезпечення наскрізної якості обслуговування, яке поєднуватиме якість роботи мережі (NP), якість інфокомунікаційних послуг (обслуговування) (QoS) та якість сприйняття інфокомунікаційних послуг, що надаються кінцевому користувачу (QoE).

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом запропонованого дослідження є процеси маршрутизації та забезпечення якості сприйняття послуг (QoE), що надаються кінцевим користувачам, в інфокомунікаційній мережі. Причому під забезпеченням QoE надалі розуміється гарантування заданих значень такого важливого показника, як R-фактор, який використовується при оцінці якості надання послуг VoIP. Зараз забезпечення заданого рівня QoE в інфокомунікаційній мережі є достатньо складною теоретичною та технологічною задачею. Це пов'язано з тим, що відповідно до методики оцінки R-фактору [1–3], на його значення впливає безліч чинників, починаючи від параметрів фізичного каналу та закінчуючи характеристиками кінцевого терміналу, наприклад, мобільного телефону або смартфона.*

Для вирішення проблеми забезпечення рівня QoE, особливо в умовах обмеженого мережного ресурсу, одним з ефективних підходів є оптимізація процесів адаптивної маршрутизації.

## **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою запропонованого дослідження є забезпечення заданого рівня QoE за показником R-фактору за допомогою адаптивної маршрутизації з контролем середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів в мережі.*

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Обрати відповідну потокову модель адаптивної маршрутизації з врахуванням ймовірних втрат пакетів, що має місце в умовах перевантаження мережі.

2. Отримати в аналітичному вигляді умови забезпечення QoE за показником R-фактору на підставі реалізації адаптивної маршрутизації з контролем міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів.

3. Сформулювати в оптимізаційній формі та розв'язати задачу адаптивної маршрутизації в ІКМ з обґрунтуванням форми та виду критерія оптимальності та множини умов-обмежень.

4. Провести експериментальне дослідження запропонованої потокової моделі з оцінкою її адекватності та ефективності.

#### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Аналізуючи існуючі дослідження в області забезпечення та оцінки рівня QoE, слід зазначити декілька підходів, які ґрунтуються на суб'єктивних та об'єктивних методах [4, 5].

Так, використання суб'єктивних методів, які описані в роботах [6, 7], дозволяє здійснити оцінку QoE рівня в основному лише в той момент, коли аудіо- та відеоінформація піддається спотворенням, що виникають в процесі оцифровки, стиснення, передачі, декодування тощо. В основу цих методів покладені, наприклад, для відеопотоку такі суб'єктивні метрики, як Single-Stimulus Continuous Quality Evaluation (SSCQE), Double Stimulus Impairment Scale (DSIS) та Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS) [8, 9]. А для суб'єктивної оцінки аудіопотоку зазвичай використовують механізми Perceptual Speech Quality Measurement (PSQM) [10, 11]. Недоліком цих методів є, по-перше, складність самого процесу оцінки якості, тому що вони базуються на статистичних алгоритмах, а, по-друге, цей процес характеризується великими часовими витратами.

Також до суб'єктивних методів належить відомий метод Mean Opinion Score (MOS), описаний в [12]. Проте цей метод не дозволяє контролювати рівень QoE в режимі реального часу та своєчасно реагувати на зниження якості. Загальним недоліком суб'єктивних методів є те, що вони:

- вимагають споживання додаткових мережних ресурсів, які й так обмежені;
- не дозволяють кількісно враховувати фактори продуктивності самої мережі, які впливають на рівень QoE, а саме показників середньої затримки та втрати пакетів;
- вимагають необхідності специфічних налаштувань мережного обладнання для оцінки рівня QoE.

На відміну від суб'єктивних методів, об'єктивні методи є більш інформативними та дозволяють оцінити рівень QoE на основі аналізу структурно-функціональних характеристик мережі. Так, найбільших результатів серед існуючих досліджень досягли за допомогою об'єктивного методу, в основу якого покладено E-модель, що представлена в роботах [13, 14]. Результатом розрахунку рівня QoE за допомогою E-моделі є показник – R-фактор, який дозволяє оцінити рівень задоволеності якістю послуг, що надаються користувачам в мережі. Цей QoE-показник єднає в собі не тільки

індивідуальні характеристики сигналів, але й мережні показники якості передачі: середню затримку та ймовірність втрат пакетів. Проте, незважаючи на всі ці переваги, головним недоліком даного методу є відсутність прямої залежності між R-фактором та мережними показниками [15]. Тому, виникає перспективна наукова задача щодо отримання цієї залежності з метою подальшої оцінки рівня QoE за показником R-фактору.

Вирішення цієї задачі вимагає перегляду математичних моделей та методів, які покладено в основу сучасних протокольних рішень, в бік використання тензорного підходу [16, 17]. Згідно проведеного аналізу, вже існують подібні математичні рішення, які запропоновані та представлені в роботах [18, 19]. І хоча використання тензорних моделей призводить до ускладнення як математичного опису задачі, так і її розв'язання, подібні ускладнення компенсуються вищою (в порівнянні з відомими аналогами) ефективністю маршрутних рішень щодо рівня забезпечення якості обслуговування. Характерною рисою тензорних моделей QoE-маршрутизації, які описані в роботах [20, 21], є неадаптивний характер рішень, коли в ході маршрутизації балансування навантаження здійснюється за всією множиною доступних маршрутів. Це значно звужує область застосування таких рішень, обмежуючи її режимами перевантаження ІКМ. Тому й виникає необхідність у вдосконаленні відомих тензорних моделей QoE-маршрутизації шляхом надання маршрутним рішенням адаптивного характеру.

## **5. Методи дослідження**

Як метод дослідження виступала теорія графів, завдяки якій було описано структуру мережі. Для отримання в аналітичному вигляді умов забезпечення QoE за показником R-фактору використано методологію тензорного дослідження та основи теорії масового обслуговування. Для розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі нелінійного програмування використовувались методи математичного програмування, які реалізовані в пакеті MatLab.

## **6. Результати досліджень**

### **6.1. Визначення та опис базової тензорної моделі маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактору**

Першим кроком в процесі дослідження є вибір базової математичної моделі маршрутизації. Так, згідно проведеного аналізу [16, 18, 19], існуючі моделі маршрутизації розподіляють на графові та потокові. Як правило, використання графових моделей орієнтоване на мінімізацію умовної довжини розрахованого шляху, що загалом сприяє лише опосередкованому покращенню QoS-показників, але без гарантування їх заданих або гранично допустимих значень. При використанні поточкових моделей маршрутизації забезпечується більш детальне врахування як характеристик потоків пакетів, так і параметрів ІКМ, наприклад, пропускних здатностей каналів зв'язку, що сприяє підвищенню ефективності балансування навантаження з точки зору забезпечення QoE. Одним з відносно нових напрямків з математичного моделювання процесів

маршрутизації є використання тензорного підходу, який зарекомендував себе як ефективний засіб цілісного та багатоаспектного опису ІКМ [20, 21]. Тому, в даній роботі обрана потокова модель маршрутизації з її подальшим тензорним узагальненням для отримання умов забезпечення QoE за показником R-фактору з контролем міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів.

Нехай структура інфокомунікаційної мережі описується за допомогою одновимірної мережі:

$$S = (U, V),$$

де  $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$  – множина нульвимірних симплексів – вузлів (маршрутизаторів) мережі, а  $m$  – загальна кількість вузлів в мережі  $S$ . Множина одновимірних симплексів – гілок мережі  $V = \{v_z = (i, j); z = \overline{1, n}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  моделює канали зв'язку, де гілка  $v_z = (i, j)$  моделює  $z$ -й канал зв'язку, який з'єднує  $i$ -й та  $j$ -й маршрутизатори ІКМ через відповідний  $j$ -й інтерфейс, а  $n$  – загальна кількість гілок в мережі  $S$ . Для кожного каналу, що моделюється гілкою (дугою)  $v_z = (i, j) \in V$ , задається його пропускна здатність, яка буде позначатися як через  $\varphi_z$ , так і через  $\varphi_{i,j}$ , та вимірюватиметься в пакетах в секунду (1/с). Кожен маршрутизатор мережі має декілька інтерфейсів, через які він передає пакети інцидентним йому вузлам-сусідам. Причому номери інтерфейсів для кожного окремо взятого вузла відповідають номерам сусідніх вузлів, які підключаються через них. Тоді  $\varphi_{i,j}$  фактично визначає пропускну здатність  $j$ -го інтерфейсу  $i$ -го вузла.

Для реалізації адаптивної маршрутизації необхідно забезпечити розрахунок маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$ , які характеризують долю інтенсивності  $k$ -го потоку в каналі  $(i, j)$ . На маршрутні змінні накладаються наступні умови:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (1)$$

Умови збереження потоку на маршрутизаторах мережі з урахуванням можливих втрат пакетів, викликаних перевантаженням буфера черг, приймають вид [19, 20]:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^k = 1, \text{ якщо } k \in K, i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^k (1 - p_{j,i}^k) = 0, \text{ якщо } k \in K, i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^k (1 - p_{i,j}^k) = b^k, \text{ якщо } k \in K, i = d_k, \end{cases} \quad (2)$$

де  $K$  – множина потоків в мережі;  $s_k$  – маршрутизатор-відправник;  $d_k$  – маршрутизатор-отримувач пакетів  $k$ -го потоку;  $b^k$  – частка  $k$ -го потоку, що обслуговується мережею, тобто пакети якого успішно доставлені до

маршрутизатора-одержувача;  $p_{i,j}^k$  – імовірність втрат пакетів  $k$ -го потоку на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го маршрутизатору.

Якщо, наприклад, робота  $j$ -го інтерфейсу  $i$ -го маршрутизатора моделюється системою масового обслуговування з відмовами виду  $M/M/1/N$ , то імовірність втрат пакетів  $k$ -го потоку може бути розрахована наступним чином:

$$p_{i,j}^k = \frac{(1 - \rho_{i,j})(\rho_{i,j})^N}{1 - (\rho_{i,j})^{N+1}}, \quad (3)$$

де  $\rho_{i,j} = \frac{\sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k}{\varphi_{i,j}}$  – коефіцієнт використання  $j$ -го інтерфейсу на  $i$ -му вузлі;

$N = \Theta_{буф} + 1$  – максимальна кількість пакетів, яка може знаходитися на інтерфейсі, включаючи буфер ( $\Theta_{буф}$ ) та сам канал;  $\lambda_k^{(sum)}$  – середня інтенсивність  $k$ -го потоку пакетів (1/с) на вході в ІКМ, значення якої напряму визначає вимоги щодо пропускної здатності, необхідної для цього потоку.

Для забезпечення керованості процесом боротьби із перевантаженням каналів і черг в структуру моделі вводяться наступні обмеження [20]:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k < \varphi_{i,j} \text{ при } (i, j) \in V. \quad (4)$$

Тоді, для урахування можливих втрат пакетів інтенсивність агрегованого потоку в каналі  $(i, j)$  розраховується як:

$$\lambda_{i,j} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k). \quad (5)$$

Інтенсивність  $k$ -го потоку пакетів, які відкинуті (втрачені) на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го маршрутизатора, можна розрахувати за допомогою наступної формули:

$$r_{i,j}^k = \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k p_{i,j}^k. \quad (6)$$

Відповідно інтенсивність успішно переданих (тобто без втрат) пакетів  $k$ -го потоку у каналі зв'язку, який моделюється дугою  $(i, j)$ , визначається наступним чином:

$$\lambda_{i,j}^k = \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k). \quad (7)$$

У загальному вигляді QoS-вимоги щодо передачі мови при заданому типі термінального обладнання та використовуваному кодеку відповідно до рекомендацій ITU-T [13, 14] можуть бути записані в наступному вигляді:

$$R \geq R_{(cut)} \text{ при } R = R_0 - I_{dd}(T_a) - I_{e-eff}(P_{pl}), \quad (8)$$

де  $I_{dd}(T_a)$  – коефіцієнт зниження якості, обумовленого тривалою затримкою, як функція затримки в мережі, а  $I_{e-eff}(P_{pl})$  – коефіцієнт зниження якості, викликаного втратами мовних пакетів, які визначаються такими виразами:

$$I_{dd}(T_a) = \begin{cases} 0, & T_a \leq 100 \text{ мс}; \\ 25 \left[ (1 + X^6)^{\frac{1}{6}} - 3 \left( 1 + \left[ \frac{X^6}{3} \right]^{\frac{1}{6}} \right) + 2 \right], & T_a > 100 \text{ мс}; \end{cases} \quad (9)$$

$$I_{e-eff}(P_{pl}) = I_e + (95 - I_e) \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}}, \quad (10)$$

де  $X = \log \frac{T_a}{100}$ ;  $I_e$  – коефіцієнт зниження якості через використання низько швидкісних кодеків;  $T_a$  – середня міжкінцева затримка пакетів в мережі;  $P_{pl}$  – сумарна ймовірність втрат пакетів в мережі;  $B_{pl}$  – фактор, що враховує стійкість кодеку до втрат;  $BurstR$  – коефіцієнт «сплеску» втрат.

В ході забезпечення виконання умов (8) з урахуванням (9) і (10) важливо мати у своєму розпорядженні математичні вирази, які аналітично описують взаємозв'язок маршрутних змінних (1), характеристик трафіку, параметри мережі, показників міжкінцевої затримки  $T_a$  та ймовірність втрат пакетів  $P_{pl}$ . З урахуванням результатів, отриманих в роботах [18–20], доцільно застосувати вдосконалений тензорний підхід до моделювання процесів маршрутизації в інфокомунікаційних мережах.

## 6.2. Формалізація умов забезпечення якості обслуговування з використанням тензорної моделі мережі

Згідно тензорній формалізації [22–24], полюсами мережі  $S$  виступають вузли, що моделюють маршрутизатори, через які той чи інший потік пакетів надходить або вибуває з ІКМ. Для досліджень також будуть використовуватись наступні структурні характеристики мережі  $S$ :  $\kappa(S)$  – кількість базисних міжполюсних шляхів в мережі  $S$ ;  $\mathcal{G}(S)$  – кількість базисних внутрішніх вузлових пар в мережі  $S$ , де множина внутрішніх вузлових пар включає в себе всі вузлові пари, крім полюсної.

У випадку моделювання ІКМ зв'язною одновимірною мережею  $S$  наведені структурні характеристики пов'язані між собою такими залежностями:

$$\kappa(S) = n - m + 2; \quad \mathcal{G}(S) = m - 2. \quad (11)$$

На структурі телекомунікаційної мережі вводиться дискретний  $n$ -вимірний геометричний простір, тобто його розмір визначається кількістю каналів зв'язку в ІКМ. В залежності від аспекту розгляду ІКМ у введеному дискретному  $n$ -вимірному просторі можуть визначатись ряд систем координат (СК), в яких координатними осями виступатимуть різнотипні базисні шляхи [22–24]: гілки, контури, вузлові пари, розрізи тощо. В межах даної роботи у введеному дискретному  $n$ -вимірному просторі до уваги будуть прийняті ортогональні системи координат, в яких взаємопов'язано розглядаються наступні проекції тензорів основних функціональних параметрів ІКМ:  $\{v_z, z = \overline{1, n}\}$  – система координат гілок мережі, проекції тензорів в якій будуть позначатися індексом  $v$ ;  $\{\gamma_i, i = \overline{1, \kappa}\}$  – система координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар  $\{\varepsilon_j, j = \overline{1, \vartheta}\}$  мережі  $S$ , проекції тензора в якій будуть позначатися індексом  $\gamma\varepsilon$ . Ортогональність цих систем координат обґрунтовується тим, що відповідно до виразів (11) виконується умова:

$$n = \kappa(S) + \vartheta(S).$$

У введеному  $n$ -вимірному просторі інфокомунікаційна мережа відносно кожного окремо обраного потоку пакетів, для якого необхідно отримати умови забезпечення якості обслуговування, може бути описана за допомогою змішаного двовалентного тензора [21–23]:

$$Q = T \otimes \Lambda, \tag{12}$$

де  $\otimes$  – оператор тензорного множення;  $T$  – одновалентний коваріантний тензор середніх затримок пакетів;  $\Lambda$  – одновалентний контраваріантний тензор середніх інтенсивностей потоків в координатних шляхах мережі.

В загальному випадку компоненти змішаного двовалентного тензора  $Q$  (12) пов'язані між собою за допомогою відповідних метричних тензорів [22–24]:

$$T = E\Lambda \text{ та } \Lambda = GT, \tag{13}$$

де  $E$  – двічі коваріантний метричний тензор;  $G$  – двічі контраваріантний метричний тензор.

В індексній формі вирази (13) приймають такий вигляд:

$$\tau_j = e_{ji} \lambda^i \text{ та } \lambda^i = g^{ij} \tau_j, \quad (i, j = \overline{1, n}), \tag{14}$$

де  $\tau_j$  – середня затримка пакетів уздовж  $j$ -го координатного шляху (с);  $\lambda^i$  – середня інтенсивність потоку пакетів, які передаються уздовж  $i$ -го координатного шляху (1/с).



Тензорні рівняння (13) в системі координат гілок мережі набудуть такого вигляду:

$$T_v = E_v \Lambda_v \text{ та } \Lambda_v = G_v T_v, \quad (15)$$

де  $\Lambda_v$  та  $T_v$  – проекції тензорів  $\Lambda$  та  $T$  в СК гілок відповідно, які представлені  $n$ -вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів в каналах зв'язку ІКМ;  $E_v = \|e_{ij}^v\|$  – проекція двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в СК гілок, яка представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею;  $G_v = \|g_v^{ij}\|$  – проекція двічі контраваріантного метричного тензора  $G$ , яка представлена також відповідною діагональною  $n \times n$ -матрицею.

При цьому має місце наступне правило:

$$E_v = [G_v]^{-1}, \quad (16)$$

де  $[\cdot]^{-1}$  – операція обернення матриці.

Аналогічно в системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар мережі тензорні рівняння (13) матимуть такий вид:

$$T_{\gamma\epsilon} = E_{\gamma\epsilon} \Lambda_{\gamma\epsilon} \text{ та } \Lambda_{\gamma\epsilon} = G_{\gamma\epsilon} T_{\gamma\epsilon}, \quad (17)$$

де  $\Lambda_{\gamma\epsilon}$  та  $T_{\gamma\epsilon}$  – проекції тензорів  $\Lambda$  та  $T$  в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, які представлені  $n$ -вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів в відповідних міжполюсних шляхах та внутрішніх вузлових парах ІКМ;  $E_{\gamma\epsilon} = \|e_{ij}^{\gamma\epsilon}\|$  – проекція двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, яка представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею;  $G_{\gamma\epsilon} = \|g_{\gamma\epsilon}^{ij}\|$  – проекція двічі контраваріантного метричного тензора  $G$  в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, яка представлена також відповідною діагональною  $n \times n$ -матрицею.

По аналогії з (16) справедливим є правило:

$$E_{\gamma\epsilon} = [G_{\gamma\epsilon}]^{-1}. \quad (18)$$

Закон контраваріантного координатного перетворення при зміні розглянутих СК може бути описаний несингулярною  $n \times n$ -матрицею  $C_{\gamma\epsilon}^v$  [23–25]:

$$\Lambda_v = C_{\gamma\epsilon}^v \Lambda_{\gamma\epsilon}, \quad (19)$$

де  $n$ -вимірний вектор  $\Lambda_{\gamma\varepsilon}$ , який є проекцією тензора  $\Lambda$  в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, має таку структуру:

$$\Lambda_{\gamma\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Lambda_{\gamma} \\ \dots \\ \Lambda_{\varepsilon} \end{bmatrix}; \quad \Lambda_{\gamma} = \begin{bmatrix} \lambda_{\gamma}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{\gamma}^j \\ \vdots \\ \lambda_{\gamma}^{\kappa} \end{bmatrix}; \quad \Lambda_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \lambda_{\varepsilon}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{\varepsilon}^p \\ \vdots \\ \lambda_{\varepsilon}^g \end{bmatrix}, \quad (20)$$

де  $\Lambda_{\gamma}$  –  $\kappa$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку вздовж базисних міжполюсних шляхів мережі;  $\Lambda_{\varepsilon}$  –  $g$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку між вузлами, які утворюють базисні внутрішні вузлові пари;  $\lambda_{\gamma}^j$  та  $\lambda_{\varepsilon}^p(t)$  – інтенсивності потоку вздовж  $j$ -го базисного міжполюсного шляху ( $\gamma_j$ ) та потоку, що надходить в мережу та виходить з мережі через вузли, які створюють  $p$ -ту базисну внутрішню вузлову пару ( $\varepsilon_p$ ) відповідно.

Координати проекції двічі контраваріантного метричного тензора  $G$  в системі координат гілок мережі можуть бути представлені значеннями діагональних елементів матриці  $G_v$  [17–19]:

$$g_v^{ii} = \frac{\lambda_i (1 - \rho_i^{N+1})(1 - \rho_i) \lambda_v^i}{\rho_i - \rho_i^{N+2} - (N+1)\rho_i^{N+1}(1 - \rho_i)}, \quad (21)$$

де  $\rho_i$  – це коефіцієнт використання  $i$ -го каналу зв'язку, який розраховується згідно виразу (3), а саме  $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\varphi_i}$ ;  $\lambda_i$  – це сумарна інтенсивність всіх потоків пакетів, які направляються до  $i$ -го каналу зв'язку ІКМ;  $\lambda_v^i$  – інтенсивність потоку пакетів, який розглядається з точки зору побудови тензорної моделі, в  $i$ -му каналі зв'язку ІКМ.

Подальші дослідження будуть базуватись на тому, що середня міжкінцева затримка пакетів, які передаються між заданою парою маршрутизаторів (полюсами мережі) за допомогою множини маршрутів  $P$ , розраховується за такою формулою:

$$\tau_{MP} = \sum_{p=1}^{|P|} x_p \tau_p, \quad (22)$$

де  $x_p$  – частка потоку пакетів, які були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою  $p$ -го шляху;  $\tau_p$  – середня затримка пакетів, які передавались вздовж  $p$ -го шляху в ІКМ;  $|P|$  – потужність множини  $P$ , значення якої визначає загальну кількість доступних для маршрутизації шляхів.

В загальному випадку для розрахунку  $x_p$  може бути використано вираз:

$$x_p = \frac{\lambda_p}{\lambda^*}, \quad (23)$$

де  $\lambda_p$  – інтенсивність потоку пакетів, які були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою  $p$ -го шляху;  $\lambda^*$  – інтенсивність потоку пакетів, які були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою всіх доступних шляхів з множини  $P$ . За відсутності втрат пакетів в ІКМ  $\lambda^* = \lambda^{(вум)}$ .

Згідно виразів (15)–(19), (21) можна записати закон перетворення проекцій двічі коваріантного тензора  $E$  при зміні систем координат – від базису гілок до базису міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар:

$$E_{\gamma\epsilon} = (C_{\gamma\epsilon}^v)^t E_v C_{\gamma\epsilon}^v. \quad (24)$$

Проекція метричного тензора в системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар допускає таке декомпозиційне представлення:

$$\left\| \begin{array}{c|c} E_{\gamma\epsilon}^{(1)} & E_{\gamma\epsilon}^{(2)} \\ \hline \text{---} & \text{---} \\ E_{\gamma\epsilon}^{(3)} & E_{\gamma\epsilon}^{(4)} \end{array} \right\| = E_{\gamma\epsilon}, \quad (25)$$

де  $E_{\gamma\epsilon}^{(1)}$  – квадратна підматриця розміру  $\kappa \times \kappa$ ;  $E_{\gamma\epsilon}^{(2)}$  – квадратна підматриця розміру  $\mathcal{G} \times \mathcal{G}$ ;  $E_{\gamma\epsilon}^{(3)}$  – підматриця розміру  $\kappa \times \mathcal{G}$ ;  $E_{\gamma\epsilon}^{(4)}$  – підматриця розміру  $\mathcal{G} \times \kappa$ .

Тоді в результаті проведених перетворень в (24) з врахуванням (20) та (25) отримаємо вираз для розрахунку середньої міжкінцевої затримки пакетів в ІКМ (22), яка за фізичним змістом відповідає  $T_a$  у виразі (9):

$$\tau_{MP} = \frac{1}{\lambda^*} \left( \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma + \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{(2)} \Lambda_\epsilon \right). \quad (26)$$

В термінах описаної базової моделі (2) вираз для розрахунку ймовірності втрат пакетів  $k$ -го потоку в ІКМ можна представити в наступному вигляді:

$$p_\delta^k = 1 - b^k. \quad (27)$$

Важливо зазначити, що для розрахунку R-фактору (8)  $p_\delta^k$  за фізичним змістом відповідає значенню  $P_{pl}$  в моделі (8)–(10).

Проекції метричних тензорів  $E$  та  $G$  залежать від значень маршрутних змінних наступним чином:

$$\lambda_z = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \lambda_v^z = \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k). \quad (28)$$

У виразах (28) визначаються інтенсивності потоків (агрегованого та окремо  $k$ -го) в одному й тому ж каналі зв'язку ІКМ, який в межах наскрізної нумерації моделюється гілкою  $v_z$ .

Для забезпечення адаптивності маршрутних рішень в даній роботі критерієм оптимальності обрано мінімум наступної лінійної цільової функції:

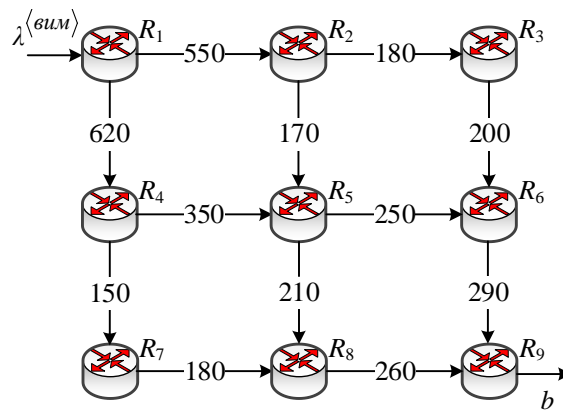
$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k, \quad (29)$$

де  $h_{i,j}^x$  – маршрутна метрика каналу зв'язку, який з'єднує  $i$ -й та  $j$ -й маршрутизатори ІКМ та відображає ті чи інші функціональні параметри цього каналу.

Таким чином, задача адаптивної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі із забезпеченням сприймаємої якості обслуговування за  $R$ -фактором сформульована в оптимізаційній формі. Критерієм оптимальності маршрутних рішень виступав мінімум лінійної форми (29), а обмеженнями – вирази (1), (2), (4) та (8). Ця оптимізаційна задача відноситься до класу задач нелінійного програмування, для розв'язання якої існує досить широкий спектр методів. В даному дослідженні для розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі використовувався пакет MatLab, який застосовував методи внутрішньої точки (interior-point), послідовного квадратичного програмування (SQP) або аналітичні алгоритми довірчої області (trust-region-reflective) для вирішення завдань з обмеженнями.

### 6.3. Дослідження тензорної моделі адаптивної маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за $R$ -фактором

Для оцінки адекватності та ефективності розробленої тензорної моделі адаптивної маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за  $R$ -фактором, яка представлена виразами (1)–(29) було проведено дослідження для фрагменту інфокомунікаційної мережі, який показаний на рис. 1. Мережа складалась з дев'яти маршрутизаторів та дванадцяти каналів зв'язку, в розривах яких вказана їх пропускна здатність (1/с). Функціонування кожного з інтерфейсів маршрутизаторів моделювалось системою масового обслуговування  $M/M/1/N$ , а ємність буфера становила 30 пакетів ( $N=30$ ). Інтенсивність трафіку, що надходить в мережу на перший маршрутизатор  $R_1$  та призначається для дев'ятого маршрутизатора  $R_9$ , складала 350 1/с.



**Рис. 1.** Фрагмент інфокомунікаційної мережі, що досліджувався

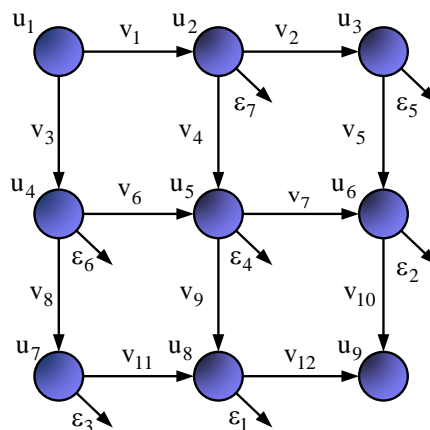
Вимоги по рівню QoE задавалися R-фактором, відповідно до виразу (8) і даних, згідно [13, 14], наведених в табл. 1.

**Таблиця 1**

Співвідношення між значенням R-фактором та якістю сприйняття користувача [14]

R-значення	Задоволеність користувача
90	Дуже задоволений
80	Задоволений
70	Деякі користувачі не задоволені
60	Багато користувачів не задоволені
50	Майже всі користувачі незадоволені

Для наочності, згідно тензорній геометризації мережі, на рис. 2 представлено визначення для мережі  $S$  базисних внутрішніх вузлових пар, коли полюсами виступали вузли  $u_1$  (маршрутизатор  $R_1$ ) та  $u_9$  (маршрутизатор  $R_9$ ), а основні структурні характеристики приймали такі значення:  $n = 12$ ,  $\kappa(S) = 5$ ,  $\vartheta(S) = 7$ .



**Рис. 2.** Приклад одновимірної мережі  $S$ , яка моделює структуру інфокомунікаційної мережі, та визначення базисних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар

Нехай на структурі мережі (рис. 2), в якості базисних виступали наступні міжполюсні шляхи:

$$\gamma_1 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_3 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_2 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_7 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_3 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_4 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_5 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9.$$

В подальшому було проведено дослідження впливу рівня QoE-вимог на характер маршрутних рішень при маршрутизації потоку з інтенсивністю  $\lambda^{(вим)} = 350$  1/с. Значення R-фактору змінювались від 50 до 90 (табл. 1).

Характеристики розрахованих шляхів та рівень якості обслуговування, який вони забезпечували за показниками R-фактору, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів в ІКМ, детально представлені в табл. 2.

**Таблиця 2**

Результати розрахунків QoE-рівня за показником R-фактору

Розраховані шляхи		$\lambda_p, 1/c$	$\tau_p, мс$	$p_0$	$\tau_{MP}, мс$	$b, 1/c$
$R = R_{(вим)} = 50$						
1	R1→R4→R5→R6→R9	225,8831	98,8	0,0359	87,3 мс	337,4486
2	R1→R4→R5→R8→R9	111,5655	63,8			
$R = R_{(вим)} = 75$						
1	R1→R2→R3→R6→R9	23,4593	33,2	0,0102	67,7	346,4335
2	R1→R4→R5→R6→R9	215,1730	80,3			
3	R1→R4→R5→R8→R9	107,8011	49,9			
$R = R_{(вим)} = 90$						
1	R1→R2→R3→R6→R9	28,8131	30,8	0,0015	49,4	349,4754
2	R1→R2→R5→R6→R9	21,013	45,1			
3	R1→R4→R5→R6→R9	179,4199	58,7			
4	R1→R4→R5→R8→R9	120,2294	40,6			

Слід зазначити, що в результаті розрахунків встановлено, що запропонована модель адаптивної маршрутизації в ІКМ забезпечувала виконання вимог щодо рівня QoE, тобто для всіх випадків розраховані значення R-фактору співпадали з вимогами  $R_{(вим)}$ . Адаптивний характер маршрутних рішень визначався тим, що з підвищенням рівня QoE-вимог збільшувався об'єм задіяного мережного ресурсу, наприклад, кількість використаних шляхів, а, відповідно, і ресурс пропускної здатності каналів зв'язку ІКМ. Якщо при мінімально допустимих QoE-вимогах, тобто при  $R_{(вим)} = 50$ , необхідно було

використати лише два маршрути (табл. 2), то при  $R_{(вим)} = 75$  задіювались вже три маршрути. При подальшому зростанні вимог ( $R_{(вим)} = 90$ ) слід застосувати чотири шляхи та відповідний каналний ресурс (табл. 2).

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* У порівнянні з аналогами завдяки використанню запропонованої моделі адаптивної маршрутизації вдалося забезпечити заданий QoE-рівень за показником R-фактору з мінімальним використанням мережного ресурсу. Отримати такі результати вдалося за рахунок використання в моделі вдосконаленого тензорного підходу щодо отримання оновлених виразів для розрахунку середньої затримки та ймовірності втрат пакетів.

*Weaknesses.* Головним недоліком розробленої моделі є ускладнення математичного опису ІКМ, що пов'язано з її тензорною формалізацією, а також необхідність у розв'язанні досить складної оптимізаційної задачі класу нелінійного програмування для визначення маршрутних змінних. Проте загалом це не знижує значимість отриманого результату відносно його науково-прикладної цінності.

*Opportunities.* За допомогою отриманих результатів досліджень представляється можливим забезпечити виконання заданих QoE-вимог за показником R-фактору до послуг, що надаються кінцевим користувачам. При цьому, використання запропонованої моделі характеризується більшою ефективністю щодо балансування навантаження за множиною маршрутів в ІКМ. Про це свідчило те, що при заданому рівні рейтингу якості, з ростом інтенсивності трафіку, що надходить до ІКМ, здійснювалось поступове збільшення кількості задіяних маршрутів. Тобто мережний ресурс розподілявся поступово та ефективніше на 7–10 % відносно відомих аналогів, які під час вирішення цієї ж задачі, одразу використовують всі доступні маршрути.

*Threats.* Реалізація запропонованої потокової моделі адаптивної маршрутизації з забезпеченням QoE-рівня за показником R-фактору наразі є складною задачею, яка потребує перегляду сучасних протоколів маршрутизації для повноцінного впровадження в сучасній інфокомунікаційній мережі.

## 8. Висновки

1. В ході дослідження за основу було обрано поточкову модель маршрутизації (1)–(7), яка враховувала ймовірні втрати пакетів, викликані перевантаженням елементів мережі. Дана модель була представлена умовами реалізації багатознакової стратегії маршрутизації (1), збереження потоку (2) та запобігання перевантаження каналів зв'язку (4).

2. Для отримання в аналітичному вигляді умов забезпечення QoE за показником R-фактору (8) було здійснено тензорний опис інфокомунікаційної мережі (11)–(28). Це дозволило отримати аналітичні вирази для розрахунку середньої міжкінцевої затримки (26) та ймовірності втрат пакетів (27), які були використані для формування QoE-умов (8).

3. Для проведення дослідження задачу адаптивної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі із забезпеченням QoE-рівня за R-фактором було сформульовано в оптимізаційній формі. В рамках запропонованої моделі (1)–(28) рішення технологічної задачі адаптивної маршрутизації було зведено до розв'язання оптимізаційної задачі нелінійного програмування з розрахунку маршрутних змінних (1). Критерієм оптимальності маршрутних рішень виступав мінімум лінійної форми (29) з відповідними обмеженнями (1), (2), (4) та (8). Як показали результати дослідження (табл. 2), використання критерію оптимальності (29) дозволило забезпечити адаптивний характер маршрутних рішень. Це підтверджувалось тим, що при підвищенні QoE-вимог здійснювалось зростання об'ємів використаного мережного ресурсу – кількості маршрутів та пропускну здатності каналів зв'язку.

4. Для оцінки адекватності та ефективності розробленої тензорної моделі адаптивної маршрутизації із забезпеченням QoE-рівня за R-фактором було проведено дослідження для фрагменту інфокомунікаційної мережі. В результаті розрахунків було встановлено, що запропонована модель адаптивної маршрутизації забезпечувала виконання QoE-вимог, тобто для всіх випадків розраховані значення R-фактору співпадали з вимогами  $R_{(вим)}$ . Адаптивний характер маршрутних рішень визначався тим, що з підвищенням рівня QoE-вимог збільшувався об'єм задіяного мережного ресурсу, наприклад, кількість використаних шляхів, а, відповідно, і ресурс пропускну здатності каналів зв'язку ІКМ. Таким чином, проведене дослідження на фрагменті інфокомунікаційної мережі дозволило оцінити адекватність і ефективність запропонованого підходу.

### Література

1. Janevski, T., Jankovic, M., Markus, S. (2017). *Quality of service regulation manual*. Telecommunication development Bureau, 173.
2. Mellouk, A., Tran, H. A., Hoceini, S. (2013). *Quality of Experience for Multimedia: Application to Content Delivery Network Architecture*. J. Wiley and Sons, 235. doi: <http://doi.org/10.1002/9781118649367>
3. Barreiros, M., Lundqvist, P. (2016). *QoS-Enabled Networks: Tools and Foundations*. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley, 254. doi: <http://doi.org/10.1002/9781119109136>
4. Stallings, W. (2015). *Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud*. Addison-Wesley Professional, 560.
5. Dubey, R. K., Kumar, A. (2015). Comparison of subjective and objective speech quality assessment for different degradation/noise conditions. *International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, 261–266. doi: <http://doi.org/10.1109/icspcom.2015.7150659>
6. Liotou, E., Tsolkas, D., Passas, N. (2016). A roadmap on QoE metrics and models. *23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*. Thessaloniki, 1–5. doi: <http://doi.org/10.1109/ict.2016.7500363>



7. Arndt, S., Antons, J.-N., Gupta, R., ur Rehman Laghari, K., Schleicher, R., Moller, S., Falk, T. H. (2013). Subjective quality ratings and physiological correlates of synthesized speech. *Fifth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*. Klagenfurt am Worthersee, 152–157. doi: <http://doi.org/10.1109/qomex.2013.6603229>
8. Mello, C. A. B., Albuquerque, R. Q. (2015). Reference-Free Speech Quality Assessment for Mobile Phones Based on Audio Perception. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Kowloon, 2413–2417. doi: <http://doi.org/10.1109/smc.2015.422>
9. Gaoxiong, Y., Wei, Z. (2012). The Perceptual Objective Listening Quality Assessment algorithm in telecommunication: Introduction of ITU-T new metrics POLQA. *1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC)*. Beijing, 351–355. doi: <http://doi.org/10.1109/iccchina.2012.6356906>
10. Radwan, O. (2017). An architectural model for managing quality of experience of web services. *Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. Milan, 513–518. doi: <http://doi.org/10.1109/icufn.2017.7993837>
11. Hikmatullah, M. R., Haryadi, S. (2017). Perceptual evaluation of speech quality over the top call service. *3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*. Palembang, 181–185. doi: <http://doi.org/10.1109/icwt.2017.8284163>
12. Mancas, C., Mocanu, M. (2013). Enhancing QoS/QoE in multimedia networks. *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*. Budapest, 637–641. doi: <http://doi.org/10.1109/iccw.2013.6649311>
13. *ITU-T G.109*. (2007). Amendment 1 New Appendix I – The E-model-based quality loops for predicting speech transmission quality and user satisfaction from time-varying transmission impairments, 18.
14. *ITU-T G.107*. (2015). The E-model: a computational model for use in transmission planning.
15. Seppänen, J., Varela, M., Sgora, A. (2014). An autonomous QoE-driven network management framework. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 25 (3), 565–577. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jvcir.2013.11.010>
16. Lemeshko, O. V., Yeremenko, O. S., Nevzorova, O. S. (2020). *Potokovi modeli ta metodi marshrutizatsii v infokomunikatsiynikh merezhakh: vidmovostiykist, bezpeka, masshtabovanist*. Kharkiv: NURE, 308. doi: <http://doi.org/10.30837/978-966-659-282-1>
17. Kron, G. (1949). *Tensor analysis of networks*. J. Wiley and Sons, 635.
18. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Anad Alsaleem, N. Y. (2018). Development of the tensor model of multipath qoe-routing in an infocommunication network with providing the required quality rating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (2 (95)), 40–46. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>
19. Lemeshko, O., Evseeva, O., Yevdokymenko, M. (2018). Tensor Flow-Based Model of Quality of Experience Routing. *14th International Conference on Advanced*

*Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv, 1005–1008. doi: <http://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336364>

20. Yevdokymenko, M. (2019). Routing Tensor Model with Providing Multimedia Quality. *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. Kyiv, 819–824, doi: <http://doi.org/10.1109/picst47496.2019.9061280>

21. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O., Nevzorova, O., Snihurov, A., Kovalenko, T. (2019). Fast ReRoute Model with VoIP Quality of Experience Protection. *3rd IEEE International Conference Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*. Lviv, 16–21, doi: <http://doi.org/10.1109/aiact.2019.8847918>

22. Lemeshko, O. V., Yeremenko, O. S., Hailan, A. M. (2016). QoS solution of traffic management based on the dynamic tensor model in the coordinate system of interpolator paths and internal node pairs. *Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo): Proceedings of the International Conference*, 1–6. doi: <http://doi.org/10.1109/ukrmico.2016.7739625>

23. Lemeshko, O., Yeremenko, O. (2016). Routing Tensor Model Presented in the Basis of Interpolar Paths and Internal Node Pairs. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Third International Scientific-Practical Conference*. Kharkiv, 201–204. doi: <http://doi.org/10.1109/infocommst.2016.7905381>

24. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Hu, Z., Yeremenko, O. (2020). Inter-domain routing method under normalized Quality of Service based on hierarchical coordination. *CEUR Workshop Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS)*, 2608, 394–408.

25. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M. (2018). Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection. *IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. Lviv, 135–138. doi: <http://doi.org/10.1109/stc-csit.2018.8526707>