

УДК 621.391

МЕТОД ІЄРАРХІЧНО-КООРДИНАЦІЙНОЇ МІЖДОМЕННОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІЙ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ НОРМОВАНОЇ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ



[М.О. ЄВДОКИМЕНКО](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Abstract – The paper proposes a method of hierarchical coordination of inter-domain routing in software-defined infocommunication network (ICN). The novelty of the method is that the routing solutions obtained with it are aimed not only at increasing the scalability of ICN, but also at ensuring the normalized quality of service in terms of average transmission rate and end-to-end average packet delay. It is based on the use of a decomposition flow-based routing model, which, in turn, is based on the conditions of inter-domain routing interaction and the conditions of ensuring the normalized quality of service, which are obtained on the basis of tensor modeling of ICN in the geometric space created by coordinate paths. Within the proposed method, the inter-domain QoS routing problem was presented in an optimization form with a quadratic optimality criterion, which was solved according to the principle of targeted coordination from the theory of hierarchical multilevel control systems. During the investigation of the proposed method of inter-domain QoS-routing, a number of calculated examples confirmed its efficiency and effectiveness in terms of providing a normalized quality of service. It was experimentally established that the method converged to the optimal solution in a finite number of iterations. Reducing the number of such iterations helps to reduce the amount of service traffic transmitted across the network between routers and SDN controllers at different levels, as well as minimizing the total time for solving the inter-domain QoS-routing.

Анотація – У роботі запропоновано метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі (ІКМ), новизною якого є те, що отримані за його допомогою маршрутні рішення спрямовані не тільки на підвищення масштабованості ІКМ, але й на забезпечення нормованої якості обслуговування за показником середньої швидкості передачі та наскрізної середньої затримки пакетів. Він заснований на використанні декомпозиційної потокової моделі маршрутизації, основу якої склали умови міждоменної взаємодії та умови забезпечення нормованої якості обслуговування, які отримані на підставі тензорного моделювання ІКМ в геометричному просторі, який створюється координатними шляхами. В межах запропонованого методу задачу міждоменної QoS-маршрутизації вдалося представити в оптимізаційній формі з квадратичним критерієм оптимальності, для розв'язання якої використано принцип цільової координації з теорії ієрархічних багаторівневих систем управління. В ході дослідження запропонованого методу міждоменної QoS-маршрутизації на ряді розрахункових прикладів підтверджена його працездатність та ефективність з точки зору забезпечення нормованої якості обслуговування. Експериментально встановлено, що метод сходився до оптимального рішення за кінцеву кількість ітерацій. Зменшення кількості подібних ітерацій сприяє зниженню обсягів службового трафіка, який передається в мережі між маршрутизаторами та SDN-контролерами різних рівнів, а також мінімізації загального часу розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації.

Вступ

Забезпечення заданого рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS) запитів користувачів було й залишається основною метою функціонування сучасних інфокомунікаційних мереж (ІКМ), для досягнення якої задіюються різноманітні технологічні засоби та протоколи розподілу та резервування мережних ресурсів, управління трафіком тощо. При цьому проблема забезпечення якості обслуговування

вкрай загострюється в умовах значної територіальної розподіленості та гетерогенності ІКМ, що суттєво впливає на масштабованість рішень щодо управління трафіком.

Дієвим напрямком підвищення масштабованості є використання мультидоменних програмно-конфігурованих мереж (Software-defined Network, SDN) [1, 2], коли значний перелік функцій управління трафіком перекладається на множину контролерів мережної операційної системи, які, в свою чергу, вибудовуються в чітку функціональну ієрархію (рис. 1) [2, 3].

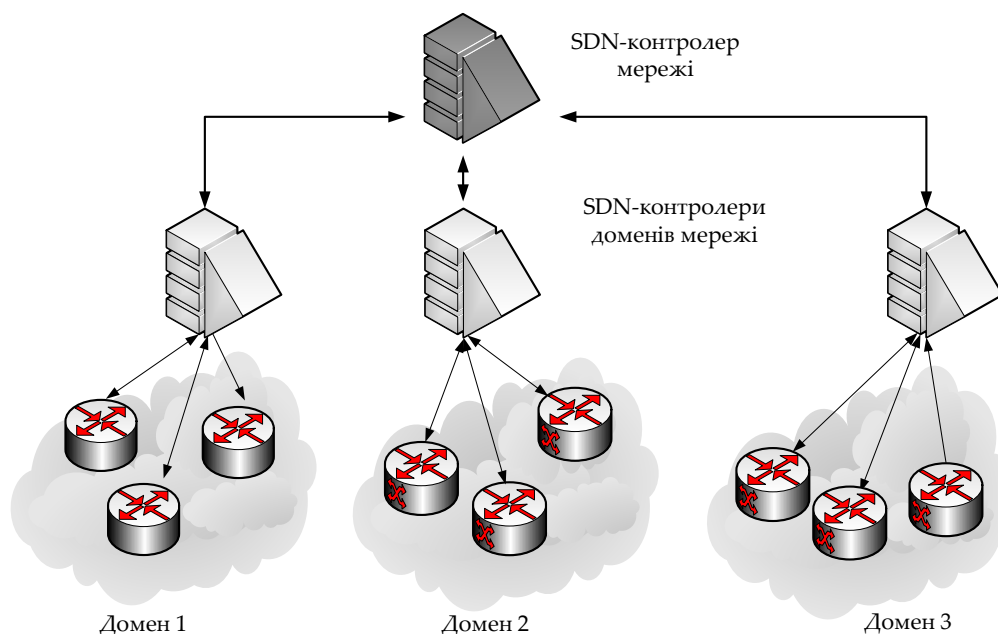


Рис. 1. Приклад організації мультидоменної SDN

Закріплення окремого контролера за кожним мережним доменом сприяє значному зниженню об'єму службового трафіка, який циркулює в мережі, розміру маршрутних таблиць та покращенню оперативності розв'язання задач щодо управління трафіком, серед яких важливе місце відводиться задачам маршрутизації. З іншого боку, повноцінна реалізація системи зазначених переваг вимагає докорінної модернізації моделей, методів і протоколів маршрутизації з їхньою функціональною адаптацією під особливості ієрархічної архітектури SDN-контролерів і мультидоменної структури ІКМ.

I. Огляд відомих рішень ієрархічної маршрутизації в ІКМ

Найбільш відомими протоколами, які реалізують принципи ієрархічної маршрутизації, вважаються OSPF та інтегрований IS-IS, що використовуються в IP-мережах, а також дещо застарілий на цей час протокол PNNI в мережі ATM [4-7]. Характерними рисами цих протоколів є те, що, з одного боку, на морфологічному рівні вони підтримують мультидоменну архітектуру ІКМ, але з іншого – на функціональному рівні – все ще використовують для розрахунку маршрутів комбінаторний

алгоритм Дейкстри, який жодним чином не враховує ієрархічних особливостей побудови мережі. Варто також додати, що врахування QoS-вимог у цих же протоколах відбувається опосередкованим чином лише через маршрутні метрики, які, як правило, пов'язані з пропускнуою здатністю каналів і шляхів ІКМ. Реалізація подібного підходу дійсно сприяє покращенню загального рівня якості обслуговування в мережі, але не дозволяє гарантувати числові значення міжкінцевих QoS-показників, наприклад, середньої затримки пакетів для того чи іншого потоку.

У наукових роботах, присвячених проблематиці ієрархічної маршрутизації [8-15], запропоновано множину рішень, які представлені переважно поточковими моделями та оптимізаційними методами розрахунку. У статтях [16-18] подібні рішення адаптовані під особливості SDN архітектур. Важливою особливістю результатів, отриманих у роботах [11-15], є те, що вони базуються на використанні положень, принципів і постулатів теорії ієрархічних багаторівневих систем [19, 20]. Ці рішення, по-перше, вводять декілька ієрархічних рівнів прийняття рішень щодо маршрутизації в ІКМ, по-друге, припускають декомпозиційне подання математичної моделі ІКМ, яка може описуватись, наприклад, системою диференціальних, різницевого рівнянь [21-25], а по-третє, обов'язковим компонентом ієрархічної маршрутизації стає процедура координації, яка реалізується верхнім рівнем по відношенню до маршрутних рішень нижніх рівнів.

Особливої уваги з точки зору реалізації QoS-маршрутизації заслуговує підхід [26-29], який базується на використанні тензорної методології дослідження, в межах якої вдалося отримати в аналітичному вигляді умови щодо забезпечення якості обслуговування за множиною показників – пропускнуою здатністю, середньою затримкою, ймовірністю втрат пакетів. Цей підхід також адаптований для гарантування якості обслуговування, яка сприймається на рівні користувача (Quality of Experience, QoE) та оцінюється показниками рейтингу або мультимедійної якості [30, 31]. Тому в даній роботі буде запропоновано рішення задачі ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування, тобто коли вимоги щодо рівня міжкінцевої QoS встановлюються для кожного домену в вигляді відповідних норм. Представлене рішення є подальшим розвитком та інтеграцією результатів, отриманих у роботах [13-15, 29].

II. Декомпозиційна модель міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів

Припустимо, структура інфокомунікаційної мережі (ІКМ) буде представлена у вигляді орієнтованого графа

$$G = (R, E), \quad (1)$$

де R – це множина вершин, що моделює маршрутизатори, а E – множина дуг графа, яка описує канали зв'язку мережі.

У загальному випадку при наданні тієї чи іншої інфокомунікаційної послуги в мережі генерується відповідний потік пакетів. Позначимо через K множину потоків, що циркулюють у мережі, тоді $|K| = \tilde{K}$ – потужність множини, що кількісно характеризує загальне число потоків в ІКМ. Для кожного k -го потоку ($k \in K$) вважається відомою його середня швидкість пакетів (інтенсивність) – λ_{req}^k , яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с) та визначає вимоги щодо об'єму пропускну здатності ІКМ, що виділяється цьому потоку.

У ході розробки декомпозиційної моделі міждоменної маршрутизації припустимо, що інфокомунікаційна мережа складається з N взаємопов'язаних між собою підмереж – доменів. Тоді нехай кожен окремих p -й домен в ІКМ описується за допомогою підграфа $G^p = (R^p, E^p)$ графа G , де $R^p = \{R_i^p; i = \overline{1, m_p}\}$ – множина маршрутизаторів p -го домену, $E^p = \{E_{i,j}^p; i, j = \overline{1, m_p}, i \neq j\}$ – множина каналів, що з'єднують маршрутизатори p -го домену, а m_p та n_p – загальна кількість відповідно маршрутизаторів та каналів зв'язку у p -му домені.

В ході декомпозиції ІКМ границя між доменами проходила через маршрутизатори мережі, як це реалізовано, наприклад, у протоколі OSPF [4-6]:

$$R^p \cap R^q \neq 0 \text{ та } E^p \cap E^q = 0, \quad p \neq q, \quad (2)$$

тобто деякі маршрутизатори ІКМ можуть належати одночасно кільком суміжним доменам. Також для кожного p -го домену визначимо множину приграничних маршрутизаторів B^p ($B^p \in R^p$). У свою чергу всю множину приграничних маршрутизаторів p -го домену можна розділити на дві підмножини: $B_{in}^{p,k}$ – підмножина приграничних маршрутизаторів, через які пакети k -го потоку надходять до p -го домену; $B_{out}^{p,k}$ – підмножина приграничних маршрутизаторів, через які пакети k -го потоку вибувають з p -го домену. Для кожного каналу зв'язку $E_{i,j}^p$ через $\varphi_{i,j}^p$ позначимо його пропускну здатність, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с).

Нехай у результаті розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації для кожного p -го домену необхідно розрахувати маршрутні змінні $x_{i,j}^{p,k}$, які характеризують частку інтенсивності k -го потоку пакетів, що протікає в каналі $E_{i,j}^p \in E^p$. Тоді для кожного маршрутизатора p -го домена необхідно виконати умови збереження k -го потоку для забезпечення зв'язності внутрішньодомених ділянок міждомених маршрутів.

Якщо p -й домен є транзитним для k -го потоку пакетів, то подібні умови мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{B_{in}^{p,k} \in B^p} \left(\sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = 1; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 0; \\ \sum_{B_{out}^{p,k} \in B^p} \left(\sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = -1. \end{array} \right. \quad (3)$$

Система рівнянь (3) повинна виконуватися для кожного k -го потоку пакетів окремо. Перша умова системи (3) охоплює всі приграничні маршрутизатори, через які k -й потік надходить до p -го домену; друга умова в (3) вводиться для внутрішніх маршрутизаторів p -го домена, які для k -го потоку є транзитними; третя умова має виконуватися для всіх приграничних маршрутизаторів, через які k -й потік вибуває з p -го домена.

Якщо k -й потік пакетів надійшов до ІКМ через p -й домен, а його джерелом виступає, наприклад, маршрутизатор R_i^p , то для цієї мережі перша умова системи (3) дещо спроститься і набуде вигляду

$$\sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} = 1.$$

Решта з рівнянь у системі (3) залишиться незмінною.

У разі, коли маршрутизатор R_i^p з p -го домена виступає отримувачем пакетів k -го потоку, то спроститься лише останнє рівняння системи (3) та матиме наступний вигляд:

$$\sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 1.$$

Крім того, з метою запобігання перевантаження каналів зв'язку p -го домена мережі важливо виконати наступні умови:

$$\sum_{k \in K} \lambda_{req}^k x_{i,j}^{p,k} \leq \varphi_{i,j}^p, \quad p = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Позначимо через $\lambda_{i,j}^{p,k} = \sum_{k \in K} \lambda_{req}^k x_{i,j}^{p,k}$ середню інтенсивність k -го потоку пакетів, що протікає в каналі $E_{i,j}^p \in E^p$.

При реалізації одношляхової маршрутизації на маршрутні змінні накладаються обмеження вигляду:

$$x_{i,j}^{p,k} \in \{0, 1\}, \quad (5)$$

а при використанні багатошляхової маршрутизації – наступні умови:

$$0 \leq x_{i,j}^{p,k} \leq 1. \quad (6)$$

Змінні (5) або (6) є координатами маршрутних векторів, які відповідно до проведеної структурної декомпозиції, підлягають функціональній декомпозиції:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \\ \vdots \\ \vec{x}_p \\ \vdots \\ \vec{x}_N \end{bmatrix}, \quad \vec{x}_p = \begin{bmatrix} \vec{x}_p^1 \\ \vec{x}_p^2 \\ \vdots \\ \vec{x}_p^k \\ \vdots \\ \vec{x}_p^{\bar{k}} \end{bmatrix}, \quad \vec{x}_p^k = \begin{bmatrix} x_{1,2}^{p,k} \\ x_{1,3}^{p,k} \\ \vdots \\ x_{i,j}^{p,k} \\ \vdots \\ x_{m_p, m_p-1}^{p,k} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де \vec{x} – це вектор маршрутних змінних, які визначають порядок маршрутизації потоків в ІКМ у цілому; \vec{x}_p – це маршрутний вектор, що визначає порядок маршрутизації всіх потоків, які циркулюють в p -му домені; \vec{x}_p^k – це маршрутний вектор, який встановлює результат розв’язання задачі маршрутизації k -го потоку в p -му домені.

При розподіленому розрахунку векторів \vec{x}_p та \vec{x}_p^k у межах кожного окремого p -го домена важливо забезпечити структурну та функціональну зв’язність міждоменних маршрутів, тобто маршрутів, що проходять через множину маршрутизаторів різних доменів. Для забезпечення зв’язності міждоменного маршруту в модель (1)-(7) вводяться умови міждоменної взаємодії [29]:

$$C_{p,q}^k \vec{x}_p^k = C_{q,p}^k \vec{x}_q^k, \quad p, q = \overline{1, N}, \quad p \neq q, \quad k \in K, \quad (8)$$

де $C_{p,q}^k$ – матриця взаємодії p -го та q -го доменів, яка має розмір $m_{p,q} \times m_x^{p,k}$; $m_{p,q} = |R^p \cap R^q|$ – кількість маршрутизаторів, через які проходить границя між p -м і q -м доменами; $m_x^{p,k}$ – число координат $x_{i,j}^{p,k}$ вектору \vec{x}_p^k .

Так для структури мережі, яка представлена на рис. 2 та складається з двох доменів, границя доменів проходить через два маршрутизатори. У позначеннях першого домену (рис. 2) – це маршрутизатори R_3^1 та R_4^1 , а в позначеннях другого – R_1^2 та R_2^2 . У розривах каналів зв’язку показана їхня пропускна здатність (1/с).

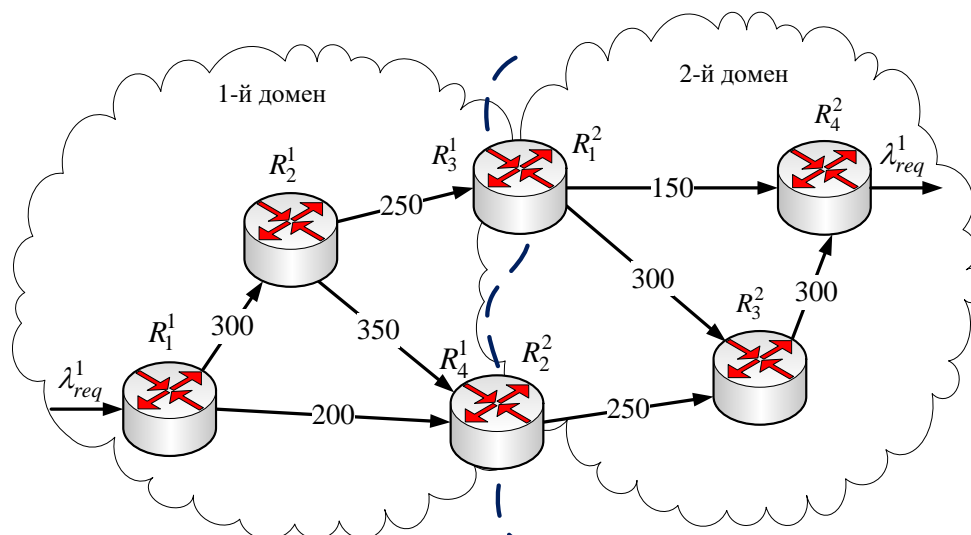


Рис. 2. Приклад структури ІКМ, яка підлягала дослідженню

Необхідно розв'язати задачу міждоменної маршрутизації потоку пакетів, який передається, наприклад, між маршрутизаторами R_1^1 та R_4^2 . Тоді вектори \vec{x}_1 та \vec{x}_2 , що визначають результат розв'язання задачі маршрутизації одного (першого) потоку в першому і другому доменах відповідно, набуватимуть такого вигляду:

$$\vec{x}_1 = \begin{bmatrix} x_{1,2}^{1,1} \\ x_{1,4}^{1,1} \\ x_{2,3}^{1,1} \\ x_{2,4}^{1,1} \end{bmatrix} \quad \text{та} \quad \vec{x}_2 = \begin{bmatrix} x_{1,3}^{2,1} \\ x_{1,4}^{2,1} \\ x_{2,3}^{2,1} \\ x_{3,4}^{2,1} \end{bmatrix}.$$

З урахуванням введених позначень і проведеної декомпозиції умови взаємодії (8) першого та другого доменів (рис. 2) мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \text{для маршрутизатора } R_3^1 (R_1^2): & \quad x_{1,3}^{2,1} + x_{1,4}^{2,1} = x_{2,3}^{1,1}; \\ \text{для маршрутизатора } R_4^1 (R_2^2): & \quad x_{2,3}^{2,1} = x_{1,4}^{1,1} + x_{2,4}^{1,1}. \end{aligned}$$

У зв'язку з цим матриці міждоменної взаємодії для випадку симетричної структури доменів мають розмір (2×4) та можуть бути записаними у формі:

$$C_{1,2}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{та} \quad C_{2,1}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

III. Умови забезпечення нормованої за доменами якості обслуговування в інфокомунікаційній мережі

Для кожного потоку, який циркулює в ІКМ, на його швидкість передачі, середню міжкінцеву (end-to-end) затримку та ймовірність втрат пакетів встановлюються певні обмеження щодо їх граничних (мінімальних та/або максимальних) значень, які і визначають рівень якості обслуговування користувача. У випадку підтримки мультидо-

менної архітектури ІКМ забезпечення заданих значень міжкінцевих показників якості обслуговування нерідко реалізується на підставі їх попереднього нормування. Введемо наступні позначення:

τ_{req}^k – вимоги щодо граничного значення середньої міжкінцевої (end-to-end) затримки пакетів k -го потоку в ІКМ, яка заміряється між вхідним маршрутизатором домена-джерела та вихідним маршрутизатором-отримувачем пакетів k -го потоку. Для прикладу структури ІКМ, наведеної на рис. 2, величина τ_{req}^k визначає гранично допустиме значення для середньої затримки пакетів, які передаються в мультидоменній мережі між маршрутизаторами R_1^1 та R_4^2 ;

$\tau_{req}^{p,k}$ – нормовані вимоги щодо середньої затримки пакетів k -го потоку у p -му домені ІКМ ($\tau^{p,k}$). Значення $\tau^{p,k}$ заміряється в залежності від типу p -го домену наступним чином:

- якщо p -й домен є джерелом пакетів k -го потоку, то $\tau^{p,k}$ визначає величину середньої затримки пакетів, які передаються за будь-яким маршрутом від маршрутизатора-джерела k -го потоку до довільного приграничного маршрутизатора з підмножини $B_{out}^{p,k}$. Для прикладу структури ІКМ, наведеної на рис. 2, величина $\tau_{req}^{1,1}$ визначає вимоги щодо середньої затримки пакетів, які передаються в першому домені між маршрутизаторами R_1^1 та R_3^1 або між R_1^1 та R_4^1 ;

- якщо p -й домен є одержувачем пакетів k -го потоку, то $\tau^{p,k}$ визначає величину середньої затримки пакетів, які передаються за будь-яким маршрутом від довільного приграничного маршрутизатора з підмножини $B_{in}^{p,k}$ до маршрутизатора-одержувача k -го потоку цього ж домену. Для прикладу структури ІКМ, наведеної на рис. 2, величина $\tau_{req}^{2,1}$ визначає вимоги щодо середньої затримки пакетів, які передаються в другому домені між маршрутизаторами R_1^2 та R_4^2 або між R_2^2 та R_4^2 ;

- якщо p -й домен є транзитним для пакетів k -го потоку, то $\tau^{p,k}$ визначає середню затримку пакетів, які передаються за будь-яким маршрутом між довільною парою маршрутизаторів, перший з яких належить множині $B_{in}^{p,k}$, а другий – $B_{out}^{p,k}$.

Таким чином, для кожного з потоків $k \in K$ вимоги щодо середньої міжкінцевої затримки пакетів τ_{req}^k розподіляються (нормуються) деяким чином між окремими доменами з виконанням наступної умови

$$\sum_{p=1}^N \tau_{req}^{p,k} \leq \tau_{req}^k, \quad (9)$$

при цьому

$$\tau^{p,k} \leq \tau_{req}^{p,k}. \quad (10)$$

У межах даного дослідження вважається, що значення τ_{req}^k та $\tau_{req}^{p,k}$ наперед задані та повинні враховуватись при розрахунку як внутрішньодоменних, так і міждоменних маршрутів. У зв'язку з цим постає проблема щодо формулювання умов забезпечення нормованої за доменами якості обслуговування при розв'язанні задач маршрутизації в інфокомунікаційній мережі з точки зору отримання аналітичних виразів для розрахунку $\tau^{p,k}$. Ці вирази відповідно до моделі (1)-(8) мають враховувати структуру домену, пропускні здатності каналів зв'язку та характеристики потоків – їхню кількість та інтенсивність, а також залишатись адекватними в умовах реалізації багатошляхової маршрутизації (6).

Для отримання подібних умов варто скористатись функціоналом тензорного аналізу мереж, який успішно використовувався для ІКМ, що не мали мультидоменної архітектури [25-29]. Представлені в [25-29, 32-34] результати дозволяли отримати аналітичні вирази (формули) для розрахунку значень міжкінцевих QoS-показників, тобто які оцінювались та аналізувались між парою окремих маршрутизаторів. Для випадку, який розглядається в даному дослідженні, в структурі довільного домену ІКМ кожній з множин $B_{in}^{p,k}$ та/або $B_{out}^{p,k}$ можуть належати одночасно декілька маршрутизаторів, що особливо характерно для транзитних доменів. Таким чином, для врахування особливостей мультидоменної архітектури ІКМ пропонується наступна методика отримання подібних умов забезпечення нормованої якості обслуговування.

1. При маршрутизації k -го потоку для кожного p -го домену визначається пара маршрутизаторів – R_{in}^p та R_{out}^p , між якими буде розраховуватись та аналізуватись середня затримка пакетів $\tau^{p,k}$ шляхом її порівняння з $\tau_{req}^{p,k}$. У домені, який виступав джерелом пакетів k -го потоку, маршрутизатором R_{in}^p виступав маршрутизатор, через який k -й потік надходив до ІКМ. Для домену, який виступав отримувачем пакетів k -го потоку, маршрутизатором R_{out}^p виступав маршрутизатор, через який k -й потік вибував з ІКМ.

2. У структуру ІКМ на границях p -го домену, який взаємодіє з іншими доменами через два та більше маршрутизатори, вводяться додатково уявні маршрутизатори R_{in}^p та R_{out}^p , які за допомогою уявних каналів зв'язку стають суміжними для маршрутизаторів з множин $B_{in}^{p,k}$ та $B_{out}^{p,k}$ відповідно. Якщо границя між p -м та q -м доменами проходить через декілька маршрутизаторів, як це показано, наприклад, на рис. 3, то уявні маршрутизатори R_{in}^p та R_{out}^p співпадають.

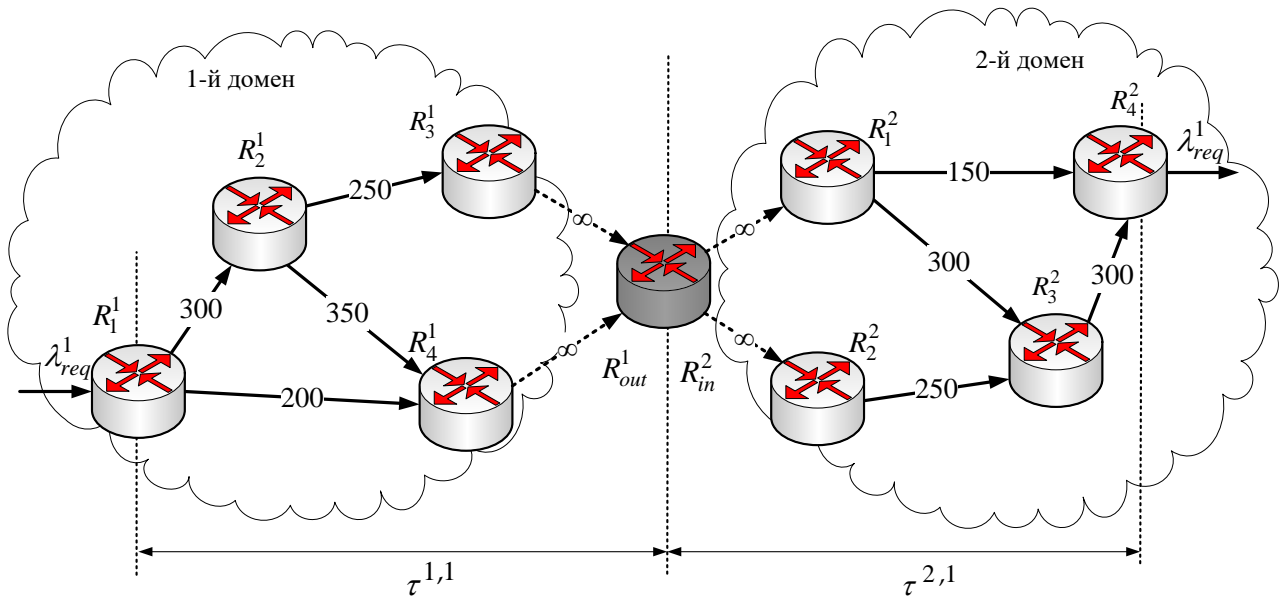


Рис. 3. Принцип введення в структуру ІКМ уявних маршрутизаторів та каналів зв'язку

Введення уявних маршрутизаторів обумовлене тим, що значення середньої міжкінцевої затримки пакетів k -го потоку в p -му домені ІКМ ($\tau^{p,k}$) тепер можна оцінювати та аналізувати вже між парою маршрутизаторів R_{in}^p та R_{out}^p на підставі підходу, запропонованого в роботах [25-29, 32-34]. Для того, щоб затримки пакетів в уявних каналах зв'язку, які з'єднують реальні приграничні маршрутизатори з уявними, не впливали на розрахунок $\tau^{p,k}$, їхні пропускні здатності в ході розрахунків повинні прямувати до $+\infty$.

3. З метою подальшої геометризації структури ІКМ здійснено наскрізну нумерацію каналів зв'язку у p -му домені ІКМ. Для цього множини каналів ІКМ, які належать до p -го домену, позначимо через $V^p = \{v_z^p, z = \overline{1, n_p^{\sim}}\}$, де n_p^{\sim} та m_p^{\sim} – кількість відповідно каналів зв'язку та маршрутизаторів у p -му домені з урахуванням введених уявних елементів мережі. Так, для прикладу структури ІКМ, наведеної на рис. 3, $n_1^{\sim} = n_2^{\sim} = 6$ та $m_1^{\sim} = m_2^{\sim} = 5$. Подібне збільшення числа каналів зв'язку та маршрутизаторів призводить до зростання кількості маршрутних змінних $x_{i,j}^{p,k}$ із заміною умов (3) на наступні умови збереження потоку на маршрутизаторах p -го домена:

$$\begin{cases} \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 1, \text{ якщо } R_i^p = R_{in}^p; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 0, \text{ якщо } R_i^p \neq R_{in}^p, R_{out}^p; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = -1, \text{ якщо } R_i^p = R_{out}^p. \end{cases} \quad (11)$$

Відповідно до методології тензорного моделювання ІКМ, запропонованої в роботах [25-29, 32-34], структура домену визначає анізотропний простір, утворений координатними шляхами. Як координатні шляхи можуть виступати гілки (канали) мережі, контури, міжполюсні шляхи і вузлові пари, де полюсами мережі виступають маршрутизатори R_{in}^p та R_{out}^p . Розмірність цього простору визначається загальним числом гілок у мережі та дорівнює n_p^{\sim} [25-29, 32-34]. З усіх можливих міжполюсних (а саме, міжкінцевих від відправника до отримувача) шляхів у p -му домені оберемо κ_p лінійно незалежних $\{\gamma_i, i = \overline{1, \kappa_p}\}$. Тоді як множину внутрішніх вузлових пар представлено множиною $\{\varepsilon_j, j = \overline{1, \mathcal{G}_p}\}$. Зазначені множини формують базис n_p^{\sim} -вимірного простору структури мережі.

$$\kappa_p^{\sim} = n_p^{\sim} - m_p^{\sim} + 2; \quad \mathcal{G}_p^{\sim} = m_p^{\sim} - 2; \quad n_p^{\sim} = \kappa_p^{\sim} + \mathcal{G}_p^{\sim}. \quad (12)$$

При маршрутизації k -го потоку в обраному просторі p -й домен може бути представлений змішаним двовалентним тензором

$$Q = T \otimes \Lambda, \quad (13)$$

де \otimes – оператор тензорного множення, а компонентами тензора Q є одновалентний коваріантний тензор середніх затримок пакетів T та одновалентний контраваріантний тензор середніх інтенсивностей потоків Λ в координатних шляхах обраного домену. Надалі індекс p у всіх тензорних величинах та їхніх проекціях буде опущений для більшої наочності сприйняття інформації, тому що мова завжди буде йти лише про фізичні величини, які пов'язані з p -м доменом.

Вираз (13) може бути записано в індексній формі:

$$q_j^i = \tau_j \lambda^i, \quad (i, j = \overline{1, n_p^{\sim}}), \quad (14)$$

де τ_j – середня затримка пакетів уздовж j -го координатного шляху (с); λ^i – середня інтенсивність потоку пакетів, переданого уздовж i -го координатного шляху (1/с).

В обраному n_p^{\sim} -вимірному просторі тензор (14) буде заданий в одній з двох систем координат. Перша – система координат (СК) гілок мережі $\{v_k, k = \overline{1, n_p^{\sim}}\}$, друга – СК лінійно незалежних міжполюсних шляхів $\{\gamma_i, i = \overline{1, \kappa_p}\}$ і внутрішніх вузлових пар $\{\varepsilon_j, j = \overline{1, \mathcal{G}_p}\}$, проекції тензора в якій будуть позначатися індексом $\gamma\varepsilon$. У роботах [25-29, 32-34] показано, що параметри, які пов'язані із законом збереження, наприклад, інтенсивність потоку, є контраваріантними компонентами, тоді як адитивні метрики, наприклад, середня затримка пакетів, відносяться до коваріантних компонент тензора (14).

Як показано в роботах [25-29, 32-34], метрика введеного геометричного простору повністю визначається типом реалізованої дисципліни обслуговування пакетів на маршрутизаторах ІКМ, що позначається на формі та змісті метричного тензора G . Наприклад, у разі моделювання функціонування інтерфейсу маршрутизаторів мережі системою масового обслуговування (СМО) М/М/1 координати проекції метричного тензора G у базисі гілок, що представлені діагональними елементами матриці G_v розміру $n_p \times n_p$, будуть визначатись виразом:

$$g_v^{zz} = \lambda_v^z (\varphi_z - B_v^z), \quad (15)$$

де λ_v^z – інтенсивність k -го потоку в z -му каналі зв'язку при використанні наскрізної нумерації каналів; B_v^z – інтенсивність агрегованого потоку в z -му каналі зв'язку, що визначається таким чином:

$$\lambda_v^z = \lambda_{req}^k x_{i,j}^{p,k}, \quad B_v^z = \sum_{k \in K} \lambda_{req}^k x_{i,j}^{p,k} \quad \text{при } v_z^p = E_{i,j}^p. \quad (16)$$

Проекції метричного двічі контраваріантного метричного тензора G при зміні СК його розгляду перетворюються за законом

$$G_{\gamma\epsilon} = A^t G_v A, \quad (17)$$

де $G_{\gamma\epsilon}$ – проекція метричного тензора в СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар; A – $n_p \times n_p$ матриця коваріантного координатного перетворення при переході від СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар до базису гілок; $[\cdot]^t$ – операція транспонування матриці.

Як показано в [32-34], матрицю $G_{\gamma\epsilon}$ можна представити як

$$G_{\gamma\epsilon} = \left\| \begin{array}{c|c} G_{\gamma\epsilon}^{(1)} & G_{\gamma\epsilon}^{(2)} \\ \hline G_{\gamma\epsilon}^{(3)} & G_{\gamma\epsilon}^{(4)} \end{array} \right\|, \quad (18)$$

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

Тоді, як показано в [32-34], умови забезпечення нормованої якості обслуговування у p -му домені при маршрутизації k -го потоку (10) приймають вигляд:

$$\Lambda_\gamma \leq \left(G_{\gamma\epsilon}^{(1)} - G_{\gamma\epsilon}^{(2)} \left[G_{\gamma\epsilon}^{(4)} \right]^{-1} G_{\gamma\epsilon}^{(3)} \right) T_\gamma^{req}, \quad (19)$$

де Λ_γ – κ_p^\sim -вимірний вектор інтенсивностей потоку в міжполюсних шляхах обраного домену з координатами λ_γ^i , які пов'язані між собою наступною умовою

$$\sum_{i=1}^{\kappa} \lambda_\gamma^i = \lambda_{req}^k; \quad (20)$$

T_γ^{req} – κ_p^\sim -вимірний вектор середніх затримок пакетів у міжполюсних шляхах обраного домену, кожна з координат τ_i^γ якого відповідає умові

$$\tau_i^\gamma = \tau_{req}^{p,k}, \quad i = \overline{1, \kappa_p^\sim}; \quad (21)$$

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

Фактично в правій частині нерівності (19) представлено вираз для розрахунку пропускну здатності кожного з κ_p^\sim базисних міжполюсних шляхів у p -му домені, тобто між маршрутизаторами R_{in}^p та R_{out}^p .

IV. Умови забезпечення нормованої за доменами якості обслуговування в інфокомунікаційній мережі

Грунтуючись на математичній моделі (1)-(19) в основу методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації буде покладено розв'язання оптимізаційної задачі щодо розрахунку векторів маршрутних змінних \bar{x}_p^k ($p = \overline{1, N}, k \in K$) при дотриманні обмежень (4), (6), (8), (11) і (19)-(21) шляхом використання наступного критерію оптимальності маршрутних рішень:

$$\min F, \quad F = \sum_{p \in N} \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k, \quad (22)$$

де H_p^k – діагональна матриця вагових коефіцієнтів, координатами якої, як правило [5, 6], є маршрутні метрики каналів зв'язку p -го домену ІКМ.

Цільова функція (22) кількісно характеризує умовні сумарні витрати на організацію процесу міждоменної маршрутизації в ІКМ. Для надання шуканим рішенням властивостей ієрархічно-координаційної маршрутизації в ході розв'язання оптимізаційної задачі, пов'язаної з мінімізацією виразу (22) при наявності обмежень (4), (6), (8), (11) і (19)-(21), буде використано принцип цільової координації [11, 13, 15, 19, 20]. Тоді, переходячи до задачі на безумовний екстремум

$$\min_{\bar{x}} F = \max_{\bar{\mu}} L,$$

необхідно максимізувати по $\bar{\mu}$ лагранжіван виду:

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - C_{q,p}^k \bar{x}_q^k), \quad (23)$$

де $\bar{\mu}$ – вектор множників Лагранжа; $\bar{\mu}_{p,q}$ – підвектори вектору $\bar{\mu}$, віднесені до кожної з векторно-матричних умов взаємодії доменів (8).

З тієї причини, що в рамках принципу цільової координації вектори множників Лагранжу $\bar{\mu}$ розраховуються на верхньому рівні та для нижнього рівня є відомими значеннями, то вираз (23) можна представити в наступній декомпозиційній формі:

$$L = \sum_{p=1}^N L_p, \quad (24)$$

$$L_p = \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\bar{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k,$$

де K_p^+ – підмножина потоків, які надходять до p -го домену з інших доменів; K_p^- – підмножина потоків, які виходять з p -го домену ($K_p^+, K_p^- \subset K$).

Якщо k -й потік надходить в ІКМ через p -й домен, то $k \in K_p^-$. Відповідно до проведеної функціональної декомпозиції у виразі (24) всі складові віднесені до p -го домену, а друга і третя складові в цьому виразі відповідають за узгодження порядку маршрутизації відповідно вихідних і вхідних потоків для p -го домену ІКМ. Таким чином, у рамках пропонованого методу загальна проблема ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації формулюється як задача дворівневої оптимізації. Сам метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації передбачає таку послідовність дій (рис. 4):

1. На нижньому ієрархічному рівні SDN-контролери доменів проводять збір та аналіз інформації про їхній стан – топологію, пропускі здатності каналів зв'язку, характеристики потоків, що циркулюють у мережі. Це дозволяє сформувати матриці маршрутних метрик H_p^k та міждоменної взаємодії $C_{p,q}^k$, що входять до виразу (24), та структуру обмежень (8).

2. Відповідно до результатів проведеного аналізу SDN-контролери доменів здійснюють розрахунок маршрутних змінних, представлених векторами \bar{x}_p^k ($p = \overline{1, N}$, $k \in K$), в ході мінімізації лагранжіанів (24) при обмеженнях (4), (6), (11) та (19)-(21). Результати розрахунків направляються на верхній рівень – на SDN-контролер програмно-конфігурованої мережі взагалі.

3. На верхньому рівні SDN-контролер мережі здійснює координацію рішень, отриманих на нижньому рівні SDN-контролерами доменів, з метою забезпечення виконання умов міждоменної взаємодії (8) шляхом модифікації векторів множників Лагранжа в ході виконання градієнтної ітераційної процедури:

$$\bar{\mu}_{p,q}^k(a+1) = \bar{\mu}_{p,q}^k(a) + \nabla \bar{\mu}_{p,q}^k, \quad (25)$$

де a – номер ітерації; $\nabla \bar{\mu}_{pq}^k$ – градієнт функції (23), який розраховується відповідно до одержаних на нижньому рівні результатів розв’язання задач маршрутизації \bar{x}_p^{k*} ($p = \overline{1, N}$, $k \in K$) у кожному конкретному домені:

$$\nabla \bar{\mu}_{p,q}^k(x) \Big|_{x=x^*} = C_{p,q} \bar{x}_p^k - C_{q,p} \bar{x}_q^k. \quad (26)$$

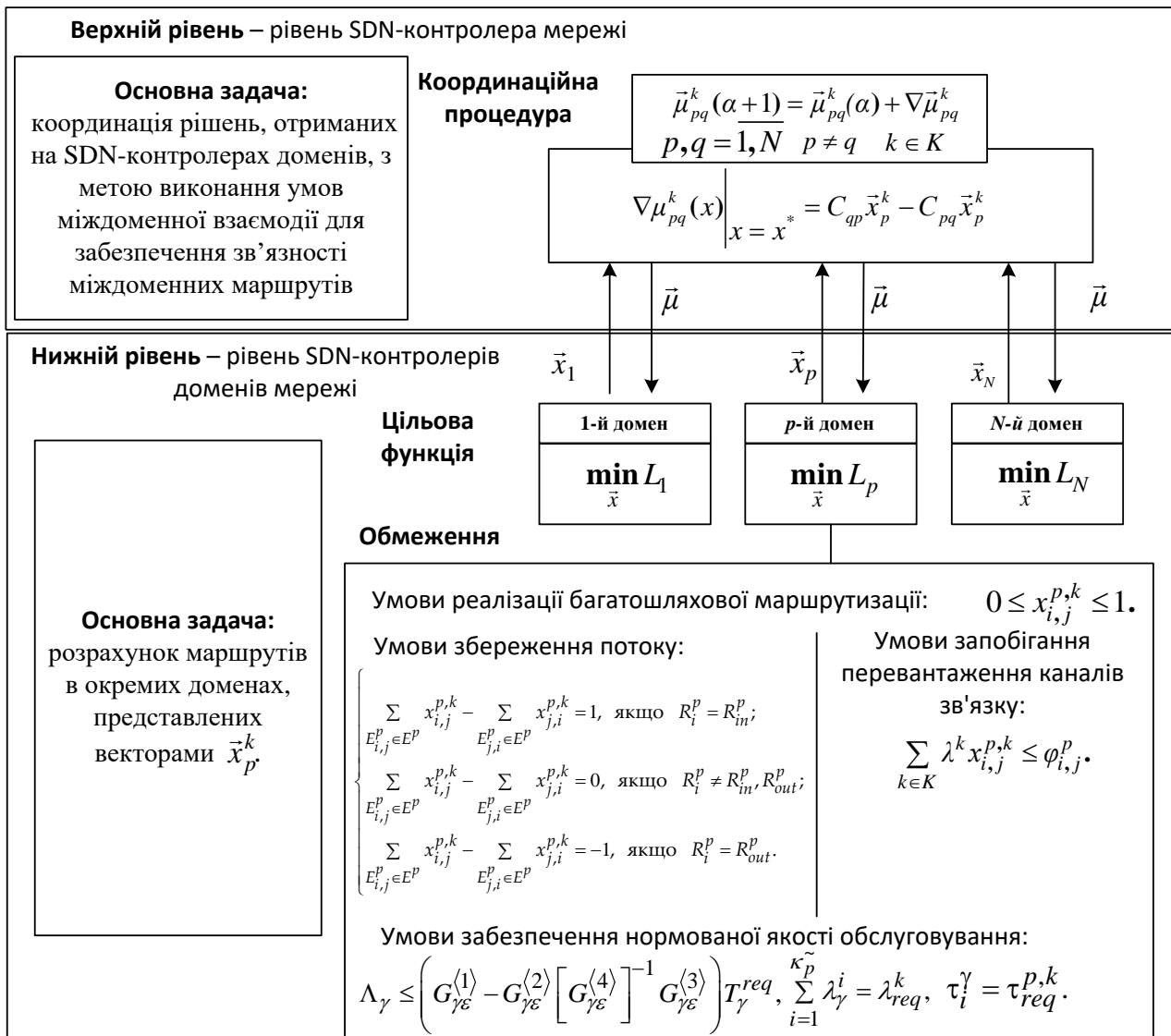


Рис. 4. Структура дворівневого методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі

4. Модифіковані значення векторів множників Лагранжа $\bar{\mu}_{p,q}^k$ передаються на нижній рівень (на SDN-контролери доменів) для розрахунку нових маршрутних векторів \bar{x}_p^k . Координати векторів множників Лагранжа $\bar{\mu}_{p,q}^k$ виступали як модифікації маршрутних метрик для каналів зв'язку, які не утворювали зв'язний маршрут. Процес

розрахунків набуває ітераційного характеру. Зв'язність міждоменних маршрутів буде забезпечуватися при наближенні значень координат градієнту (26) до нуля.

Таким чином, запропонований метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування дозволяє відмовитись від централізації управління мережею, а також розподілити управління між SDN-контролерами доменів, що позитивно впливає на масштабованість маршрутних рішень. Проте ефективність запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації з точки зору оптимальності та оперативності одержуваних рішень багато в чому залежить від швидкості збіжності координаційної процедури (25), (26). З технологічної точки зору мінімізація числа ітерацій процедури (25), (26) при отриманні шуканого оптимального рішення націлює на зменшення обсягу службового трафіка, що передається між ієрархічними рівнями про результати розрахунків на кожній з ітерацій, і на зменшення загального часу розв'язання задачі міждоменної маршрутизації в ІКМ у цілому [11-15].

V. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування

Проведемо дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в ІКМ з метою підтвердження його працездатності, адекватності та ефективності отриманих результатів розрахунку. В рамках розрахункового прикладу проаналізуємо характер рішень задачі ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації для варіанта структури інфокомунікаційної мережі, яка показана на рис. 2. Мережа складається з двох доменів (рис. 2). Перший і другий домени містять по чотири маршрутизатори: $R^1 = \{R_1^1, R_2^1, R_3^1, R_4^1\}$, $R^2 = \{R_1^2, R_2^2, R_3^2, R_4^2\}$. Взаємодія між доменами здійснюється через маршрутизатори R_3^1 (R_1^2) та R_4^1 (R_2^2). Нехай вузлом-джерелом пакетів виступає маршрутизатор R_1^1 , що знаходиться в першому домені, а вузлом-отримувач – маршрутизатор R_4^2 , що знаходиться відповідно в другому домені. У розривах каналів зв'язку (рис. 2) показана їхня пропускна здатність ($1/c$). На головній діагоналі матриці H_p^k (22) розташовані величини $10^8/\phi_{i,j}^p$ за аналогією зі значеннями маршрутних метрик, які використовуються в протоколі OSPF [5, 6].

Як приклад розглянемо однопотоковий випадок, коли в ході дослідження вимоги щодо рівня якості обслуговування в мультидоменній мережі задавались наступними параметрами $\lambda_{req}^1 = 350$ 1/с та $\tau_{req}^1 = 100$ мс. У першому випадку нормування рівня якості обслуговування між доменами мережі за середньою затримкою здійснювалось таким чином:

$$\tau_{req}^{1,1} = 40 \text{ мс}, \tau_{req}^{2,1} = 60 \text{ мс}. \quad (27)$$

Тоді на рис. 5 представлено початкове рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації, тобто до початку роботи координаційної процедури (25) та (26). На цьому рисунку в розривах каналів зв'язку вказані наступні дані (зверху вниз): інтенсивність потоку пакетів, пропускна здатність, а також середня затримка пакетів у цьому каналі зв'язку.

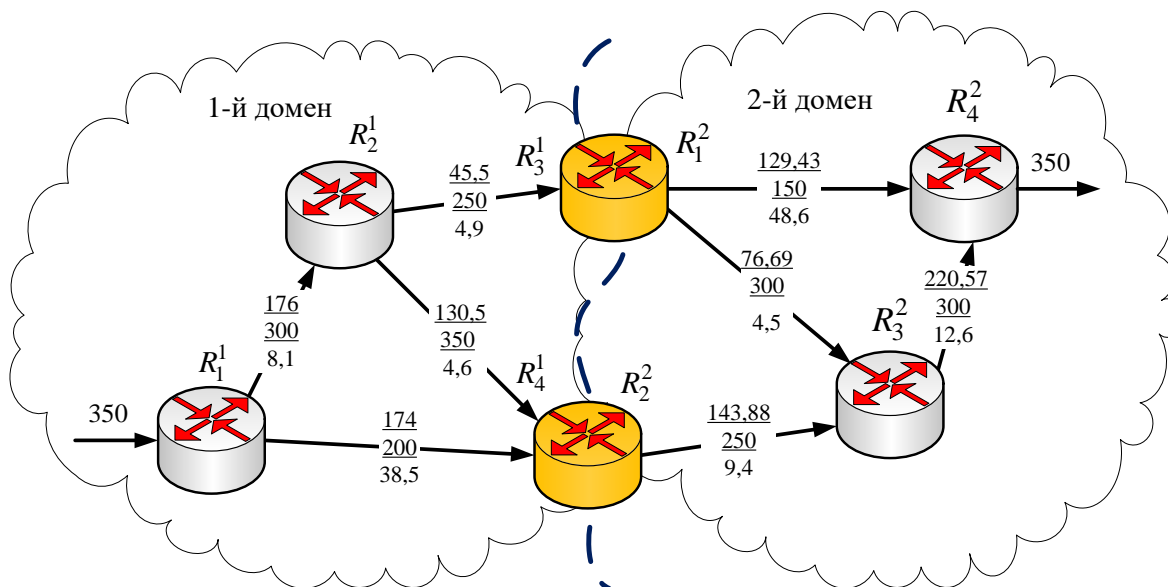


Рис. 5. Початкове рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації при вимогах (27)

Характерною рисою отриманого рішення (рис. 5) є те, що виконуються умови забезпечення нормованої QoS (10): максимальна наскрізна затримка в першому домені (від маршрутизатора-джерела R_1^1 до границі доменів) складала 38,5 мс, а в другому домені (від границі доменів до маршрутизатора-отримувача R_4^2) – 48,6 мс. Проте була відсутня зв'язність міждоменних маршрутів, тому що умови міждоменної взаємодії (8) при мінімізації лагранжіану (24) не виконувались. Це пов'язано з тим, що розрахунок маршрутів для кожного з доменів відбувається незалежно один від одного на відповідних SDN-контролерах доменів. Для забезпечення зв'язності міждоменних маршрутів у межах запропонованого методу використовувалась координаційна процедура (25), (26), яка технологічно реалізовувалась на SDN-контролері мережі взагалі. Так на рис. 6 показано порядок маршрутизації в мультидоменній мережі після першої ітерації координаційної процедури (25), (26), при якому умови (8) знову не виконувались.

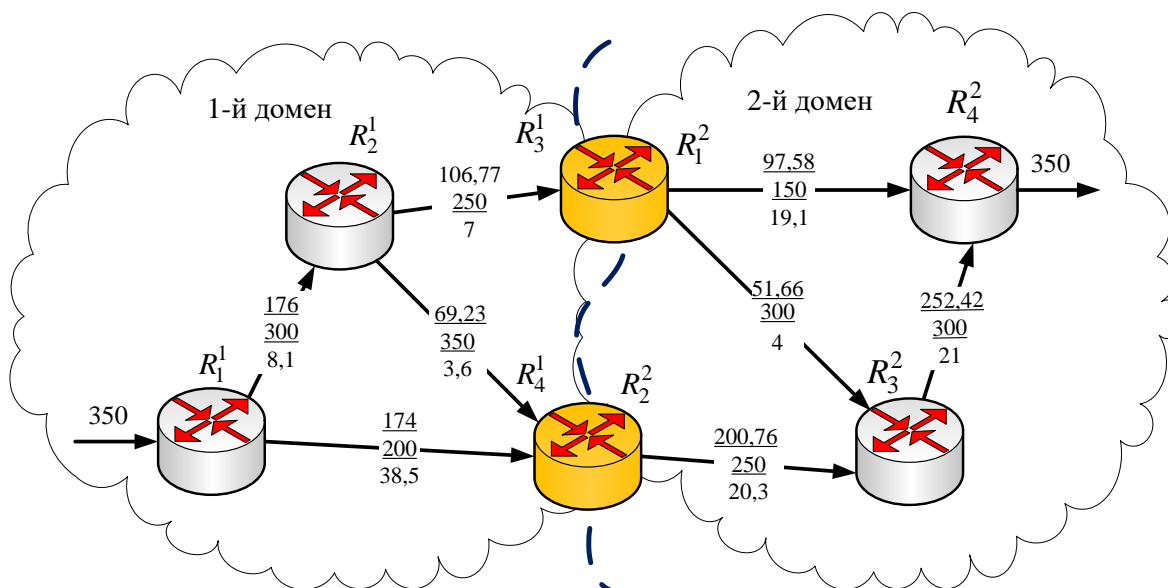


Рис. 6. Рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації після першої ітерації координаційної процедури при вимогах (27)

Зв'язність міждомених маршрутів була забезпечена лише після третьої ітерації координаційної процедури (25), (26). Скоординоване рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації представлено на рис. 7, у межах якого забезпечувались задані нормовані значення середніх затримок пакетів у кожному з доменів (27): у першому домені максимальна наскрізна затримка складала 38,5 мс, а у другому – 58,3 мс.

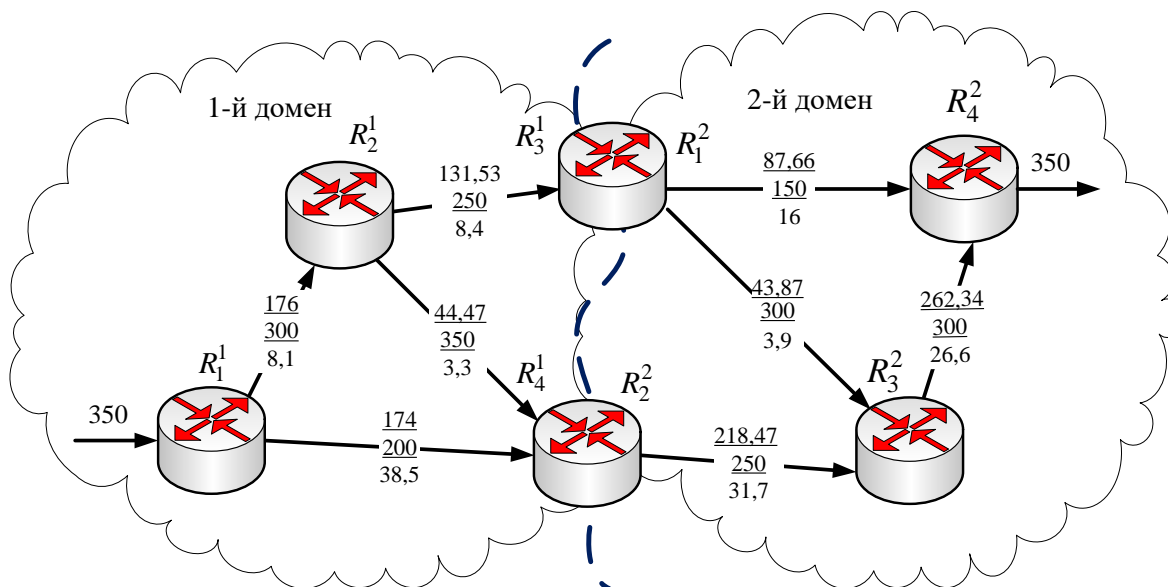


Рис. 7. Кінцеве (скоординоване) рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації (після третьої ітерації координаційної процедури) при вимогах (27)

У другому випадку нормування рівня якості обслуговування між доменами мережі за середньою затримкою здійснювалось зворотнім чином:

$$\tau_{req}^{1,1} = 60 \text{ мс}, \tau_{req}^{2,1} = 40 \text{ мс}, \quad (28)$$

а інші QoS-вимоги залишилися без змін, тобто $\lambda_{req}^1 = 350$ 1/с та $\tau_{req}^1 = 100$ мс.

Початкове рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації відповідно до вимог (27) показано на рис. 8, на якому, як і раніше на рис. 5 – рис. 7, у розривах каналів зв'язку вказані наступні дані (зверху вниз): інтенсивність потоку пакетів, пропускна здатність, а також середня затримка пакетів у цьому каналі зв'язку. Виконання QoS-вимог (10) підтверджувалось тим, що максимальна наскрізна затримка в першому домені складала 57,5 мс, а в другому домені – 36,2 мс, однак зв'язність міждоменних маршрутів не забезпечувалась.

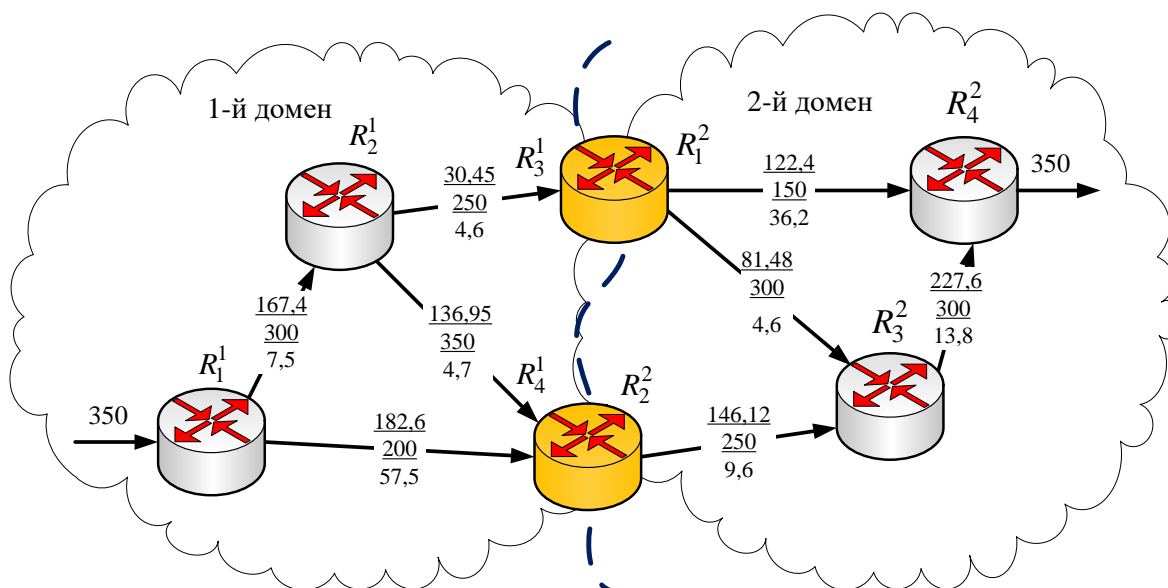


Рис. 8. Початкове рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації при вимогах (28)

На координацію маршрутних рішень, як і в попередньому варіанті розрахунків, вистачило трьох ітерацій координаційної процедури (25), (26). Результат, який отримано після першої ітерації, представлено на рис. 9, а скоординоване рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації при вимогах (28) показано на рис. 10.

У межах цього рішення вдалось забезпечити не тільки зв'язність міждоменних маршрутів, але й нормовану якість обслуговування за наскрізною середньою затримкою пакетів на рівні 57,5 мс для першого домену та 39,8 мс для другого домену ІКМ, що відповідало встановленим вимогам (10) та (28).

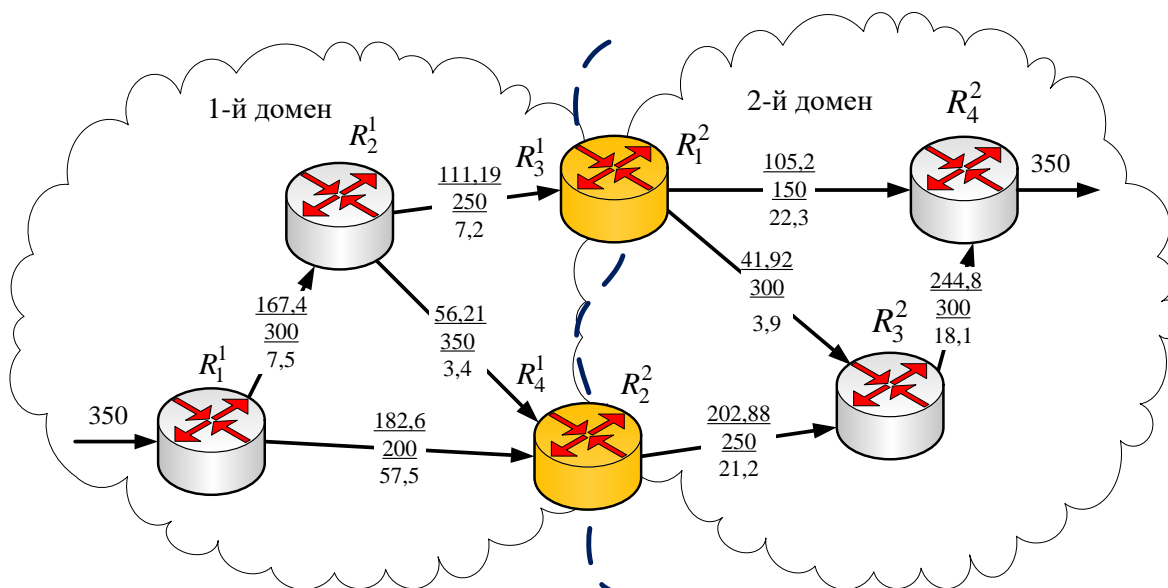


Рис. 9. Рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації після першої ітерації координаційної процедури при вимогах (28)

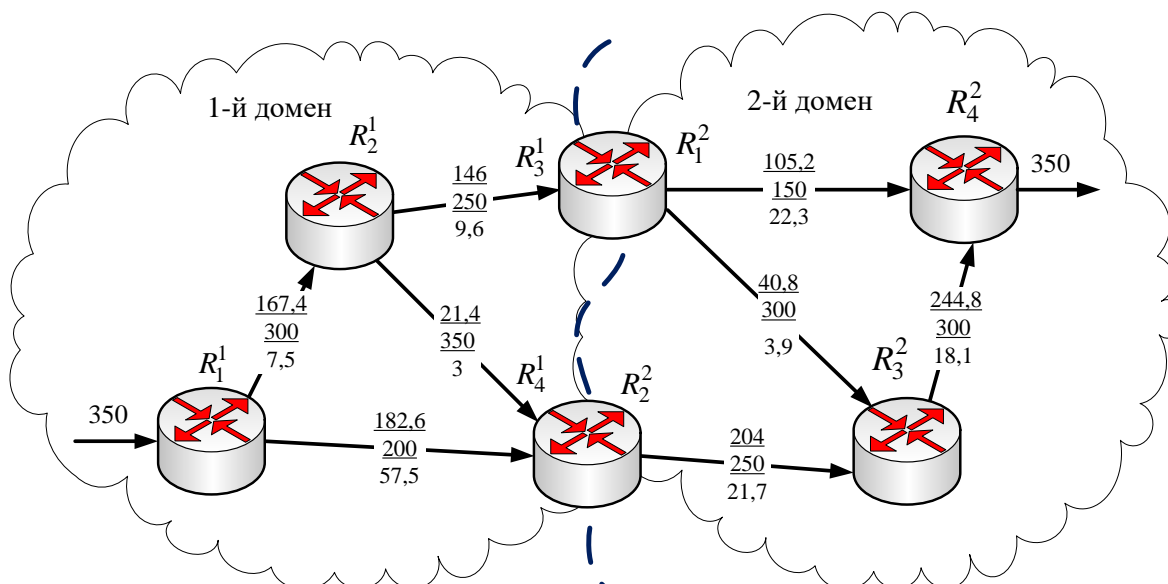


Рис. 10. Кінцеве (скоординоване) рішення задачі міждоменної QoS-маршрутизації (після третьої ітерації координаційної процедури) при вимогах (28)

Висновки

1. У роботі запропоновано метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі, який є подальшим розвитком рішень, представлених у роботах [13-15, 29]. Новизною метода є те, що отримані за його допомогою маршрутні рішення спрямовані не тільки на підвищення масштабованості ІКМ, але й на забезпечення нормованої якості обслуговування за показниками середньої швидкості передачі та наскрізної середньої затримки пакетів.

2. Запропонований метод заснований на використанні декомпозиційної потокової моделі міждоменної маршрутизації (1)-(8), основу якої склали умови реалізації одно- (5) та багатошляхової (6) маршрутизації, умови збереження потоку (3), запобігання перевантаження каналів зв'язку та ІКМ взагалі (4), а також умови міждоменної взаємодії (8), виконання яких гарантувало зв'язність міждоменних маршрутів. Потокова модель міждоменної маршрутизації була доповнена умовами забезпечення нормованої якості обслуговування (9), (10) та (19)-(21). Сформулювати в аналітичному вигляді умови забезпечення нормованої якості обслуговування (19)-(21) вдалося на підставі тензорного моделювання ІКМ (12)-(18) у геометричному просторі, який створювався координатними шляхами – гілками (каналами), міжполюсними маршрутами та внутрішніми вузловими парами.

3. В межах запропонованого методу (рис. 4) задачу міждоменної QoS-маршрутизації вдалося представити в оптимізаційній формі з квадратичним критерієм оптимальності (22). Для розв'язання поставленої оптимізаційної задачі використано принцип цільової координації з теорії ієрархічних багаторівневих систем управління [19, 20]. Це дозволило коректно сформулювати та забезпечити розв'язання задач, які покладені на два ієрархічні рівні. Нижній рівень (рівень SDN-контролерів доменів) відповідав за розрахунок внутрішньодоменних маршрутів на підставі мінімізації виразу (24) відповідно до обмежень (4), (6), (11) та (19)-(21). Верхній рівень (рівень SDN-контролера мережі) відповідав за координацію рішень нижнього рівня шляхом виконання умов міждоменної взаємодії (8) для забезпечення зв'язності міждоменних маршрутів у межах градієнтної процедури (25), (26). Координація маршрутних рішень завершувалась при наближенні градієнта (26) до нуля.

4. В ході дослідження запропонованого методу міждоменної QoS-маршрутизації на ряді розрахункових прикладів підтверджена його працездатність та ефективність з точки зору забезпечення нормованої якості обслуговування. Експериментально встановлено, що метод сходився до оптимального рішення за кінцеву кількість ітерацій (25), (26). Для структури мережі, яка була обрана як тестова (рис. 2), кількість ітерацій координаційної процедури (25), (26) при відповідному налаштуванні градієнтного пошуку не перевищувала трьох. Зменшення кількості подібних ітерацій сприяє зниженню обсягів службового трафіка, який передається в мережі між маршрутизаторами та SDN-контролерами різних рівнів, а також мінімізації загального часу розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації.

5. Перспектива подальших досліджень у цій області полягає у тому, щоб норми на QoS-показники, які повинен забезпечувати кожен окремий домен, не встановлювались статично, наприклад, на SDN-контролері ІКМ, а могли за необхідності динамічно перерозподілятися між доменами з виконанням умов (9) відповідно до їх структури, пропускної здатності та завантаженості.

Список літератури

1. *Wibowo F.X.A. et al.* Multi-domain software defined networking: research status and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, Vol. 87. P. 32-45.
2. *Katsalis K. et al.* Implementation experience in multi-domain SDN: Challenges, consolidation and future directions. *Computer Networks*, 2017, Vol. 129. P. 142-158.
3. *Bliat O., Matoun M. Ben, Benaini R.* An Overview on SDN Architectures with Multiple Controllers. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2016. Vol. 2, P. 1-8. DOI: 10.1155/2016/9396525.
4. *Medhi D., Ramasamy K.* Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures (The Morgan Kaufmann Series in Networking) 2nd Edition. Cambridge, MA, USA: Elsevier Inc., 2018. 1018 p.
5. *Misra S., Goswami S.* Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies 1st Edition. Wiley, 2017. 536 p.
6. *Uyless D. Black.* IP routing protocols: RIP, OSPF, BGP, PNNI and Cisco routing protocols. Prentice Hall PTR, 2000. 287 p.
7. *Szigeti T., Zacks D., Falkner M., Arena S.* Cisco Digital Network Architecture: Intent-based Networking for the Enterprise. Cisco Press, 2018. 800 p.
8. *Wójcik R., Domżał J., Duliński Z.* A survey on methods to provide interdomain multipath transmissions. *Computer Networks*. 2016. Vol. 108. P. 233-259.
9. *Wright B.* Inter-area routing, path selection and traffic engineering. Enfield: data Connection Limited. 2003. 42 p.
10. *Eun J.S., Jung H.* The implementation of domain routing protocol in hierarchical domain network model // 2015 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS) (Busan, South Korea, 19-21 Aug. 2015). Busan, 2015. P. 396-399.
11. *Lemeshko O., Nevzorova O., Hailan A.M.* Hierarchical Method of Routing and Resource Allocation in DiffServ-TE Network. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2018): 14th International Conference (Lviv-Slavske, Ukraine, 20-24 Feb. 2018)*. Lviv, 2018. P. 1-5.
12. *Лемешко А.В., Хайлан А.М.* Многоуровневое управление трафиком в сети MPLS-TE DiffServ на основе координационного принципа прогнозирования взаимодействий. *Проблеми телекомунікацій*. 2010. № 1 (1). С. 35–44. URL: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/101_lemeshko_traffic.pdf.
13. *Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O.* Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting. *Transport and Telecommunication Journal*. 2017 18(2). P. 155-167.
14. *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. Vol. 75. P. 1137- 1151.
15. *Лемешко А.В., Невзорова Е.С., Ильяшенко А.Е.* Разработка и анализ метода иерархическо-координационной междоменной маршрутизации в телекоммуникационной сети. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2016. №4 (44). С. 49- 67.
16. *White R., Tantsura J. E.* Navigating Network Complexity: Next-generation routing with SDN, service virtualization, and service chaining. AddisonWesley Professional, 2015. 320 p.
17. *Lin S.C., Akyildiz I.F., Wang P., Luo M.* QoS-aware Adaptive Routing in Multi-Layer Hierarchical Software Defined Networks: A Reinforcement Learning Approach. 2016 IEEE

International Conf. on Services Computing (San Francisco, CA, USA, 27 June-2 July 2016). San Francisco, 2016. P. 25-33.

18. *Amin R., Reisslein M., Shah N.* Hybrid SDN Networks: A Survey of Existing Approaches. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. 48 p. DOI: 10.1109/COMST.2018.2837161.

19. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.

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

21. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсева О.Ю.* Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний. Наукові записки УНДІЗ. 2009. №1(9). С. 3-26.

22. *Поповский В. В., Лемешко А.В., Евсева О.Ю.* Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем. Проблеми телекомунікацій. 2011. № 2(4). С. 3.-41. Режим доступа: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/112_popovsky_functional.pdf.

23. *Лемешко О.В., Евсева О.Ю., Симоненко Д.В.* Модель динамічного балансування мережних ресурсів у телекомунікаційній мережі. Системи обробки інформації. 2008. Вип. 5(72). С.71-74.

24. *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data communications networks. IEEE Trans. on communications. 1975. Vol. 25, № 1. P.85 – 95.

25. *Yeremenko O., Lemeshko O.* QoS Ensuring over Probability of Timely Delivery in Multipath Routing. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. 2018. Vol. 754. P. 244-254. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_25.

26. *Lemeshko O.V.* Policy-based QoS management model for multiservice networks / O.V. Lemeshko, S.V. Garkusha, O.S. Yeremenko, A.M. Hailan. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015, Omsk, Russia. Publisher: IEEE. P. 1-4.

27. *Lemeshko A.V., Evseeva O.Yu., Garkusha S.V.* Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greater Number of Indices. Telecommunications and RadioEngineering, 2014, Vol.73, No 15. P. 1339-1360.

28. *Lemeshko O., Yeremenko O.* Dynamic Presentation of tensor model for multipath QoS-routing. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference TCSET'2016. – Lviv-Slavske, Ukraine, February 23 - 26, 2016: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. P. 601-604.

29. *Лемешко А.В.* Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной // Праці УНДІРТ. Випуск №4 (40). – Одеса: Видання УНДІРТ, 2004. – С. 12-18.

30. *Lemeshko O., Yevdokymenko M., Naors Y., Anad Alsalem.* Development of the tensor model of multipath QoS-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5, Issue 2 (95). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>.

31. *Yevdokymenko M.* Routing Tensor Model with Providing Multimedia Quality. Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PICS&T-2019): International Scientific-Practical Conference–Kyiv, 2019. P. 819 - 824.

32. Лемешко А.В., Евсеєва О.Ю. Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базисе межполюсных путей и внутренних разрезов. Наукові записки УНДІЗ. 2010. Вип. 1, № 13. С. 14–26.

33. Lemeshko O.V., Yeremenko O. S., Hailan A. M. QoS solution of traffic management based on the dynamic tensor model in the coordinate system of interpolar paths and internal node pairs. Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo): Proceedings of the International Conference, Kiev, Ukraine, 11-16 Sept. 2016. IEEE, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739625.

34. Yeremenko O. Development of the dynamic tensor model for traffic management in a telecommunication network with the support of different classes of service. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6, Issue 9 (84). P. 12–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85602.