

УДК 621.391

І. В. СТРЕЛКОВСЬКА, доктор техн. наук, професор;

І. М. СОЛОВСЬКА, доцент,

Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова

## Маршрутизація в мережі MPLS-TE з додатковими напрямками передавання трафіку

**Запропоновано застосування вузлового тензорного методу для розв'язування задачі маршрутизації в мережі MPLS-TE з використанням додаткових напрямів передавання трафіку. Здійснено вибір додаткового напрямку маршрутизації трафіку за критерієм мінімального часу доставляння пакетів, що забезпечує збалансоване завантаження та відмовостійкість мережі.**

**Ключові слова:** вузловий тензорний метод; багатопляхова маршрутизація трафіку; додатковий напрям маршрутизації; час затримки пакетів.

### Вступ і постановка задачі

Характерна особливість розвитку сучасних телекомунікаційних мереж полягає в упровадженні концептуально нової транспортної мережі на основі технології багатопроTOCOLьної комутації за мітками MPLS (*MultiProtocol Label Switching*), яка дозволяє забезпечити передавання пакетного трафіку з підтриманням належної якості обслуговування QoS (*Quality of Service*), а також на базі концепції інжинірингу трафіку TE (*Traffic Engineering*) забезпечити при цьому ефективне використання доступних ресурсів мережі.

Збалансоване завантаження ресурсів мережі MPLS-TE досягається, насамперед, вибором оптимального маршруту проходження трафіку з використанням процедур резервування та розподілення навантаження мережі, збалансування трафіку й застосування механізмів запобігання перевантаженням і забезпечення відмовостійкості мережі [1; 2].

Функціонування мережі MPLS-TE спирається на використання маршрутів передавання трафіку за допомогою односпрямованих тунелів TE-tunnel, що об'єднують послідовність маршрутизаторів LSR (*Label Switch Router*), вибраних з урахуванням максимальної завантаженості ресурсів мережі та виконанням вимог QoS. Для відмовостійкої маршрутизації в мережі MPLS-TE використовується швидка перемаршрутизація пакетів FRR (*Fast Re Route*), яка в разі відмови маршруту дозволяє спрямувати трафік за запасним, попередньо сконфігурованим TE-tunnel маршрутом, вибраним згідно з критерієм мінімального часу затримки пакетів [1; 2].

Розв'язування задач маршрутизації трафіку в мережі MPLS-TE має на меті вибір оптимального маршруту проходження трафіку за умов раціонального завантаження мережних ресурсів. Що ж до ефективності їх розв'язання, то вона оцінюється підтримкою нормативних значень характеристик якості QoS.

Одне із вирішень, яке дозволяє забезпечити збалансоване завантаження ресурсів мережі та її відмовостійкість, полягає в організації додаткових (обхідних) напрямів маршрутизації трафіку. Саме під час експлуатації мережі часто постає необхідність розвантаження окремих маршрутів, завантаженість яких достатньо висока. Тоді можна задіяти додатковий, попередньо сконфігурований маршрут для збалансування трафіку з підтриманням необхідного рівня якості обслуговування QoS.

Отже, завдання маршрутизації в мережі MPLS-TE з додатковими напрямками передавання трафіку слід розглядати як беззаперечно актуальне.

### Аналіз літературних джерел

Розв'язання поставленої задачі раніше виконувалося здебільшого за допомогою методів теорії телеграфіку та теорії графів. Зазвичай ці задачі з різним ступенем детальності розв'язувалися незалежно одна від одної. У [3] подано огляд технологічних і теоретичних розв'язань задач багатопляхової маршрутизації трафіку та доведено, що найбільшої уваги заслуговують тут тензорні методи маршрутизації трафіку.

Зазначені методи дозволяють урахувувати потоковий характер трафіку та в рамках єдиного тензорного методу одночасно досліджувати структурні характеристики й функціональні властивості мережі, задовольняючи потреби щодо відповідної якості обслуговування QoS.

Автори в [4] розглянули тензорну модель телекомунікаційної мережі в системах координат контурів і вузлових пар. Було здобуто також результати стосовно динаміки зміни міжкінцевої затримки пакетів, імовірності своєчасної їх затримки та їхнього джитера для різних структур мережі. Раніше автори в [5] подали розв'язання задачі управління трафіком у мережі MPLS-TE з використанням вузлового тензорного методу.

Зрештою цей метод дозволяє за умови відомих значень інтенсивності трафіку трактів мережі та довжини вихідної пакетної черги розв'язувати значний клас задач маршрутизації трафіку для мереж різної топології та технології вибором певної послідовності мережних вузлів за заданим критерієм — часом затримки пакетів з урахуванням особливостей структури та механізмів функціонування мережі [6; 7].

**Мета та завдання дослідження**

**Мета цієї статті** — розв'язання задачі маршрутизації в мережі MPLS-TE за допомогою організації додаткових маршрутів передавання трафіку.

Організація попередньо сконфігурованих маршрутів передавання трафіку дозволяє розвантажити окремі маршрути та збалансувати трафік у мережі MPLS-TE з підтриманням необхідного рівня якості обслуговування QoS. Цим самим забезпечується збалансоване завантаження ресурсів мережі з відмовостійкою маршрутизацією за умови ефективного використання доступних мережних ресурсів.

**Розв'язання задачі маршрутизації в мережі MPLS-TE з додатковими напрямками передавання трафіку**

Розглянемо розв'язання задачі маршрутизації в мережі MPLS-TE за допомогою вузлового тензорного методу за умови, що між мережними вузлами крім основних маршрутів існують додаткові маршрути передавання трафіку, які дозволяють збалансувати його та запобігти можливим перевантаженням і відмовам маршрутів.

Узявши до уваги, що додатковий маршрут має розраховуватися одночасно з основним згідно зі структурною схемою мережі MPLS-TE (рис. 1), задамо як основні, так і додаткові напрями маршрутизації трафіку.

Відповідно до [3; 4] фрагмент мережі MPLS-TE подамо у вигляді мультиграфа  $G(N, V)$ , де  $N = \{N_j, j = 1, 6\}$  — множина вершин, що являють собою вузли мережі — маршрутизатори LSR, а  $V = \{v_i, i = \overline{1, 17}\}$  — множина дуг, які моделюють гілки мережі, тобто її тракти, десять з яких ( $v_1 - v_{10}$ ) основні, а сім ( $v_{11} - v_{17}$ ) — додаткові.

Раніше в [5; 6] вихідна структура мережі розглядалась у вигляді простого графа (скінченного графа без петель і кратних ребер). У досліджуваній мережі MPLS-TE існують додаткові напрями, тому тут використовується мультиграф, який дозволяє описувати мережу, в якій одну й ту саму пару вершин

сполучає кілька дуг [7; 8], застосовуючи при цьому вузловий тензорний метод.

Нехай передавання трафіку виконується в напрямі від маршрутизатора  $N_1$  LSR-1 мережі MPLS-TE до маршрутизатора  $N_6$  LSR-6 (на структурній схемі цей напрям зазначено штрихпунктирною лінією). Задамо основні маршрути TE-tunnel передавання трафіку в мережі  $N_1 \rightarrow N_6$  ( $v_5$ ),  $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6$  ( $v_1, v_4, v_9$ ),  $N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6$  ( $v_2, v_6, v_{10}$ ),  $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6$  ( $v_1, v_7, v_{10}$ ),  $N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6$  ( $v_2, v_3, v_7, v_{10}$ ),  $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6$  ( $v_1, v_7, v_8, v_9$ ),  $N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6$  ( $v_2, v_3, v_7, v_8, v_9$ ),  $N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6$  ( $v_2, v_6, v_8, v_9$ ), а також додаткові (які зображено пунктирними лініями)

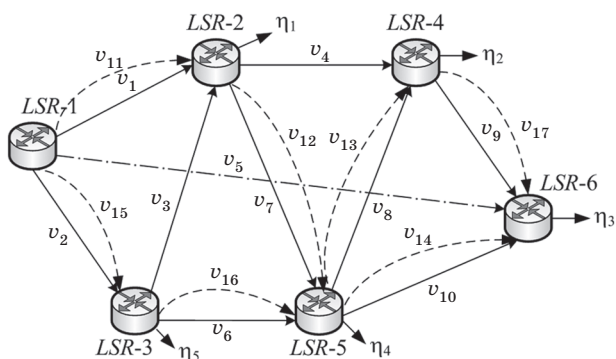


Рис. 1. Структурна схема мережі MPLS-TE з додатковими напрямками передавання трафіку у вигляді мультиграфа

$$N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 (v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{17}), N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 (v_{15}, v_{16}, v_{14}),$$

$$N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 (v_{11}, v_{12}, v_{14}), N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 (v_{15}, v_{16}, v_{13}, v_{17}).$$

Знайдемо часові затримки пакетів  $T_v$  у трактах та  $T_{\eta}$  на маршрутизаторах LSR мережі MPLS-TE, коли між мережними вузлами (маршрутизаторами LSR) існують як основні, так і додаткові маршрути TE-tunnel передавання трафіку, скориставшись вузловим тензорним методом, який автори запропонували в [5; 6; 9].

Відповідно до [5; 6] запишемо базисну матрицю  $B_{\eta}$  вузлових пар згідно зі структурою розглядуваної мережі (див. рис. 1) у вигляді

$$B_{\eta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Значення середньої інтенсивності  $L_v$ , тис. пакетів/с, трафіку в трактах мережі наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Середня інтенсивність  $L_v$ , тис. пакетів/с, трафіку в трактах мережі

Номер тракту	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Інтенсивність трафіку	700	900	300	500	0	400	400	600	900
Номер тракту	10	11	12	13	14	15	16	17	
Інтенсивність трафіку	1000	400	500	300	300	500	400	300	

Подамо довжину вихідної пакетної черги, яка передається від маршрутизатора  $N_1$  до маршрутизатора  $N_5$ , компонентами тензора середньої довжини пакетної черги

$$H_v^+ = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 150 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^t. \quad (2)$$

Для визначення часових затримок пакетів  $T_v$  у трактах та  $T_\eta$  на маршрутизаторах LSR мережі MPLS-TE скористаємось формулою Літтла, яка згідно з [5; 6] у тензорному поданні набирає вигляду

$$h_i = l^{i\alpha} \tau_{i\alpha}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

де  $h_i$  — середня довжина пакетної черги;  $l^i$  — середня інтенсивність трафіку;  $\tau_i$  — середній час затримки пакетів в  $i$ -му тракту;  $n$  — кількість трактів;  $\alpha$  — індекс підсумування.

Запишемо інваріантне рівняння (3), подане в тензорному вигляді згідно з [5; 6], у системах координат (СК) гілок і вузлових пар мережі:

$$H_v = L_v T_v, \quad H_\eta = L_\eta T_\eta, \quad (4)$$

де  $H_v, H_\eta$  — коваріантний тензор середньої довжини пакетної черги в СК відповідно гілок і вузлових пар;  $T_v, T_\eta$  — коваріантний тензор середньої затримки передавання пакетів у СК відповідно гілок і вузлових пар;  $L_\eta$  — контраваріантний тензор середньої інтенсивності трафіку в СК вузлових пар мережі.

Тензор  $T_\eta$  часу затримки пакетів на маршрутизаторах LSR визначається з виразу (4):

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

Перетворення проєкцій тензорів при зміні СК виконуються згідно з [5; 6]:

$$T_v = B_\eta^t T_\eta, \quad H_\eta = B_\eta H_v^+, \quad L_\eta = B_\eta L_v B_\eta^t, \quad (6)$$

де  $B_\eta$  — матриця базисних вузлових пар;  $H_v^+$  — тензор вихідної пакетної черги в СК гілок мережі.

Аналогічно [5; 6], визначимо завантаженість маршрутизаторів LSR мережі при передаванні вихідної пакетної черги, виконавши розрахунок проєкцій тензора  $H_\eta$  довжини пакетної черги у СК вузлових пар мережі. Згідно з (6), а також заданими виразом (1) базисної матриці  $B_\eta$  вузловими парами і виразом (2) тензора  $H_v^+$  середньої довжини пакетної черги дістаємо:

$$H_\eta = (0 \ 0 \ 150 \ 0 \ 0)^t. \quad (7)$$

Знайдемо тензор  $L_\eta$  середніх інтенсивностей трафіку, компоненти якого в СК вузлових пар визначають середні інтенсивності трафіку кожного маршрутизатора LSR мережі. Використовуючи рівняння (6), відомі значення середньої інтенсивності  $L_v$  трафіку в трактах мережі згідно з табл. 1, а також базисну матрицю  $B_\eta$  вузлових пар, задану виразом (1), знаходимо

$$L_\eta \approx \begin{pmatrix} 2800 & -500 & 0 & -900 & -300 \\ -500 & 2600 & -1200 & -900 & 0 \\ 0 & -1200 & 2500 & -1300 & 0 \\ -900 & -900 & -1300 & 3900 & -800 \\ -300 & 0 & 0 & -800 & 2500 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Скориставшись виразами (5), (7) і (8), знайдемо значення середнього часу затримки пакетів на кожному мережному маршрутизаторі LSR, виконавши розрахунок проєкцій тензора  $T_\eta$  у СК вузлових пар:

$$T_\eta \approx 10^{-3} \begin{pmatrix} 0,622 & 0,507 & 0,488 & 0,469 & 0,225 \\ 0,504 & 1,219 & 0,999 & 0,796 & 0,316 \\ 0,488 & 0,999 & 1,323 & 0,852 & 0,331 \\ 0,469 & 0,796 & 0,852 & 0,903 & 0,345 \\ 0,225 & 0,316 & 0,331 & 0,345 & 0,538 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 150 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0,073 \\ 0,149 \\ 0,198 \\ 0,128 \\ 0,049 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Визначимо час затримки пакетів, с, для кожного тракту мережі згідно з виразами (1), (6) і (9), виконавши розрахунок проєкцій тензора  $T_v$  у СК гілок мережі. Результати розрахунків зведемо в табл. 2.

Таблиця 2

Значення середньої тривалості  $T_v$  затримки, с, пакетів у трактах мережі

Номер тракту	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Час затримки	0,073	0,049	0,023	0,077	0,198	0,078	0,055	0,022	0,049
Номер тракту	10	11	12	13	14	15	16	17	
Час затримки	0,071	0,073	0,055	0,022	0,071	0,049	0,078	0,049	

Результати розрахунків значень середнього часу  $T_\eta$  затримки пакетів у маршрутизаторах LSR мережі MPLS-TE та в трактах, які їх сполучають, для мережі з додатковими напрямками передавання трафіку унаочнює рис. 2.

Ураховуючи, що значення часу затримки пакетів є адитивним уздовж відповідного маршруту [5; 6], знаходимо час затримки пакетів у мережі MPLS-TE в тунелях TE-tunnel для всіх заданих маршрутів передавання трафіку — як основних, так і додаткових. Тоді в тунелі TE-tunnel в напрямі від маршрутизатора  $N_1$  до маршрутизатора  $N_5$ , який має нульову завантаженість, час затримки пакетів  $\tau_{v5} \approx 0,198$  с.

Відповідно, для основних маршрутів передавання трафіку в мережі MPLS-TE між маршрутизаторами LSR у тунелях TE-tunnel час затримки пакетів визначається так:

$$\begin{aligned}
 &N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{v1-v4-v9} \approx 0,198 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{v2-v6-v10} \approx 0,198 \text{ с}; \\
 &N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{v1-v7-v10} \approx 0,198 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{v2-v3-v7-v10} \approx 0,198 \text{ с}; \\
 &N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{v1-v7-v8-v9} \approx 0,198 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{v2-v3-v7-v8-v9} \approx 0,198 \text{ с}; \\
 &N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{v2-v6-v8-v9} \approx 0,198 \text{ с}.
 \end{aligned}$$

Для заданих додаткових маршрутів передавання трафіку в мережі MPLS-TE в тунелях TE-tunnel час затримки пакетів становить:

$$\begin{aligned}
 &N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{v11-v12-v13-v17} \approx 0,198 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \\
 &\tau_{v15-v16-v14} \approx 0,198 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{v11-v12-v14} \approx 0,198 \text{ с}; \\
 &N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{v15-v16-v13-v17} \approx 0,198 \text{ с}.
 \end{aligned}$$

Отже, значення часу затримки пакетів у мережі MPLS-TE між маршрутизаторами LSR у тунелях TE-tunnel для різних маршрутів доставляння трафіку між заданими парами вузлів одне й те саме і дорівнює 0,198 с.

Зауважимо, що за допомогою вузлового тензорного методу знайдено однакові значення часу затримки пакетів для окремих трактів, які мають додаткові напрямки передавання. Наприклад,  $\tau_{v1} \approx \tau_{v11} \approx 0,073$  с,  $\tau_{v2} \approx \tau_{v15} \approx 0,049$  с,  $\tau_{v6} \approx \tau_{v16} \approx 0,078$  с,  $\tau_{v7} \approx \tau_{v12} \approx 0,055$  с,  $\tau_{v8} \approx \tau_{v13} \approx 0,022$  с,  $\tau_{v9} \approx \tau_{v17} \approx 0,049$  с і  $\tau_{v10} \approx \tau_{v14} \approx 0,071$  с.

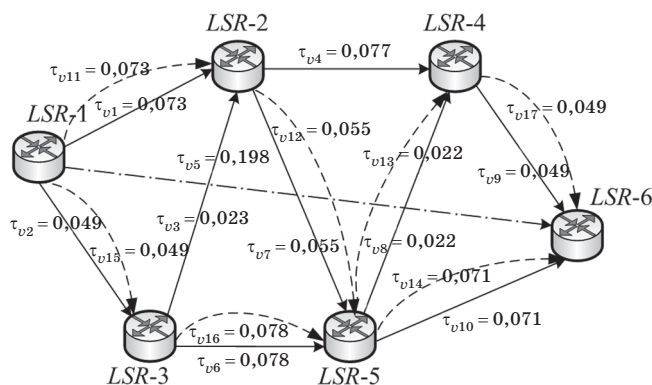


Рис. 2. Результати розрахунків часу затримки пакетів у мережі MPLS-TE за наявності додаткових маршрутів передавання трафіку

Звідси випливає, що, використовуючи додаткові напрямки передавання трафіку для обраних напрямів його передавання з різною завантаженістю, дістаємо однакові значення часу затримки пакетів для основного і додаткових напрямів передавання.

Як відомо, при визначенні часу затримки пакетів уздовж маршруту передавання трафіку в мережі MPLS-TE необхідно враховувати не лише час затримки пакетів у мережних трактах, а й час їх затримки у вузлах мережі (маршрутизаторах LSR). Значення часу затримки пакетів у вузлах мережі MPLS-TE залежить, вочевидь, від функціональних особливостей обладнання (обсягів буферних пристроїв, механізмів організації та обслуговування черг у цих пристроях), використовуваних

протоколів та багатьох інших факторів. При цьому саме затримки пакетів у вузлах мережі особливо відчутно впливають на результуючі характеристики якості обслуговування QoS.

Знайдемо значення часу затримки пакетів на заданих маршрутах передавання трафіку в мережі MPLS-TE за наявності додаткових маршрутів з урахуванням обчислених згідно з (9) значень часу  $T_\eta$  затримки пакетів у маршрутизаторах LSR.

Для заданих основних маршрутів передавання трафіку час  $\tau_{затр}$  затримки пакетів із урахуванням затримки в мережних вузлах визначається так:

$$N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,491 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,376 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,399 \text{ с};$$

$$N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,449 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,549 \text{ с};$$

$$N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,599 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,526 \text{ с}.$$

Для заданих додаткових маршрутів передавання трафіку час  $\tau_{затр}$  затримки з урахуванням затримки в мережних вузлах становить:

$$N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,549 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,376 \text{ с};$$

$$N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,399 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,526 \text{ с}.$$

Таким чином, маємо одне й те саме значення часу затримки пакетів (з урахуванням затримки в мережних маршрутизаторах LSR) як за наявності додаткових маршрутів, так і за їх відсутності. Наприклад, для маршруту  $N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6$  (як із додатковими маршрутами, так і без них) час затримки однаковий і становить  $\tau_{затр} \approx 0,376 \text{ с}$ .

### Розв'язання задачі маршрутизації в мережі MPLS-TE за відсутності додаткових маршрутів передавання трафіку

Порівнюємо для заданих маршрутів результати маршрутизації трафіку в мережі MPLS-TE за таким критерієм, як значення часу затримки пакетів, за наявності в мережі додаткових маршрутів передавання трафіку та за їх відсутності.

Розглянемо структуру мережі MPLS-TE в разі відсутності додаткових маршрутів. За вихідні дані візьмемо вихідну структурну схему мережі MPLS-TE з десятьма трактами передавання (рис. 3).

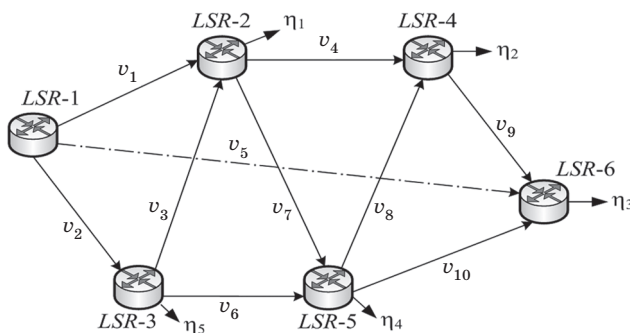


Рис. 3. Структурна схема мережі MPLS-TE

Згідно з розрахунками, виконаними за формулами (2)–(9), маємо: час затримки пакетів між заданими парами вузлів за відсутності додаткових маршрутів однаковий ( $\tau \approx 0,299$ ) для всіх напрямів передавання трафіку, причому він більший, ніж для мережі з додатковими маршрутами передавання трафіку.

Для заданих основних маршрутів час затримки пакетів  $\tau_{затр}$  з урахуванням затримки в мережних вузлах становить:

$$N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,645 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,589 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,630 \text{ с};$$

$$N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,706 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,859 \text{ с};$$

$$N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_2 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,935 \text{ с}; N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_5 \rightarrow N_4 \rightarrow N_6 \tau_{затр} \approx 0,818 \text{ с}.$$

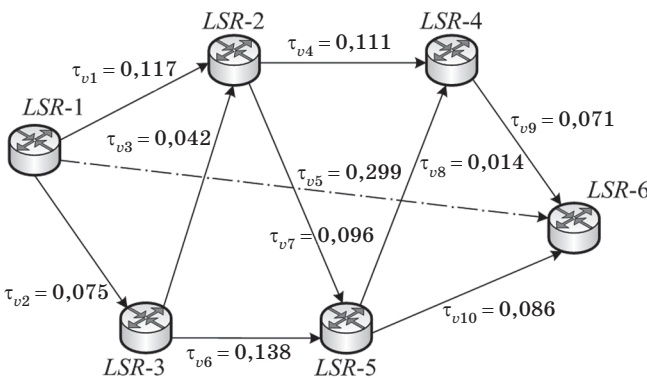


Рис. 4. Результати розрахунків часу затримки пакетів у мережі MPLS-TE за відсутності додаткових маршрутів

Фрагмент вихідної мережі MPLS-TE, зображеної на рис. 1, задамо у вигляді графа  $G(N, V)$ , де  $N = \{N_j, j = \overline{1,5}\}$  — множина вершин, які подаються вузлами мережі — маршрутизаторами, а  $V = \{v_i, i = \overline{1,10}\}$  — множина дуг, які моделюють гілки мережі — її тракти.

Як вихідні дані використовуються також відповідні значення середніх інтенсивностей  $L_v$  трафіку, тис. пакетів/с, які наведено в табл. 1, і довжина вихідної пакетної черги від маршрутизатора  $N_1$  LSR-1 до маршрутизатора  $N_6$  LSR-6, задана виразом (2).

Результати розрахунків значень середнього часу затримки пакетів у маршрутизаторах LSR мережі MPLS-TE та трактах, які їх сполучають, за відсутності додаткових маршрутів подано на рис. 4.

### Висновки

1. Показано, що застосування вузлового тензорного методу можливе для складної структури мережі MPLS-TE, яка має додаткові маршрути передавання трафіку та описується мультиграфом.

2. Розглянуто розв'язання задачі маршрутизації в мережі MPLS-TE з додатковими маршрутами передавання трафіку за допомогою вузлового тензорного методу, яке дозволило досягти зменшення часу затримки пакетів уздовж заданих маршрутів TE-tunnel передавання трафіку:

- для мережі з додатковими маршрутами передавання трафіку знайдено одне й те саме  $\tau \approx 0,198$  с затримки пакетів для різних маршрутів доставляння трафіку між заданими парами вузлів;
- для мережі, в якій немає додаткових маршрутів передавання трафіку, значення часу затримки пакетів  $\tau \approx 0,299$  с.

3. Згідно з вузловим тензорним методом при розв'язанні задачі маршрутизації для мережі з додатковими маршрутами передавання трафіку та різною завантаженістю знайдено однакові значення часу затримки пакетів як для основного, так і для додаткового маршруту.

### Література

1. **Воробієнко, П. П.** Телекомунікаційні та інформаційні мережі: [підруч. для вищ. навч. закл.] / П. П. Воробієнко, Л. А. Нікітюк, П. В. Резніченко.— К: САММІТ-КНИГА, 2010.— 640 с.
2. **Захватов, М.** Построение виртуальных частных сетей (VPN) на базе технологии MPLS / М. Захватов.— Cisco Systems, 2007.— С. 4–18.
3. **Евсеева, О. Ю.** Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания [Электронный ресурс] / О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникаций.— 2012.— № 3 (8).— С. 24–46.— Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123\\_evseeva\\_review.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_evseeva_review.pdf).
4. **Лемешко, А. В.** Результаты исследования тензорной модели многопутевой маршрутизации с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях / А. В. Лемешко, О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Вест. Южно-Уральск. гос. ун-та.— Т. 13, № 4.— 2013.— С. 38–54.— (Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»).
5. **Стрелковская, И. В.** Решение задач управления трафиком в сетях MPLS-TE с использованием тензорных моделей / И. В. Стрелковская, И. Н. Соловская, Г. Г. Смаглюк // Цифрові технології: зб. наук. праць.— 2010.— Вип. 8.— С. 57–65.
6. **Стрелковская, И. В.** Использование тензорного метода при расчете ТКС, представленной узловой сетью [Электронный ресурс] / И. В. Стрелковская, И. Н. Соловская // Проблемы телекоммуникаций.— 2010.— № 1 (1).— С. 68–75.— Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_strelkovskaya\\_tensor.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_strelkovskaya_tensor.pdf)
7. **Дискретна математика:** [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / [И. В. Стрелковська, А. Г. Буслаєв, О. М. Харсун та ін.].— Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2010.— 196 с.
8. **Зыков, А. А.** Основы теории графов / А. А. Зыков.— М.: Наука, 1987.— 384 с.
9. **Стрелковська, І. В.** Рішення задач маршрутизації для різних структур мереж за допомогою вузлового тензорного методу / І. В. Стрелковська, В. В. Андріяш: матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених «Інфокомунікації — сучасність та майбутнє», (Одеса, 17–18 жовтня 2013 р.). Ч. I: зб. тез.— Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2013.— С. 161–165.

Рецензент: доктор техн. наук, професор **Л. Н. Беркман**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

*И. В. Стрелковская, И. Н. Соловская*

### МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТИ MPLS-TE С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ПЕРЕДАЧИ ТРАФИКА

Предложено применение узлового тензорного метода для решения задачи маршрутизации в сети MPLS-TE с использованием дополнительных направлений передачи трафика. Осуществлен выбор дополнительного направления маршрутизации трафика по критерию минимального времени доставки пакетов, обеспечивающий сбалансированную загрузку и отказоустойчивость сети.

**Ключевые слова:** узловой тензорный метод; многопутевая маршрутизация трафика; дополнительное направление маршрутизации; время задержки пакетов.

*I. V. Strelkovska, I. M. Solovska*

### THE ROUTING IN MPLS-TE NETWORK WITH ADDITIONAL TRAFFIC DIRECTIONS

*In this paper to use the node tensor method in order to solve the problem of routing in MPLS-TE network with additional traffic directions use. The choice of the additional transmission rout accordingly the minimum of packets delay time criterion keeping networks loading balance and noise protection is made.*

**Keywords:** node tensor method; multipathes traffic routing; additional rout; packets delay.

УДК 621.396.662.072.078

**В. Г. САЙКО**, доктор техн. наук, професор;

**А. Г. ПЛЮЩ**, канд. техн. наук;

**В. А. БРЕСЛАВСКИЙ**, аспирант;

**Д. А. ЛИСЕНКО**, соискатель,

Государственный университет телекоммуникаций, Киев

## Анализ состояния и перспектив развития рынка услуг широкополосных систем беспроводного доступа

**Приведены результаты анализа состояния и тенденций развития рынка инновационных услуг широкополосных систем беспроводной связи нового поколения, а также особенностей развития рынка мобильных услуг на основе технологии M2M.**

Важной особенностью развития современных широкополосных беспроводных сетей является разнообразие используемых технологий радиодоступа и увеличение числа мультистандартных абонентских устройств, позволяющих интегрировать различные технологии в единую сеть, формируя таким образом гетерогенную (неоднородную) беспроводную сеть [4–6].