

УДК 621.391

# РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ІЄРАРХІЧНО-КООРДИНАЦІЙНОЇ ВНУТРІШНЬОДОМЕННОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ MPLS-TE



О.С. НЕВЗОРОВА

Харківський національний  
університет радіоелектроніки

**Abstract** – In this paper, a flow-based model and a hierarchical-coordination method of intra-area routing in an MPLS network are proposed. The method is oriented on realization of routing with load balancing in MPLS-network, corresponding to the principles of the concept of Traffic Engineering technology. The usage of the principle of goal coordination relating to the theory of hierarchical multi-level systems allowed to correctly define the tasks of the two hierarchical levels. The lower level is responsible for solving the routing task. The upper level is responsible for prevention of link overload in the MPLS-TE network. The analysis of the proposed hierarchical-coordination method based on the study of the dependence of the number of the coordination procedure iterations on the intensities of the transmitted packet flows was carried out. Also, in the paper, to reduce the number of iterations of the coordination procedure, expressions for modifying conditions of link overload prevention are proposed. The use of the proposed modification allows reducing the number of iterations of the coordination procedure by approximately 1.5-5 times, which in practice will lead to a proportional decrease in the volume of service information distributed in the network associated with the implementation of hierarchical routing, as well as to improve the overall management of the network.

**Анотація** – У статті представлено ієрархічно-координаційний метод внутрішньодоменної маршрутизації в мережі MPLS. Метод орієнтований на реалізацію маршрутизації з балансуванням навантаження відповідно до принципів технології Traffic Engineering. Метод визначив задачі двох ієрархічних рівнів: розв'язок задачі маршрутизації (нижній рівень) і запобігання перевантаження каналів зв'язку в MPLS-мережі (верхній рівень). Запропонована модифікація умов запобігання перевантаження каналів зв'язку мережі, використання яких дозволило скоротити кількість ітерацій координаційної процедури приблизно в 1,5-5 рази.

**Аннотация** – В статье представлен иерархическо-координационный метод внутридомениной маршрутизации в сети MPLS. Метод ориентирован на реализацию маршрутизации с балансировкой нагрузки в соответствии с принципами технологии Traffic Engineering. Метод определил задачи двух иерархических уровней: решение задачи маршрутизации (нижний уровень) и предотвращение перегрузки каналов связи в MPLS-сети (верхний уровень). Предложена модификация условий предотвращения перегрузки каналов связи сети, использование которых позволило сократить количество итераций координационной процедуры примерно в 1,5-5 раза.

## Вступ

Балансування навантаження в сучасних телекомунікаційних мережах, що функціонують на основі технології мультипротокольної комутації за мітками (MultiProtocol Label Switching, MPLS), є невід'ємним атрибутом багатьох протоколів і механізмів забезпечення якості обслуговування [1-4]: маршрутизації, управління чер-

гами, профілювання трафіку і резервування ресурсів. При цьому методичним фундаментом, який регламентує процеси балансування навантаження в MPLS-мережах, залишається концепція Traffic Engineering (TE).

Відомо, що основним критерієм оптимальності процесів балансування навантаження при розв'язанні задач маршрутизації в MPLS-мережах є мінімум коефіцієнтів використання каналів зв'язку. При цьому дослідниками запропоновано ряд ефективних математичних моделей і методів [5, 6], які можуть служити основою для впровадження в перспективні протоколи маршрутизації. Основним недоліком подібних рішень є те, що вони орієнтовані на реалізацію централізованої маршрутизації. Однак в MPLS-мережах реалізується маршрутизація «від джерела», коли функціями розрахунку маршрутів наділені лише приграничні маршрутизатори – Label Edge Router (LER). Подібна розподіленість в прийнятті маршрутних рішень може значно ускладнити забезпечення оптимального балансування навантаження або зовсім привести до перевантаження мережі.

У зв'язку з цим заслуговує на увагу ієрархічний підхід, розглянутий в роботах [7-10] і орієнтований на введення функцій координації маршрутних рішень, що одержуються розподілено на приграничних маршрутизаторах MPLS-мережі. При цьому функції координатора мережі можуть бути покладено або на один з маршрутизаторів мережі або на контролер (сервер) програмно-конфігурованої мережі (Software-Defined Network, SDN) [11]. Методи маршрутизації, які запропоновано в роботах [7-10], засновані на використанні маршрутних метрик і їх адаптивній модифікації для підвищення збіжності координаційних процедур. В даній роботі буде запропоновано метод ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в телекомунікаційній мережі MPLS-TE.

## **I. Декомпозиційна модель ієрархічно-координаційної маршрутизації з балансуванням навантаження в мережі MPLS-TE**

В ході розв'язання поставленої задачі нехай структура телекомунікаційної мережі (ТКМ) буде представлена у вигляді орієнтованого графу  $G = (M, E)$ , де  $M$  – це множина вершин графу  $M = \{M_i, i = \overline{1, m}\}$ , що описує маршрутизатори, а  $E$  – це множина дуг графу, що моделює канали зв'язку. Позначимо через  $K$  множину потоків, які циркулюють у мережі, тоді  $|K| = \tilde{K}$  – це потужність множини  $K$ , що кількісно характеризує загальне число потоків у ТКМ. Також позначимо через  $K_r$  ( $K_r \in K$ ) множину потоків, які підлягають маршрутизації  $M_r$ -м приграничним маршрутизатором ( $M_r \in M$ ). Тоді  $k_r$ -м буде називатись  $k$ -й потік пакетів, маршрутизація якого здійснюється  $M_r$ -м приграничним маршрутизатором. Далі позначимо через  $\lambda^{k_r}$  інтенсивність  $k_r$ -го потоку ( $k_r \in K_r$ ), яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с). Крім того, нехай  $s_{k_r}$  – вузол-відправник  $k_r$ -го потоку пакетів, а  $d_{k_r}$  – вузол-отримувач пакетів  $k_r$ -го потоку.

Для кожного маршрутизатора-відправника пакетів у мережі шуканими виступають змінні  $x_{i,j}^{k_r}$ , які характеризують частку інтенсивності  $k$ -го потоку пакетів, що надходить до мережі через  $M_r$ -й приграничний маршрутизатор та передається за каналом  $E_{i,j} \in E$ . Через  $\varphi_{i,j}$  позначимо пропускну здатність каналу зв'язку  $E_{i,j} \in E$ .

Реалізація одношляхової стратегії маршрутизації передбачає введення в модель наступних обмежень:

$$x_{i,j}^{k_r} \in \{0,1\}. \quad (1)$$

Для забезпечення реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації на маршрутні змінні накладаються обмеження вигляду:

$$0 \leq x_{i,j}^{k_r} \leq 1. \quad (2)$$

З метою запобігання втрат пакетів на маршрутизаторах і в мережі в цілому необхідно забезпечити виконання умов збереження потоку:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^{k_r} = 1, & M_i = s_{k_r}; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^{k_r} = 0, & M_i \neq s_{k_r}, d_{k_r}; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^{k_r} = -1, & M_i = d_{k_r}. \end{cases} \quad (3)$$

Система рівнянь (3) повинна виконуватися для кожного потоку пакетів, а кількість умов у системі залежить від числа маршрутизаторів у мережі.

Важливою складовою моделі ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації з балансуванням навантаження є умови запобігання перевантаження каналів зв'язку [5, 6], які представляються у наступному вигляді:

$$\sum_{M_r \in M} \sum_{k_r \in K} \lambda^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq \varphi_{i,j} \alpha, \quad E_{i,j} \in E, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – керуюча змінна балансування, яка кількісно визначає верхній граничний поріг завантаженості каналів зв'язку мережі. На змінну балансування навантаження накладається умова виду:

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (5)$$

Саме мінімізація цього порогового значення  $\alpha$  є метою балансування навантаження за вимогами технології Traffic Engineering. Однак варто врахувати, що при розподіленому розрахунку маршрутних змінних на кожному окремому приграничному маршрутизаторі вимоги умов (4) виконати досить важко. Це обумовлено тим, що кожен приграничний маршрутизатор в мережі приймає рішення щодо маршрутизації потоків, які надходять на нього, в умовах відсутності інформації про результати розрахунків на інших приграничних маршрутизаторах. У зв'язку з цим умови (4) розділимо на декілька нерівностей, записаних у декомпозиційній формі:

$$\sum_{k_r \in K_r} \lambda^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq \varphi_{i,j} \alpha_r, \quad (6)$$

$$\sum_{k_r \in K_r} \lambda^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq \varphi_{i,j} - \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} \sum_{k_s \in K_s} \lambda^{k_s} x_{i,j}^{k_s}, \quad (7)$$

де  $\alpha_r$  – верхній граничний поріг завантаженості каналів зв'язку мережі потоками, маршрутизація яких здійснюється  $M_r$ -м приграничним маршрутизатором. На змінні  $\alpha_r$  також накладаються обмеження, аналогічні до (5):

$$0 \leq \alpha_r \leq 1. \quad (8)$$

Умови (6) вводяться для забезпечення балансування навантаження, а нерівності (7) для запобігання перевантаження каналів зв'язку ТКМ.

У векторно-матричній формі умова (6) може бути представлена у вигляді:

$$B_r \bar{x}_r \leq D_r \bar{\varphi} - \sum_{\substack{M_{rs}^* \in M^* \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s, \quad (9)$$

де  $\bar{x}_r$  – вектор маршрутних змінних  $x_{i,j}^{k_r}$ , що формується на  $M_r$ -му приграничному маршрутизаторі;  $B_r, D_r, C_{rs}$  – матриці, сформовані відповідно до умов (7) і розмірності векторів  $\bar{x}_r$  ( $M_r \in M$ ). Нерівності (9) є умовами взаємодії різних приграничних маршрутизаторів мережі.

Важливо відзначити, що на практиці завжди буде виконуватися нерівність:

$$\alpha \leq \sum_{M_r \in M} \alpha_r. \quad (10)$$

Тому в ході розрахунку множини шуканих маршрутних змінних, яка представлена векторами  $\bar{x}_r$  ( $M_r \in M$ ), критерієм оптимальності одержуваних рішень обрано мінімум наступної цільової функції:

$$\min F,$$

$$F = \sum_{M_r \in M} \alpha_r, \quad (11)$$

яка вже записана в адитивній формі, що дуже важливо для забезпечення координації маршрутних рішень, що розподілено формуються на приграничних маршрутизаторах MPLS-мережі.

### 3. Розробка методу ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації з балансуванням навантаження в мережі MPLS-TE

Ієрархічно-координаційний метод внутрішньодоменної маршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційній мережі MPLS-TE, що пропонується, засновано на розв'язанні оптимізаційної задачі, пов'язаної з мінімізацією цільової функції (11) при наявності обмежень (1), (2), (3), (6)-(9). Для цього використано принцип цільової координації [12, 13] теорії ієрархічних багаторівневих систем управління. У відповідності до цього принципу переходимо до двоїстої задачі:

$$\min_{\vec{x}_r, \alpha_r} F = \max_{\mu} L,$$

де лагранжіан має наступний вигляд:

$$L = \sum_{M_r \in M} \alpha_r + \sum_{M_r \in M} \vec{\mu}_r^t (B_r \vec{x}_r - D_r \vec{\varphi} + \sum_{\substack{M_{rs} \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s), \quad (12)$$

а  $\vec{\mu}_r$  – вектори множників Лагранжу.

Лагранжіан (12) представимо у вигляді:

$$L = \sum_{M_r \in M} L_r, \quad (13)$$

$$L_r = \alpha_r + \vec{\mu}_r^t B_r \vec{x}_r - \vec{\mu}_r^t D_r \vec{\varphi} + \sum_{\substack{M_{rs} \in M \\ s \neq r}} \vec{\mu}_s^t C_{sr} \vec{x}_s \quad (14)$$

для того, щоб усі змінні були віднесені до індексу  $r$ .

Таким чином, лагранжіан (13) набуває сепарабельної форми, а загальна проблема маршрутизації виявилась декомпозиційованою на ряд окремих маршрутних задач. Розв'язання задачі щодо мінімізації виразу (14) при наявності обмежень (1), (2), (6), (8)

визначає нижній рівень розрахунків. В результаті визначається порядок маршрутизації потоків ( $\vec{x}_r$ ) на кожному окремо взятому приграничному маршрутизаторі.

Основна задача верхнього рівня є координація рішень, отриманих на нижньому рівні, з метою запобігання перевантаження каналів зв'язку (7) і втрат пакетів. На верхньому рівні виконується модифікація векторів множників Лагранжа в ході виконання наступної градієнтної процедури:

$$\mu_r(n+1) = \mu_r(n) + \nabla \mu_r, \quad (15)$$

де  $n$  – номер ітерації,  $\nabla \mu_r$  – градієнт функції, який розраховується виходячи з результатів рішення задач маршрутизації ( $x^*$ ) на кожному конкретному маршрутизаторі-відправнику, що були отримані на нижньому рівні:

$$\nabla \mu_r(x) \Big|_{x=x^*} = B_r \vec{x}_r - D_r \vec{\varphi} - \sum_{\substack{M_r \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s. \quad (16)$$

При наявності перевантаження каналів зв'язку, координатор змінює градієнт функції (16), тим самим збільшуючи значення вектору множників Лагранжа (15) у виразі (14). Тим самим, фактично, координатор змінює метрику перевантажених каналів. Чим більшу роль в перевантаженні каналу грають потоки, що надходять в мережу через маршрутизатор  $M_r$ , тим вище значення метрики, що залежить від  $\vec{\mu}_r$ . Далі нові значення векторів множників Лагранжа координатор направляє на приграничні маршрутизатори. На нижньому рівні приграничні маршрутизатори LER розраховують нові значення маршрутних змінних ( $\vec{x}_r$ ), ґрунтуючись на модифікації векторів множників Лагранжа ( $\vec{\mu}_r$ ). Нові значення маршрутних змінних знову спрямовуються на верхній рівень для перевірки умов щодо перевантаження каналів зв'язку та подальшої координації рішень нижнього рівня (15), (16). Процес координації набуває ітераційного характеру, розрахунки продовжуються до тих пір, доки присутня проблема перевантаження каналів зв'язку. Таким чином, ефективність запропонованого методу безпосередньо залежить від швидкості збіжності координаційної процедури (15), (16), яка вимірюється числом ітерацій її роботи.

#### 4. Дослідження запропонованого методу внутрішньодоменної маршрутизації з балансуванням навантаження в мережі MPLS-TE

Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації з балансуванням навантаження у телекомунікаційній мережі MPLS-TE проводилось для різних мережних структур з варійованим числом маршрутизаторів та каналів зв'язку. Для моделювання та розгляду всіх аспектів запропонованого методу, як приклад, була обрана мережа, структура якої представлена на рис. 1.

У розривах каналів зв'язку показана їх пропускна здатність, яка вимірювалась в пакетах за секунду (1/с).

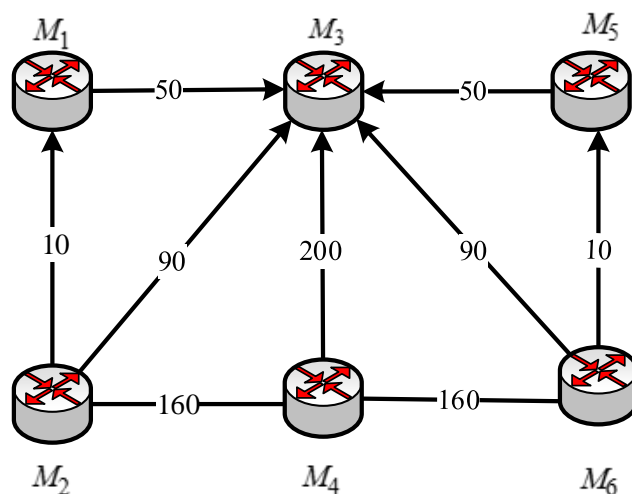


Рис. 1. Структура MPLS-мережі, що досліджувалась

Мережа складалася з шести маршрутизаторів ( $M_1 \div M_6$ ) та дев'яти каналів зв'язку. Розглядалась передача пакетів двох потоків у мережі: перший потік передавався від маршрутизатора  $M_1$  до маршрутизатора  $M_4$ , а вузлом-відправником та вузлом-отримувачем другого потоку виступали маршрутизатори  $M_5$  та  $M_4$  відповідно; інтенсивність потоків змінювалась від 0 до 200 1/с.

На рис. 2 представлена залежність кількості ітерацій координаційної процедури (15), (16) від величини інтенсивностей переданих потоків пакетів.

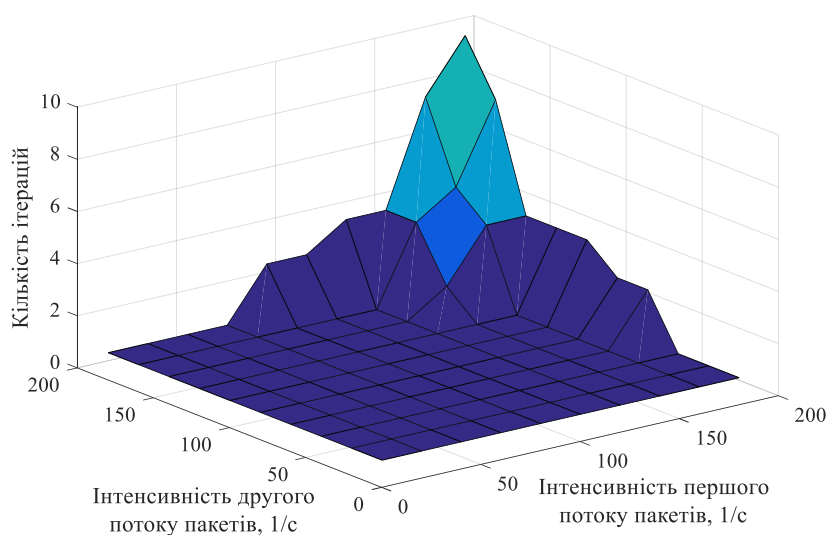


Рис. 2. Залежність кількості ітерацій процедури (15), (16) від інтенсивностей переданих потоків пакетів

Як показано на рис. 2, зі збільшенням навантаження на мережу ймовірність виникнення перевантаження каналів зв'язку з причини розподіленого характеру маршрутних рішень «від джерела» зростає. Тому і зростає число ітерацій координаційної процедури (15), (16). Максимальна кількість ітерацій дорівнювала десяти та спостерігалась при гранично можливій завантаженості мережі, тобто коли інтенсивності кожного потоку дорівнювали 200 1/с. Кількість ітерацій координаційної процедури (15), (16) визначає об'єм часу, що витрачається на вирішення маршрутних задач в мережі, і обсяг створюваного службового трафіку. Тому важливим завданням є мінімізація числа ітерацій в ході координації процесу ієрархічної маршрутизації в мережі MPLS-TE.

Дослідження запропонованого методу показало, що причиною зростання числа ітерацій координаційної процедури є перевантаження каналів зв'язку, що віддалені за кількістю переприйомів від вузлів відправника або отримувача. Це особливо спостерігається на початкових ітераціях методу. Така ситуація обумовлена необхідністю забезпечення збалансованого завантаження всіх каналів зв'язку мережі відповідно до вимог технології Traffic Engineering. По завершенню процесу координації виявилось, що чим далі (за кількістю переприйомів) той чи інший канал від маршрутизаторів відправника та отримувача  $k_r$ -го потоку, тим менша частка  $k_r$ -го потоку протікає цим каналом. У зв'язку з цим в даній роботі для кожного приграничного маршрутизатора при балансуванні потоків пропонується змінити в правій частині нерівності (6) пропускну здатність каналів зв'язку на модифіковане значення

$$\varphi_{i,j}^r = \varphi_{i,j} v_{i,j}^{k_r}, \quad (17)$$

де

$$0 \leq v_{i,j}^{k_r} \leq 1 \quad (18)$$

– ваговий коефіцієнт, що характеризує пропорційну віддаленість каналу  $E_{i,j} \in E$  (за числом вузлів) від відповідного маршрутизатора-відправника або отримувача пакетів  $k_r$ -го потоку. Для розрахунку вагового коефіцієнту пропонується використовувати наступний вираз:

$$v_{i,j}^{k_r} = \frac{1}{\min(\text{hop}_{i,j}^{s_{k_r}}, \text{hop}_i^{d_{k_r}})}, \quad (19)$$

де  $\text{hop}_{i,j}^{s_{k_r}}$  – мінімальна кількість вузлів між маршрутизатором-відправником  $k_r$ -го потоку пакетів і каналом зв'язку  $E_{i,j}$ ;  $\text{hop}_i^{d_{k_r}}$  – мінімальна кількість вузлів між маршрутизатором-отримувачем  $k_r$ -го потоку пакетів і каналом зв'язку  $E_{i,j}$ . В залежності від роз-



ташування каналу зв'язку в мережі (кількість маршрутизаторів до вузла-відправника або отримувача) можливі наступні значення вагового коефіцієнта:

$v_{i,j}^{k_r} = 1$ ; коли канал зв'язку  $E_{i,j} \in E$  є інцидентним до маршрутизатора-відправника, або отримувача  $k_r$ -го потоку пакетів ( $k_r \in K_r$ );

$v_{i,j}^{k_r} \rightarrow 1$ , чим ближче канал зв'язку  $E_{i,j} \in E$  до маршрутизатора-відправника або отримувача  $k_r$ -го потоку пакетів ( $k_r \in K_r$ );

$v_{i,j}^{k_r} \rightarrow 0$ , чим далі канал зв'язку  $E_{i,j} \in E$  до маршрутизатора відправника або отримувача  $k_r$ -го потоку пакетів ( $k_r \in K_r$ ).

Основна мета подібних нововведень полягає в тому, щоб приграничний маршрутизатор орієнтувався не на реальну, а на логічну (дещо занижену) пропускну здатність (17) каналів зв'язку, які віддалені від нього за кількістю переприйомів пакетів. Це повинно сприяти меншому використанню таких каналів в ході балансування навантаження та скоротити число ітерацій координаційної процедури (15), (16) запропонованого методу.

В ході дослідження методу при введенні умов (17)-(19) була отримана залежність кількості ітерацій координаційної процедури (15), (16) від інтенсивності переданих потоків пакетів (рис. 3).

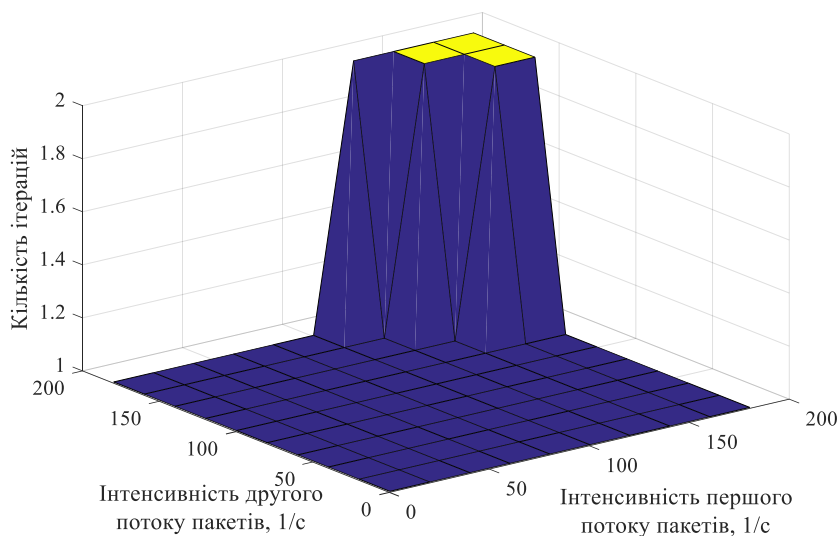


Рис. 3. Залежність кількості ітерацій процедури (15), (16) від інтенсивностей переданих потоків пакетів при використанні виразів (17)-(19) в методі ієрархічно-координаційної маршрутизації з балансуванням навантаження

На рис. 3 показано, що використання виразів (17)-(19) в методі ієрархічно-координаційної маршрутизації з балансуванням навантаження дозволило для аналізованої структури MPLS-мережі (рис. 1) значно знизити кількість ітерацій координаційної процедури (до 1-2). Це в середньому від 1,5 до 5 разів менше, ніж при викорис-

танні оригінальної умови (6), тобто без врахування вагових коефіцієнтів (18), (19). Максимальне число ітерацій, як і в раніше розглянутому випадку (рис. 2), спостерігалось при граничній завантаженості мережі. На рис. 5 показано виграш щодо збіжності координаційної процедури при реалізації методу ієрархічно-координаційної маршрутизації в мережі MPLS-TE з введеними модифікаціями (17)-(19).

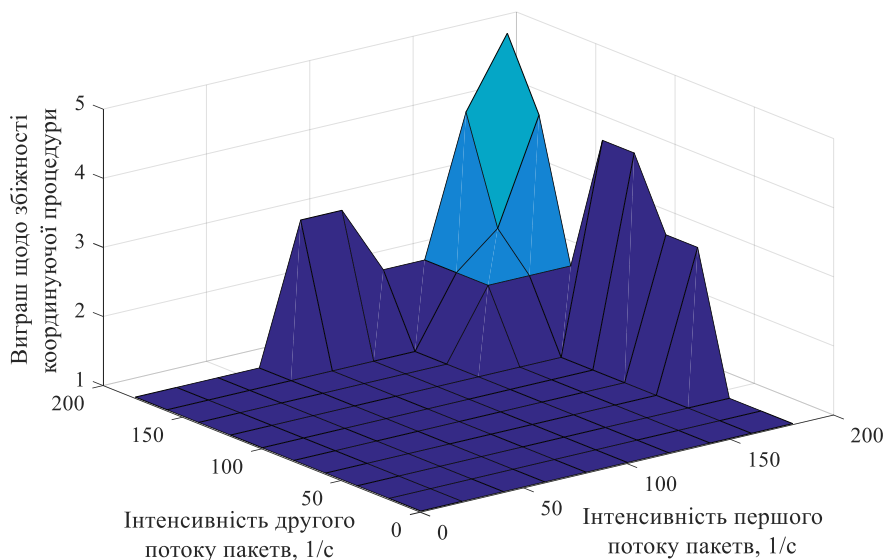


Рис. 4. Виграш щодо збіжності координаційної процедури при реалізації методу ієрархічно-координаційної маршрутизації з балансуванням навантаження в мережі MPLS-TE

Більш детальні порівняльні результати дослідження методу ієрархічно-координаційної маршрутизації, а саме вплив завантаженості мережі на збіжність координаційної процедури (15), (16), наведено в табл. 1. Результати дослідження показали, що максимальним навантаженням мережі може бути 400 1/с, тобто коли кожен потік мав інтенсивність рівну 200 1/с. З табл. 1 видно, що при реалізації методу (12)-(16) та при завантаженні мережі менш ніж на 80-85%, приграничні маршрутизатори забезпечили розрахунок маршрутів від відправників до отримувачів без перевантаження каналів зв'язку мережі, тобто в цьому випадку координація не була потрібна. При подальшому зростанні завантаженості мережі розподілений характер рішень, отриманих від кожного приграничного маршрутизатора, неминуче призводив до перевантаження каналів зв'язку. Для запобігання перевантаження каналів зв'язку та мережі в цілому, на верхньому рівні проводилась координація отриманих з нижнього рівня рішень в ході модифікації множників Лагранжу (16), які у вигляді штрафних коефіцієнтів спускались на нижній рівень, ініціюючи новий перерозрахунок маршрутних змінних.

Таблиця 1. Результати дослідження методу ієрархічно-координаційної маршрутизації в мережі MPLS-TE

Інтенсивність першого потоку пакетів, 1/с	Інтенсивність другого потоку пакетів, 1/с	Кількість ітерацій методу (15), (16)	
		Без використання умов (17)-(19)	З використання умов (17)-(19)
20	20	1	1
40	20	1	1
60	20	1	1
...	...	...	...
100	100	1	1
...	...	...	...
140	160	1	1
140	180	4	1
140	200	4	2
...	...	...	...
200	40	1	1
200	60	1	1
200	80	3	1
200	100	3	1
...	...	...	...
200	160	8	2
200	180	8	2
200	200	10	2

## Висновки

У даній роботі запропоновано метод ієрархічно-координаційної внутрішньо-доменної маршрутизації в телекомунікаційній мережі MPLS-TE (12)-(19). Метод засновано на принципі цільової координації, що належить до теорії ієрархічних багаторівневих систем. Це дозволило коректно визначити задачі ієрархічних рівнів, що відповідають за реалізацію маршрутизації «від джерела» (нижній рівень) і запобігання перевантаження каналів зв'язку MPLS-мережі (верхній рівень). Метод використовує декомпозиційну потокову модель маршрутизації з балансуванням навантаження (1)-(11), яка орієнтована на мінімізацію верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку MPLS-мережі, що повністю відповідає вимогам концепції Traffic Engineering.

Проведено аналіз запропонованого методу з точки зору його збіжності до оптимальних значень при проведенні координації маршрутних рішень. Для підвищення швидкості збіжності запропоновано ввести вагові коефіцієнти в умови балансування завантаженості каналів зв'язку (17)-(19), що характеризують пропорційну віддаленість цих каналів (за числом переприйомів) від відповідного маршрутизатора-відправника або отримувача пакетів. Це дозволило знизити число ітерацій координаційної процедури приблизно від 1,5 до 5 разів, що на практиці призведе до пропорційного зниження обсягів циркулюючого в мережі службового трафіка, пов'яза-

ної з реалізацією ієрархічної маршрутизації, а також часу розв'язання маршрутних задач в цілому.

Як розвиток запропонованого в роботі методу ієрархічної маршрутизації з балансуванням навантаження вбачається підхід, заснований на ієрархічній структурі мережі у вигляді множини доменів [14, 15]. Це необхідно для подальшого підвищення масштабованості маршрутних рішень в мережах з великою кількістю маршрутизаторів та доменів. Крім того, в подальшому доцільно кількісно оцінити вплив вибору графу щодо балансування навантаження в мережі на значення основних показників якості обслуговування, як це, наприклад, зроблено в роботі [16].

### Список літератури:

1. Вегешна III. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 368 с.
2. Simha A., Osborne E. Traffic Engineering with MPLS. – Cisco Press, 2002. – 608 p.
3. Katz D., Kompella K., Yeung D. Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2. RFC 3630, September 2003. – 14 p.
4. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2005. – 304 с.
5. Seok Y., Lee Y., Choi Y., Kim C. Dynamic Constrained Traffic Engineering for Multicast Routing // Information Networking: Wired Communications and Management. – 2002. – Vol. 2343. – P. 278-288. DOI: 10.1007/3-540-45803-4\_26.
6. Wang Y., Wang Z. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering // Proceedings Eight International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.99EX370). – 11-13 Oct. 1999. – P. 582-588. DOI: 10.1109/ICCCN.1999.805577.
7. Lemeshko O., Nevzorova O., Hailan A. The increasing convergence of coordination procedure in the implementation of multipath hierarchical routing // First International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology PICS&T'2014. – Kharkiv, Ukraine, october 14-17, 2014. – P. 45-48. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2014.6992294.
8. Nevzorova Ye. S., Arous K. M., Salakh M. T. R. Method for hierarchical coordinated multicast routing in a telecommunication network // Telecommunication and Radio Engineering. – 2016. – Volume 75. – P. 1137-115. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i13.10.
9. Lemeshko O.V., Hailan A.M., Starkova O.V. Multi-level traffic management in the MPLS-TE DiffServ network // 11<sup>th</sup> International Conference THE EXPERIENCE OF DESIGNING AND APPLICATION OF CAD SYSTEMS IN MICROELECTRONICS. – Polyana-Svalyava-(Zakarpattia), UKRAINE: Publishing House of Lviv Polytechnic, 23 - 25 February 2011. – P. 118-120.
10. Lemeshko O., Hailan A.M., Ali S. Ali. A flow-based model of two-level routing in multiservice network // 2010 Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference TCSET'2010. – Lviv-Slavsko: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010. – P. 225.
11. Monge A.S., Szarkowicz K.G. MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services. 1st edition. – O'Reilly Media, 2016. – 920 p.
12. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Издательство "Мир", 1973. – 344 с.

13. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. – М.: Машиностроение, 1986. – 494 с.

14. Yeremenko O.S., Lemeshko O.V., Nevzorova O.S., Hailan A.M. Method of Hierarchical QoS Routing Based on the Network Resource Reservation // 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON). – Kyiv, Ukraine, May 29-June 2, 2017. – P. 971-976. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100393.

15. Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O. Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting // Transport and Telecommunication Journal. – June 2017. – Vol. 18. – No. 2. – P. 155-167. DOI: 10.1515/ttj-2017-0015.

16. Lemeshko O.V., Yeremenko O.S. Dynamics Analysis of Multipath QoS-Routing Tensor Model with Support of Different Flows Classes // International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Croatia. 12-14 Oct. 2016. – P. 225-230. DOI: 10.1109/SST.2016.7765664.