

О. В. ЛЕМЕШКО, М. О. ЄВДОКИМЕНКО

МЕТОД ІЄРАРХІЧНОЇ МІЖДОМЕННОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ МІЖКІНЦЕВОЇ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ

Предметом дослідження в статті є процеси міждоменної маршрутизації із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. **Мета** роботи – розробити метод ієрархічної міждоменної маршрутизації із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування по показнику середньої міжкінцевої затримки пакетів в мультидоменній програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі. У статті вирішуються наступні **завдання**: розробка та дослідження методу ієрархічної міждоменної маршрутизації із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. Використовуються такі методи: теорія графів, теорія тензорів, теорія ієрархічних багаторівневих систем, теорія масового обслуговування та методи математичного програмування. Отримано наступні **результати**: розроблено та досліджено метод ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування, який дозволяє на підставі балансування навантаження в доменах телекомунікаційної мережі забезпечити заданий рівень QoS за показниками продуктивності та середньої міжкінцевої затримки пакетів. **Висновки**: В роботі запропоновано метод ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням навантаження за показниками пропускної здатності і середньої міжкінцевої затримки пакетів. Новизною метода є те, що виконання QoS-вимог щодо середньої міжкінцевої затримки пакетів здійснюється не на підставі попереднього нормування її значень за доменами, а шляхом введення та реалізації дворівневої координації маршрутних рішень відповідно до принципу цільової координації. В основу запропонованого методу покладено декомпозиційну потокову модель міждоменної маршрутизації, а для отримання в аналітичному вигляді умов забезпечення міжкінцевої якості обслуговування використано тензорний опис кожного з мережних доменів. Використання запропонованого методу ієрархічної міждоменної маршрутизації дозволяє без перерозподілу каналного ресурсу, а лише на підставі балансування навантаження в доменах ТКМ забезпечити заданий рівень QoS за показниками продуктивності та середньої міжкінцевої затримки пакетів. Децентралізація обчислень маршрутів в кожному з доменів мережі на підставі використання локальної інформації про їх стан дозволяє підвищити масштабованість маршрутних рішень, а введення процедур координації дозволяє забезпечити погодженість у роботі SDN-контролерів доменів з точки зору забезпечення QoS. Дослідження запропонованого методу на ряді розрахункових прикладів підтвердило його збіжність до оптимальних рішень за кінцеву кількість ітерацій координаційної процедури.

Ключові слова: програмно-конфігурована телекомунікаційна мережа; міждоменна маршрутизація; якість обслуговування; середня міжкінцева затримка пакетів.

Вступ

Підвищення рівня глобалізації соціальних та економічних відносин призвело до зростання територіальної розподіленості сучасних телекомунікаційних систем та мереж. Телекомунікаційна інфраструктура щільно охоплює всю планету, забезпечуючи людству безперервний доступ до інфокомунікаційних сервісів, перелік яких постійно розширюється, а вимоги щодо якості обслуговування (Quality of Service, QoS) невідмінно зростають. Адекватною реакцією телекомунікаційної галузі, як складної організаційно-технічної системи, на проблеми, пов'язані з масштабованістю мережних рішень, є використання принципів ієрархічного підходу. Введення чіткої ієрархії в основу структурно-функціональної побудови телекомунікаційних мереж (ТКМ) має на меті реалізацію переваг централізованих та розподілених рішень з мінімізацією їх недоліків [1-3]. Це повинно, перш за все, проявитись в мінімізації об'єму службового трафіку, який циркулює в мережі, підвищенню оперативності мережних рішень щодо управління трафіком та мережею в цілому, забезпеченню більш високих показників надійності, відмовостійкості та якості обслуговування в цілому.

Одним з надважливих технологічних засобів щодо забезпечення якості обслуговування є протоколи маршрутизації в ТКМ. Саме на них покладаються

завдання щодо визначення та підтримки одно або множини шляхів передачі пакетів, вздовж яких би забезпечувались задані значення основних QoS-показників: пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки, джитеру та рівня втрат пакетів. Проте вирішення цієї і так досить непрості задачі суттєво ускладнюється в умовах гетерогенності та територіальної розподіленості ТКМ. Як показали результати дослідження [4-6], досить ефективним варіантом вирішення цієї задачі є використання програмно-конфігурованих мультидоменних мереж, які реалізують ієрархічний принцип введення та взаємодії контролерів управління ТКМ (рис. 1).

Декомпозиція ТКМ на домени – це рішення, яке себе добре зарекомендувало на рівні відомих протоколів ієрархічної маршрутизації BGP, PNNI, OSPF та IS-IS [7, 8]. Проте організація якісного функціонування ієрархії контролерів доменів та ТКМ в цілому на технологічному (протокольному) рівні багато в чому залежить від ефективності роботи їх математичного та алгоритмічно-програмного забезпечення, основу якого складають математичні моделі та методи маршрутизації. При цьому основними вимогами до подібних моделей та методів є, по-перше, врахування ієрархічної та мультидоменної побудови програмно-конфігурованої мережі (Software-defined Network, SDN) та розподілу функцій між контролерами різних ієрархічних рівнів;

по-друге, орієнтація на потоковий характер сучасного мережного трафіка; по-третє, забезпечення якості обслуговування за множиною QoS-показників; по-

четверте, забезпечення оптимального використання доступного мережного ресурсу.

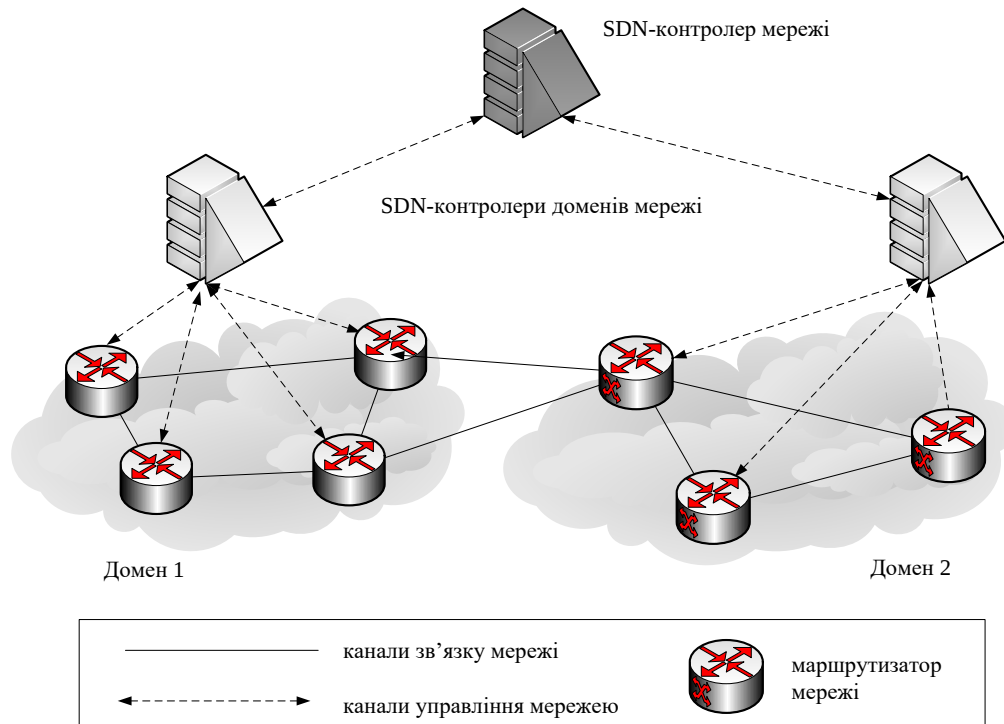


Рис. 1. Варіант побудови мультидоменної SDN

Аналіз рішень задач ієрархічної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах

Як показав проведений аналіз, до єдиної переваги комбінаторних рішень щодо розрахунку найкоротшого шляху на графі, представлених алгоритмами Беллмана-Форда та Дейкстри, які використовуються в існуючих протоколах ієрархічної маршрутизації PNNI, OSPF та IS-IS [1, 7, 8], варто віднести лише контрольовану обчислювальну складність. Однак повна невідповідність вище сформульованим вимогам практично унеможливує використання подібних алгоритмів у перспективних протоколах маршрутизації в SDN з ієрархічною структурою.

У роботах [9-11] представлені евристичні методи організації міждоменної маршрутизації, які також орієнтують на мінімізацію складності їх програмно-апаратної реалізації. Ці методи досить обмежено враховують функціональні параметри мультидоменної ТКМ, а відсутність належного теоретичного обґрунтування отриманих маршрутних рішень не дозволяє вести мову про забезпечення заданого рівня якості обслуговування.

Найбільш ефективними з точки зору забезпечення оптимального використання мережного ресурсу є поточкові моделі і методи маршрутизації в мультидоменних ТКМ [12-20]. В цьому випадку задача щодо визначення множини міждоменних шляхів передачі пакетів різних потоків формулюється як оптимізаційна. У працях [12-17] запропоновано маршрутні рішення, які стосуються міждоменної

маршрутизації в ТКМ з послідовною структурою доменів, а у роботі [18] – з довільною конфігурацією доменів. У роботі [19] запропоновано діакоптичний метод розрахунку міждоменних маршрутів, в якому покращувався верхній поріг завантаженості каналів зв'язку ТКМ, що опосередковано покращувало рівень QoS в мультидоменній мережі. При цьому в цих роботах пропонується підхід, заснований на використанні теорії ієрархічних багаторівневих систем [20, 21], коли маршрутні рішення, що отримані в доменах, координуються SDN-контролером верхнього рівня управління для наближення якості розподілених рішень до рівня централізованих.

У статтях [16-19] метою координації доменних рішень є забезпечення зв'язності міждоменних маршрутів, коли границя доменів проходить не через один, а через декілька маршрутизаторів, що ускладнює порядок балансування навантаження на міждоменній ділянці. В роботі [22] розглянуто варіант організації ієрархічної міждоменної маршрутизації із забезпеченням нормованої за доменами якості обслуговування за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки. Нормування значень основних показників якості обслуговування за доменами (підмережами) окремих операторів зв'язку є досить розповсюдженим явищем, направленим на спрощення отримання рішень щодо забезпечення QoS. Проте встановлення жорстких вимог, наприклад, на значення середньої міжкінцевої затримки або ймовірності втрат пакетів в доменах може негативно вплинути на гнучкість рішень щодо забезпечення QoS, особливо в умовах, коли є необхідність динамічно

перерозподілити норми відповідно до завантаженості доменів тощо.

В зв'язку з цим у даній роботі буде запропонований метод ієрархічної міждоменої маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі, який є подальшим розвитком рішення, запропонованого у роботі [22]. Однак на відміну від відомого аналогу метою координації у запропонованому методі є забезпечення виконання QoS-умов щодо значень середньої міжкінцевої затримки пакетів в мультидоменній ТКМ.

Потокова модель міждоменої маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі

Припустимо, що структура мультидоменої телекомунікаційної мережі представляється у вигляді орієнтованого графа

$$\Gamma = (R, W), \quad (1)$$

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

Нехай K – множина потоків, пакети яких передаються в ТКМ, тоді загальне число потоків в ТКМ можна представити виразом $|K| = \tilde{K}$. Для кожного k -го потоку ($k \in K$) задається середня інтенсивність пакетів $\lambda_k^{(sum)}$, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с). Фактично її значення визначає мінімальні вимоги щодо пропускної здатності ТКМ, яка виділяється цьому потоку.

Якщо ТКМ складається з N взаємопов'язаних між собою доменів, то кожен окремий p -й домен в ТКМ описується за допомогою підграфа $\Gamma^p = (R^p, W^p)$ графа Γ , де $V^p = \{R_i^p; i = \overline{1, m_p}\}$ – множина маршрутизаторів p -го домену, $W^p = \{W_{i,j}^p; i, j = \overline{1, m_p}, i \neq j\}$ – множина каналів, які з'єднують маршрутизатори p -го домену. Параметри m_p та n_p визначають загальну кількість маршрутизаторів та каналів зв'язку у p -му домені відповідно. Обумовимо той факт, що в ТКМ границя між доменами проходила саме через маршрутизатори мережі, як це реалізовано, наприклад, у протоколі OSPF [17, 22]:

$$R^p \cap R^q \neq \emptyset \text{ та } W^p \cap W^q = \emptyset, \quad p \neq q. \quad (2)$$

Для кожного p -го домену визначимо множину приграничних маршрутизаторів B^p ($B^p \in R^p$). Вся множина приграничних маршрутизаторів p -го домену розділяється 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

потoku вибувають з p -го домену [17, 22]. Для каналу зв'язку $W_{i,j}^p$ через $\phi_{i,j}^p$ позначимо його пропускну здатність, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с).

У результаті розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменої маршрутизації для кожного p -го домену необхідно визначити маршрутні змінні $x_{i,j}^{p,k}$, які характеризують долю інтенсивності k -го потоку пакетів, що протікає в каналі $W_{i,j}^p \in W^p$:

$$0 \leq x_{i,j}^{p,k} \leq 1. \quad (3)$$

Як показано у роботах [17, 22], для кожного маршрутизатора p -го домена необхідно виконати умови збереження k -го потоку з метою забезпечення зв'язності внутрішньодомених ділянок міждомених маршрутів. Якщо p -й домен є транзитним для k -го потоку пакетів, то подібні умови мають вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{B_{in}^{p,k} \in B^p} \left(\sum_{W_{i,j}^p \in W^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{W_{j,i}^p \in W^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = 1; \\ \sum_{W_{i,j}^p \in W^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{W_{j,i}^p \in W^p} x_{j,i}^{p,k} = 0; \\ \sum_{B_{out}^{p,k} \in B^p} \left(\sum_{W_{i,j}^p \in W^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{W_{j,i}^p \in W^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = -1. \end{cases} \quad (4)$$

Якщо k -й потік пакетів надійшов до ТКМ через p -й домен, а його джерелом виступає, наприклад, маршрутизатор R_i^p , то для цієї мережі перша умова системи (4) набуде вигляду

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

Коли маршрутизатор R_i^p з p -го домена є отримувачем пакетів k -го потоку, то спроститься лише останнє рівняння системи (4):

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

Метою запобігання перевантаження каналів зв'язку p -го домена мережі важливо виконати наступні умови:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^{p,k} \leq \phi_{i,j}^p, \quad p = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Позначимо також через $\lambda_{i,j}^{p,k} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^{p,k}$ середню інтенсивність k -го потоку пакетів, що протікає в каналі $W_{i,j}^p \in W^p$.

Маршрутні змінні $x_{i,j}^{p,k}$ є координатами відповідних маршрутних векторів, які згідно проведеної структурної декомпозиції ТКМ на мережні домени, підлягають функціональній декомпозиції:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_p \\ \vdots \\ \bar{x}_N \end{bmatrix}, \quad \bar{x}_p = \begin{bmatrix} \bar{x}_p^1 \\ \bar{x}_p^2 \\ \vdots \\ \bar{x}_p^k \\ \vdots \\ \bar{x}_p^{\tilde{K}} \end{bmatrix}, \quad \bar{x}_p^k = \begin{bmatrix} x_{1,2}^{p,k} \\ x_{1,3}^{p,k} \\ \vdots \\ x_{i,j}^{p,k} \\ \vdots \\ x_{m_p,m_p-1}^{p,k} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $\bar{x}$ – вектор маршрутних змінних, який визначає порядок маршрутизації потоків в ТКМ взагалі; $\bar{x}_p$ – маршрутний вектор, який визначає порядок маршрутизації всіх потоків в p -му домені; $\bar{x}_p^k$ – маршрутний вектор, який встановлює результат розв’язання задачі маршрутизації саме k -го потоку в p -му домені.

При розрахунку векторів $\bar{x}_p$ та $\bar{x}_p^k$ у межах кожного окремого p -го домена треба забезпечити зв’язність міждомених маршрутів. Для забезпечення зв’язності міждомених маршрутів в модель (1)-(6) вводяться умови міждомених взаємодій [17, 22]:

$$C_{p,q}^k \bar{x}_p^k = C_{q,p}^k \bar{x}_q^k, \quad p, q = \overline{1, N}, \quad p \neq q, \quad k \in K, \quad (7)$$

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 $\bar{x}_p^k$.

Умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидомених телекомунікаційній мережі

Для кожного потоку, який циркулює в ТКМ, на його швидкості передачі, середню міжкінцеву затримку пакетів (СМЗП) та ймовірність втрат пакетів встановлюються певні обмеження щодо їх граничних (мінімальних та/або максимальних) значень, які і визначають рівень якості обслуговування користувача. Тоді уточнені умови забезпечення QoS за середньою міжкінцевою затримкою пакетів для кожного конкретного k -го потоку в мультидомених ТКМ приймають вигляд

$$\tau_{MP}^k \leq \tau_{\langle don \rangle}^k, \quad (8)$$

де τ_{MP}^k – значення СМЗП в мультидомених ТКМ; $\tau_{\langle don \rangle}^k$ – вимоги щодо максимально допустимих

значень СМЗП в ТКМ. Значення τ_{MP}^k заміряється між вхідним маршрутизатором домена-джерела та вихідним маршрутизатором в домені-отримувача пакетів k -го потоку. З врахуванням мультидомених структури ТКМ та адитивної природи часових метрик

$$\tau_{MP}^k = \sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k}, \quad \text{тобто QoS-умови} \quad (8) \quad \text{можна}$$

представити в формі

$$\sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} \leq \tau_{\langle don \rangle}^k, \quad (9)$$

де $\tau_{MP}^{p,k}$ – значення середньої затримки пакетів k -го потоку у p -му домені ТКМ.

Забезпечення виконання QoS-умов (9) пов’язане з необхідністю аналітичного розрахунку значень затримок $\tau_{MP}^{p,k}$ у кожному з доменів ТКМ з врахуванням топології домену, характеристик потоків, пропускних здатностей каналів зв’язку та реалізованої стратегії маршрутизації. Для розв’язання цієї задачі скористаємось методологією тензорного аналізу мереж, основи якої розробив Г. Крон [23] та яка згодом була адаптована під розв’язання мережних задач в галузі телекомунікацій [24-31].

Тензорна модель домену телекомунікаційної мережі

Для забезпечення розрахунку значень затримок $\tau_{MP}^{p,k}$ буде розглядатись процес маршрутизації саме k -го потоку у p -му домені. Проте для наочності отриманих результатів номери домену (p) та потоку (k) в даному розділі будуть опущені. Тоді відповідно до результатів дослідження, отриманих у роботах [24-31], введемо наступні позначення. Нехай полюсами домену є маршрутизатори, через які той чи інший потік пакетів надходить та вибуває із нього. Введемо наступні позначення: κ – кількість базисних міжполюсних шляхів в домені; ϑ – число внутрішніх вузлових пар у домені, що включає в себе всі вузлові пари, крім полюсної. Введені структурні характеристики пов’язані між собою такими виразами:

$$\kappa = n - m + 2; \quad \vartheta = m - 2, \quad (10)$$

де m та n визначають загальну кількість відповідно маршрутизаторів та каналів зв’язку у обраному для аналізу домені ТКМ.

Тоді на структурі домену вводиться дискретний n -вимірний геометричний простір, в якому до уваги будуть прийняті такі два типи ортогональних систем координат (СК) [27, 30, 31]:

- система координат гілок домену $\{v_z, z = \overline{1, n}\}$,
проекції тензорів в якій будуть позначатися індексом v ;

- система координат міжполюсних шляхів $\{\gamma_i, i = \overline{1, \kappa}\}$ та внутрішніх вузлових пар $\{\varepsilon_j, j = \overline{1, \vartheta}\}$
домену, проекції тензорів в якій будуть позначатися індексом $\gamma\varepsilon$.

Виконання умови $n = \kappa + \vartheta$ з урахуванням (10) визначає ортогональність введених систем координат.

У введеному n -вимірному просторі домен може бути описуватись за допомогою змішаного двовалентного тензора [30, 31]:

$$Q = T \otimes \Lambda; \quad (11)$$

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

Взаємозв'язок проекції тензорів середніх затримок (T_v) та середніх інтенсивностей потоків (Λ_v) в СК гілок можна представити таким векторно-матричним рівнянням:

$$T_v = E_v \Lambda_v; \quad (12)$$

де $E_v = \|e_{ij}^v\|$ – представлена діагональною $n \times n$ -матрицею проекція двічі коваріантного метричного тензора E в СК гілок. У випадку моделювання роботи інтерфейсів маршрутизаторів домену системою масового обслуговування М/М/1, координати діагональної матриці E_v матимуть вид [29-31]:

$$e_{ii}^v = \frac{1}{\lambda_v^i(\varphi_i - \lambda_i)},$$

де λ_v^i – інтенсивність саме того потоку пакетів, який розглядається з точки зору побудови тензорної моделі, в i -му каналі зв'язку; λ_i – сумарна інтенсивність всіх потоків пакетів, що протікають в i -му каналі зв'язку обраного домену ($i = \overline{1, n}$).

У базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар рівняння (12) матимуть такий вигляд [30, 31]:

$$T_{\gamma\varepsilon} = E_{\gamma\varepsilon} \Lambda_{\gamma\varepsilon}; \quad (13)$$

де $\Lambda_{\gamma\varepsilon}$ та $T_{\gamma\varepsilon}$ – проекції тензорів Λ та T у СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, які представлені n -вимірними векторами; $E_{\gamma\varepsilon} = \|e_{ij}^{\gamma\varepsilon}\|$ – представлена діагональною $n \times n$ -матрицею проекція двічі коваріантного метричного тензора E в СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар.

Закон контраваріантного координатного перетворення координат тензора Λ описується несингулярною $n \times n$ -матрицею $C_{\gamma\varepsilon}^v$ [30, 31]:

$$\Lambda_v = C_{\gamma\varepsilon}^v \Lambda_{\gamma\varepsilon}; \quad (14)$$

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

$$\Lambda_{\gamma\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ \Lambda_\varepsilon \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\gamma = \begin{bmatrix} \lambda_\gamma^1 \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^j \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^\kappa \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\varepsilon = \begin{bmatrix} \lambda_\varepsilon^1 \\ \vdots \\ \lambda_\varepsilon^p \\ \vdots \\ \lambda_\varepsilon^\vartheta \end{bmatrix}; \quad (15)$$

де Λ_γ – κ -вимірний вектор інтенсивностей потоку вздовж базисних міжполюсних шляхів мережі; Λ_ε – ϑ -вимірний вектор інтенсивностей потоку між вузлами, які утворюють внутрішні вузлові пари; λ_γ^j – інтенсивність потоку вздовж j -го базисного міжполюсного шляху (γ_j); $\lambda_\varepsilon^p(t)$ – інтенсивність потоку, що надходить у мережу і виходить з мережі через вузли, які створюють p -ту внутрішню вузлову пару (ε_p).

Закон перетворення проекцій двічі коваріантного тензора E при переході від базису гілок до базису міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар має такий вигляд:

$$E_{\gamma\varepsilon} = (C_{\gamma\varepsilon}^v)^t E_v C_{\gamma\varepsilon}^v; \quad (16)$$

де $[\cdot]^t$ – операція транспонування матриці

Матрицю $E_{\gamma\varepsilon}$ можна представити у такій декомпозиційній формі:

$$\left\| \begin{array}{c|c} E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} & E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \\ \hline \vdots & \vdots \\ E_{\gamma\varepsilon}^{(3)} & E_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \end{array} \right\| = E_{\gamma\varepsilon},$$

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

Відомо, що середня міжкінцева затримка пакетів, які передаються між заданою парою маршрутизаторів за допомогою множини маршрутів P , розраховується за такою формулою

$$\tau_{MP} = \sum_{p=1}^{|P|} x_p \tau_p ; \quad (17)$$

де $x_p = \lambda_p / \lambda^{(вим)}$ – частка потоку пакетів, які передаються до маршрутизатора-отримувача за допомогою p -го маршруту; $\lambda^{(вим)}$ – середня інтенсивність потоку пакетів (1/с) на вході домену; λ_p – інтенсивність потоку пакетів (1/с), які передаються до маршрутизатора-отримувача за допомогою p -го маршруту; τ_p – середня затримка пакетів, які передаються вздовж p -го маршруту; $|P|$ – загальна кількість доступних для маршрутизації шляхів між обраною парою маршрутизаторів.

Тоді, як показано в роботах [30, 31] справедливою є наступна рівність:

$$\tau_{MP} = \frac{\Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\epsilon}^{(1)} \Lambda_{\gamma}}{\lambda^{(вим)}} , \quad (18)$$

яка визначає шукану формулу для розрахунку середньої міжкінцевої затримки пакетів обраного для аналізу потоку в заданому мережному домені ТКМ.

До основних переваг виразу (20) і QoS-умов (21) варто віднести врахування основних структурних і функціональних параметрів ІКМ, характеристик трафіка та дисциплін обслуговування пакетів, а також аналітичну форму умов, що дозволяє забезпечити їхнє використання при оптимізації різномірних процесів управління трафіком: маршрутизації, розподілу та

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - C_{q,p}^k \bar{x}_q^k) + \sum_{k \in K} f^k \left(\sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle don \rangle}^k \right), \quad (20)$$

де $\bar{\mu}$ – вектор множників Лагранжа; $\bar{\mu}_{p,q}$ – підвектори вектору $\bar{\mu}$, віднесені до кожної з векторно-матричних умов взаємодії доменів (7); f^k – множники Лагранжа, які віднесені до кожної з QoS-умов (9).

За принципом цільової координації вектори множників Лагранжу $\bar{\mu}$ розраховуються на верхньому рівні та для нижнього рівня є відомими значеннями,

$$L_p = \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\bar{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k + \sum_{k \in K} f^k \tau_{MP}^{p,k}. \quad (21)$$

Задачі ієрархічних рівнів методу міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій ТКМ будуть мати наступне наповнення. Перший (нижній) ієрархічний рівень маршрутизації, який охоплює SDN-контролери доменів, відповідає за розрахунок маршрутних змінних, представлених векторами $\bar{x}_p^k$ ($p = \overline{1, N}$, $k \in K$), в ході мінімізації лагранжіанів (21) при обмеженнях (3)–(5). Результати розрахунків

резервування каналних і буферних ресурсів.

Метод ієрархічної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування

Грунтуючись на математичній моделі (1)–(18) в основу методу ієрархічної міждоменної QoS-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 (3)–(5), (7), (9) і (18) шляхом використання критерію оптимальності:

$$\min F, \quad F = \sum_{p \in N} \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k, \quad (19)$$

де H_p^k – діагональна матриця вагових коефіцієнтів, координатами якої, як правило [22], є маршрутні метрики каналів зв'язку p -го домену ТКМ.

Для забезпечення властивостей ієрархічності та координуємості маршрутним рішенням в ході розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі буде використано принцип цільової координації [20, 21]. Тоді, переходячи до задачі на безумовний екстремум

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

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

тому вираз (20) можна представити в декомпозиційній формі:

$$L = \sum_{p=1}^N L_p,$$

де кожен з лагранжіанів доменів може бути представленим у спрощеній формі [17, 22]:

передаються на верхній рівень – на SDN-контролер програмно-конфігурованої мережі взагалі. На верхньому рівні SDN-контролер мережі здійснює координацію рішень, отриманих на нижньому рівні SDN-контролерами доменів. По-перше, для виконання умов міждоменної взаємодії (7) SDN-контролер мережі реалізує ітераційну градієнтну процедуру

$$\bar{\mu}_{p,q}^k(a+1) = \bar{\mu}_{p,q}^k(a) + \nabla \bar{\mu}_{p,q}^k, \quad (22)$$

де a – номер ітерації; $\nabla \bar{\mu}_{p,q}^k$ – градієнт функції (20), 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:

$$\nabla \bar{\mu}_{p,q}^k(x) \Big|_{x=x^*} = C_{p,q} \bar{x}_p^k - C_{q,p} \bar{x}_q^k. \quad (23)$$

По-друге, на SDN-контролер мережі також покладаються задачі забезпечення виконання QoS-умов (9), (18) шляхом модифікації множників Лагранжа f^k ($k \in K$) в ході виконання ще однієї градієнтної ітераційної процедури:

$$f^k(a+1) = f^k(a) + \nabla f^k, \quad (24)$$

де ∇f^k – градієнт функції (20), 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:

$$\nabla f^k(x) \Big|_{x=x^*} = \sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle don \rangle}^k. \quad (25)$$

Модифіковані значення векторів множників Лагранжа $\bar{\mu}_{p,q}^k$ та $\bar{f}$ передаються на нижній рівень (на SDN-контролери доменів) для розрахунку нових маршрутичних векторів $\bar{x}_p^k$, де координати f^k K -вимірного вектору множників Лагранжа $\bar{f}$ визначали значення QoS-метрик. Чим більше поточне значення міжкінцевої затримки пакетів k -го потоку $\sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k}$ перевищувало допустиме значення $\tau_{\langle don \rangle}^k$, тим відповідно до (24) та (25) більшою ставала відповідна QoS-метрика, тобто координата f^k . Процес розрахунків знову набуває ітераційного характеру. Зв'язність міждоменних маршрутів (7) та виконання QoS-умов (9), (18) буде забезпечуватися при таких значеннях градієнтів (23) та (25):

$$\nabla \bar{\mu}_{p,q}^k(x) = 0 \quad \text{та} \quad \nabla f^k(x) = 0.$$

Запропонований метод ієрархічної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування буде мати структуру, наведену на рис. 2.

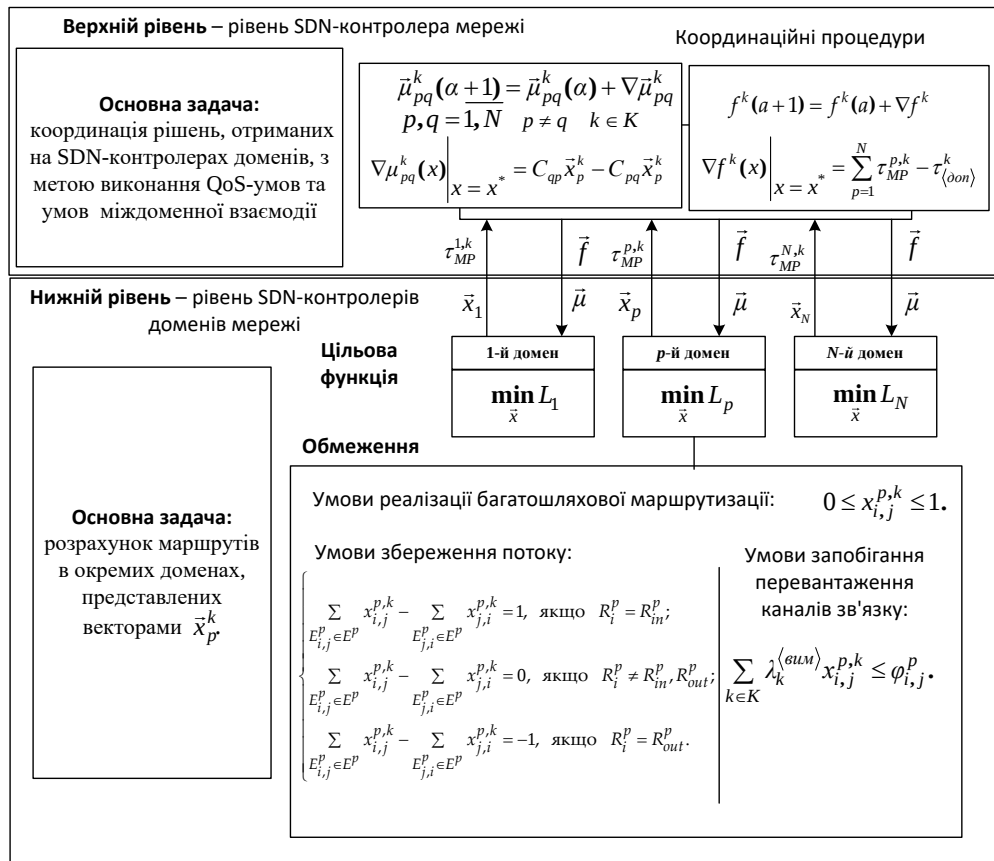


Рис. 2. Структура дворівневого методу ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування

Таким чином, представлений метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі дозволяє забезпечити допустиму міжкінцеву якість обслуговування за показником СМЗП пакетів без попереднього нормування її значень за доменами ТКМ. Це дозволяє підвищити гнучкість управління мережею, особливо у випадках, коли встановлення норм на значення $\tau_{MP}^{p,k}$ є складною задачею прогнозування стану ТКМ. Проте ефективність запропонованого методу, який також сприяє підвищенню масштабованості маршрутних рішень в ТКМ, багато в чому залежить від швидкості збіжності координаційних процедур (22), (23) та (24), (25). Від кількості ітерацій цих процедур напряму залежать оперативність прийняття маршрутних рішень та об'єм службового навантаження (інформація про стан мережі, маршрутні таблиці), яке циркулює між SDN-контролерами різних ієрархічних рівнів. Тому окремою важливою задачею є дослідження запропонованого методу ієрархічної міждоменної QoS-маршрутизації з метою оцінки швидкості збіжності координаційних процедур (22), (23) та (24), (25) та аналізу впливу факторів, які впливають на цей процес.

Дослідження запропонованого методу ієрархічної міждоменної QoS-маршрутизації при координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою

Питанням аналізу збіжності методів ієрархічної маршрутизації до оптимальних рішень з виконанням умов взаємодії доменів та забезпечення зв'язності міждоменних шляхів (7) присвячені дослідження, представлені у роботах [17, 18, 22]. Тому в даній роботі розглядався випадок організації ієрархічної міждоменної QoS-маршрутизації при координації рішень лише за середньою міжкінцевою затримкою пакетів (24), (25). За основу була взята структура ТКМ, яка складалась з двох доменів, які були пов'язані через єдиний приграничний маршрутизатор. Подібний варіант фізичної або логічної побудови ТКМ широко використовується при організації автономних систем IP-мереж та доменів, наприклад, при використанні протоколу OSPF. Так на рис. 3 показано приклад ТКМ, яка складається з двох симетричних за своєю структурою доменів, кожен з містив дев'ять маршрутизаторів. На цьому рисунку в розривах каналів зв'язку наведено їх пропускну здатність (1/с). Границя доменів проходила через один спільний для них маршрутизатор R_9^1 (R_1^2).

Нехай в мережі передавались пакети двох потоків, характеристики яких та вимоги щодо рівня QoS, наведені в табл. 1.

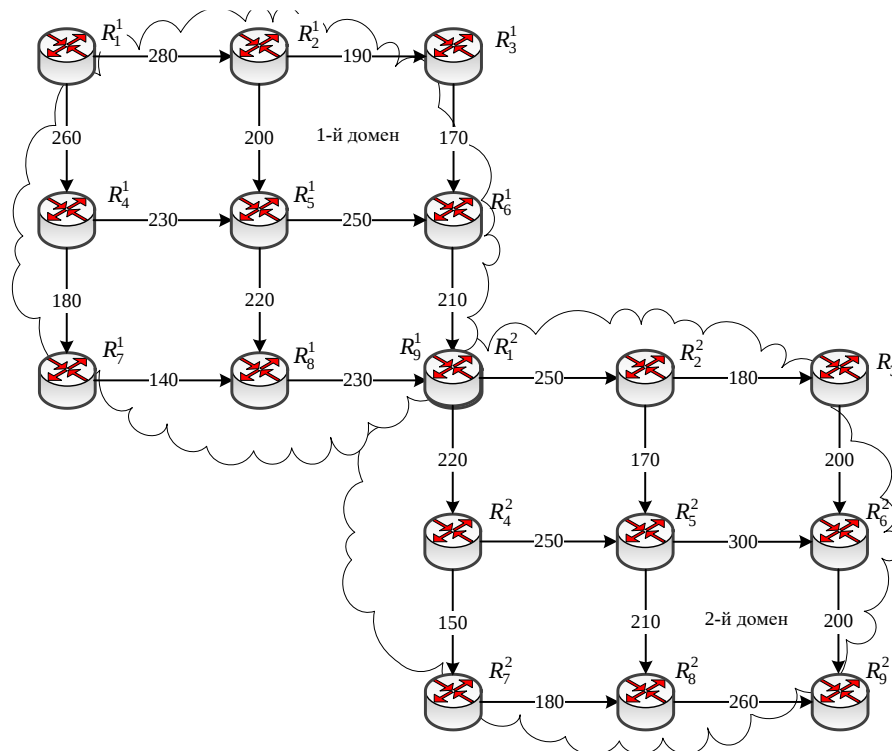


Рис. 3. Приклад структури дводоменної ТКМ, яка підлягала дослідженню

Таблиця 1. Характеристики потоків пакетів, які підлягали QoS-маршрутизації в мультидоменній ТКМ (рис. 3)

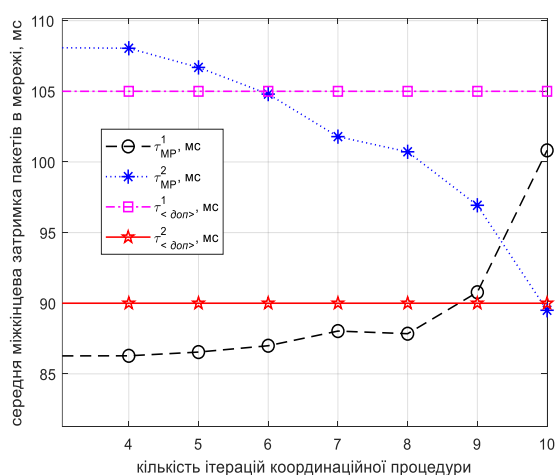
Номер потоку (k)	Маршрутизатор-джерело	Маршрутизатор-отримувач	$\lambda_{вим}^{(k)}$ (1/с)	$\tau_{\langle don \rangle}$ (мс)
1	R_1^1	R_9^2	150	105
2			180	90

Застосовуючи запропонований метод маршрутизації, на підставі балансування навантаження в кожному з доменів ТКМ необхідно було забезпечити заданий рівень якості обслуговування для кожного з двох потоків пакетів (табл. 1) і за пропускну здатністю ($\lambda^{(вим)}$), і за середньою міжкінцевою затримкою пакетів (τ_{don}).

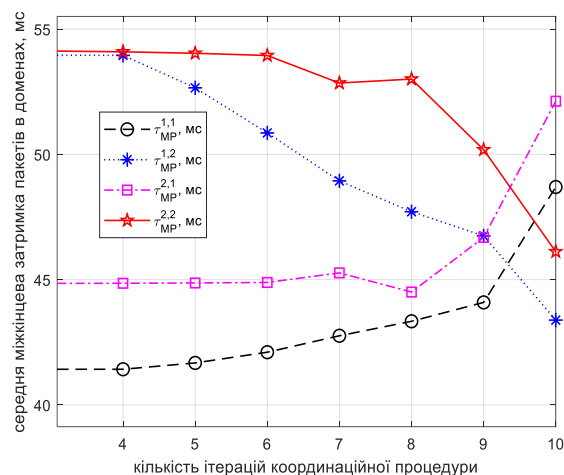
Процес координації зручно продемонструвати на прикладі (рис. 4), коли для отримання шуканого рішення знадобилось десять ітерацій координаційної процедури (24), (25).

На рис. 4 а чітко видно, що автономний розрахунок маршрутів в доменах на перших ітераціях не призводив до виконання QoS-вимог за СМЗП в

ТКМ для другого потоку пакетів, хоча для першого потоку ці вимоги задовольнялись з деяким запасом міцності. Завдяки застосуванню координаційної процедури (24), (25) вдалося перерозподілити потоки і першому, і в другому домені (рис. 4 б) таким чином, щоб зменшити τ_{MP}^2 за рахунок деякого підвищення τ_{MP}^1 , проте без порушення QoS-вимог для першого потоку пакетів. Як показано на рис. 4, на десятій координаційній ітерації градієнтної процедури (24), (25) QoS-вимоги вже задовольнялись для обох потоків.



а) затримки пакетів в ТКМ в цілому

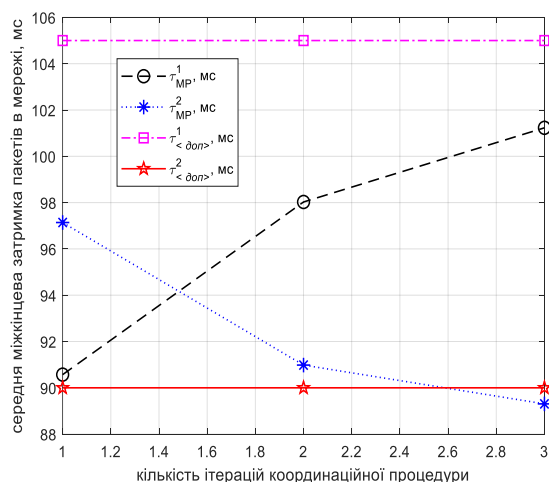


б) затримки пакетів в окремих доменах мережі

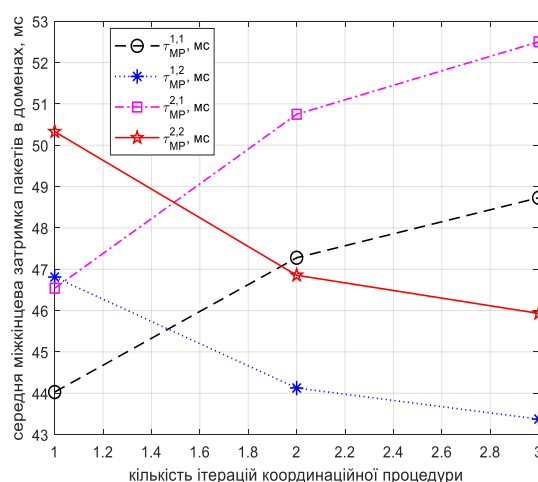
Рис. 4. Динаміка зміни середніх міжкінцевих затримок пакетів в ТКМ в цілому (а) та за доменами (б) для кожного з двох потоків відповідно до ітерацій координаційної процедури (24), (25)

Швидкість збіжності координаційної процедури (24), (25) можна значно підвищити шляхом вдосконалення її параметрів, наприклад зробивши змінним крок пошуку, адаптувавши його значення до умов задачі. Тоді, як показано на рис. 5, отримати

скоординоване рішення задачі ієрархічно-координаційної міждоменої QoS-маршрутизації можливо за три ітерації, що позитивно впливає на час рішення маршрутної задачі та об'єм службового навантаження в ТКМ.



а) затримки пакетів в ТКМ в цілому



б) затримки пакетів в окремих доменах мережі

Рис. 5. Динаміка зміни середніх міжкінцевих затримок пакетів в ТКМ в цілому (а) та за доменами (б) для кожного з двох потоків відповідно до ітерацій координаційної процедури (24), (25)

Висновки

1. У роботі запропоновано метод ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування за показниками пропускної здатності і середньої міжкінцевої затримки пакетів. Метод який є подальшим розвитком рішень, представлених у роботах [14-19, 22]. Новизною метода є те, що виконання QoS-вимог щодо СМЗП здійснюється не на підставі попереднього нормування її значень за доменами, а шляхом введення та реалізації дворівневої координації маршрутних рішень відповідно до принципу цільової координації. В основу запропонованого методу покладено декомпозиційну потокову модель міждоменної маршрутизації (1)-(7). Для отримання в аналітичному вигляді умов забезпечення міжкінцевої якості обслуговування (9), (18) використано тензорний опис кожного з мережних доменів (10)-(18).

2. Використання запропонованого методу ієрархічної міждоменної маршрутизації дозволяє без

перерозподілу каналного ресурсу, а лише на підставі балансування навантаження в доменах ТКМ забезпечити заданий рівень QoS за показниками продуктивності та середньої міжкінцевої затримки пакетів. Децентралізація обчислень маршрутів в кожному з доменів мережі на підставі використання локальної інформації про їх стан дозволяє підвищити масштабованість маршрутних рішень, а введення процедур координації дозволяє забезпечити погодженість у роботі SDN-контролерів доменів з точки зору забезпечення QoS.

3. В ході дослідження запропонованого методу міждоменної QoS-маршрутизації на ряді розрахункових прикладів підтверджена його збіжність до оптимальних рішень за кінцеву кількість ітерацій координаційної процедури (24), (25) – в середньому за 3-4. Мінімізація числа координаційних ітерацій сприяє зниженню обсягу службового навантаження в мережі, яке циркулює в мережі між маршрутизаторами та SDN-контролерами різних рівнів, а також пропорційному зменшенню часу розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації.

Список літератури

1. Graziani, R., Vachon, B. (2014), *Cisco Networking Academy: Connecting Networks Companion Guide*. Cisco Press, 576 p.
2. Kiwan, H., Morgan, Y. L., (2013), "Hierarchical networks: Routing and clustering (A concise survey)", *In Proc. 2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Regina, SK, P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2013.6567742>
3. Lin, S. C., Akyildiz, I. F., Wang, P., Luo, M., (2016), "QoS-aware Adaptive Routing in Multi-Layer Hierarchical Software Defined Networks: A Reinforcement Learning Approach", *In Proc. 2016 IEEE International Conf. on Services Computing, San Francisco*, P. 25-33. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCC.2016.12>
4. Monge, A. S., Szarkowicz, K. G., (2016), *MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services*. Sebastopol: O'Reilly Media, 920 p.
5. Wibowo, F. X. A., Gregory, M. A., Ahmed, K., Gomez, K. M., (2017), "Multi-domain software defined networking: research status and challenges", *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 87. P. 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.03.004>
6. Katsalis, K., Rofoee, B., Landi, G., Riera, J. F., Kousias, K., Anastasopoulos, M., Korakis, T., (2017), "Implementation experience in multi-domain SDN: Challenges, consolidation and future directions", *Computer Networks*, Vol. 129. P. 142-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.09.005>
7. Medhi, D., Ramasamy, K., (2018), *Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures (The Morgan Kaufmann Series in Networking)*. 2nd Edition. Cambridge, MA, USA: Elsevier Inc., 1018 p.
8. Misra, S., Goswami, S., (2017), *Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies*. 1st Edition. Wiley, 536 p.
9. Liu, R., Li, S., Wang, H., (2019), "Hierarchical Multi-constraint Routing Algorithm Based on Software Defined Networking", *In Proc. 2019 IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*. IEEE, P. 529-533. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2019.8784520>
10. Lu, J., Zhang, Z., Hu, T., Yi, P., Lan, J., (2019), "A survey of controller placement problem in software-defined networking", *IEEE Access*, Vol. 7, P. 24290-24307. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893283>
11. Sprintson, A., Yannuzzi, M., Orda, A., Masip-Bruin, X. (2007), "Reliable routing with QoS guarantees for multi-domain IP/MPLS networks", *In Proc. IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications*, P. 1820-1828. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2007.212>
12. Wójcik, R., Domżał, J., Duliński, Z., (2016), "A survey on methods to provide interdomain multipath transmissions". *Computer Networks*, Vol. 108, P. 233-259. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.08.028>
13. Eun, J.S., Jung, H., (2015), "The implementation of domain routing protocol in hierarchical domain network model", *In Proc. 2015 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, Busan, P. 396-399. DOI: <https://doi.org/10.1109/APNOMS.2015.7275350>
14. Lemeshko, O., Nevzorova O., Hailan A. M., (2018), "Hierarchical Method of Routing and Resource Allocation in DiffServ-TE Network. *In Proc. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, P. 1014-1018, DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336366>
15. Лемешко, О.В., Єременко, О.С., Невзорова, О.С., (2020), Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість. Харків: ХНУРЕ. 308 с.
16. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Nevzorova, O., (2017), "Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting", *Transport and Telecommunication Journal*, Vol. 18(2). P. 155-167. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjt-2017-0015>
17. 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.

18. Lemesko, O., Nevzorova, O., Ilyashenko, A., Yevdokymenko, M. (2020), "Hierarchical Coordination Method of Inter-area Routing in Backboneless Network", In Proc. Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 938. Springer, Cham, P. 90–102. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2_9
19. Лемешко А. В., Ильяшенко А. Е., Коваленко Т. Н., Невзорова Е. С. Разработка и анализ диакоптического метода междоменной маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационной сети. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 1. С. 3–24. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2018.1.01>
20. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир. 1973. 344 с.
21. Сингх, М., Титли, А., (1986), Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение. 494 с.
22. Євдокименко, М. О. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування. *Проблеми телекомунікацій*. 2019. № 2 (25). С. 3–26. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2019.2.01>
23. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. Радио, 1978. 720 с.
24. Лемешко А. В., Евсеева О. Ю. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей. *Проблеми телекомунікацій*. 2012. № 4(9). С. 16–31. http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/124_lemeshko_tensor.pdf
25. Lemesko, A. V., Evseeva, O. Yu., Garkusha, S. V., (2014), "Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greater Number of Indices", *Telecommunications and RadioEngineering*, № 15 (73). P. 1339–1360. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30>
26. Lemesko, O. V., Garkusha, S. V., Yermenko, O. S., Hailan, A. M., (2015), "Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks", In Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), P. 1–4.
27. Лемешко А. В., Евсеева О. Ю. Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базе межполюсных путей и внутренних разрезков. *Наукові записки УНДІЗ*. № 1 (13). 2010. С. 14–26.
28. Lemesko, O., Yevdokymenko, M., Alsaleem, A., (2018), "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. № 2(95). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>
29. Lemesko, O., Yermenko, O., Yevdokymenko, M., Hailan, A. M., (2020), "Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network", In Proc. The Third International Conference "Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEE 2020)". P. 1–12.
30. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Вдосконалення потокової моделі маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 1(61). С. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.04>
31. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Т. 2. № 60. С. 152–159.

References

1. Graziani, R., Vachon, B. (2014), *Cisco Networking Academy: Connecting Networks Companion Guide*, Cisco Press, 576 p.
2. Kiwan, H., Morgan, Y. L. (2013), "Hierarchical networks: Routing and clustering (A concise survey)", In Proc. 2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Regina, SK, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2013.6567742>
3. Lin, S. C., Akyildiz, I. F., Wang, P., Luo, M. (2016), "QoS-aware Adaptive Routing in Multi-Layer Hierarchical Software Defined Networks: A Reinforcement Learning Approach", In Proc. 2016 IEEE International Conf. on Services Computing, San Francisco, P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCC.2016.12>
4. Monge, A. S., Szarkowicz, K. G. (2016), *MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services*, Sebastopol, O'Reilly Media, 920 p.
5. Wibowo, F. X. A., Gregory, M. A., Ahmed, K., Gomez, K. M. (2017), "Multi-domain software defined networking: research status and challenges", *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 87, P. 32–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.03.004>
6. Katsalis, K., Rofoee, B., Landi, G., Riera, J. F., Kousias, K., Anastasopoulos, M., Korakis, T. (2017), "Implementation experience in multi-domain SDN: Challenges, consolidation and future directions", *Computer Networks*, Vol. 129, P. 142–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.09.005>
7. Medhi, D., Ramasamy, K. (2018), *Network Routing. Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures (The Morgan Kaufmann Series in Networking)*, 2nd Edition. Cambridge, MA, USA, Elsevier Inc., 1018 p.
8. Misra, S., Goswami, S. (2017), *Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies*, 1st Edition, Wiley, 536 p.
9. Liu, R., Li, S., Wang, H. (2019), "Hierarchical Multi-constraint Routing Algorithm Based on Software Defined Networking", In Proc. 2019 IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), P. 529–533. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2019.8784520>
10. Lu, J., Zhang, Z., Hu, T., Yi, P., Lan, J. (2019), "A survey of controller placement problem in software-defined networking", *IEEE Access*, Vol. 7, P. 24290–24307. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893283>
11. Sprintson, A., Yannuzzi, M., Orda, A., Masip-Bruin, X. (2007), "Reliable routing with QoS guarantees for multi-domain IP/MPLS networks", In Proc. IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications, P. 1820–1828. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2007.212>
12. Wójcik, R., Domżał, J., Duliński, Z. (2016), "A survey on methods to provide interdomain multipath transmissions", *Computer Networks*, Vol. 108, P. 233–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.08.028>

13. Eun, J. S., Jung, H. (2015), "The implementation of domain routing protocol in hierarchical domain network model", *In Proc. 13th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, Busan, P. 396–399. DOI: <https://doi.org/10.1109/APNOMS.2015.7275350>
14. Lemeshko, O., Nevzorova O., Hailan A. M. (2018), "Hierarchical Method of Routing and Resource Allocation in DiffServ-TE Network", *In Proc. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, Ukraine, P. 1014–1018, DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336366>
15. Lemeshko, O. V., Yeremenko, O. S., Nevzorova, O. C. (2020), *Flow-based models and routing methods in infocommunication networks: fault tolerance, security, scalability [Potokovi modeli ta metodi marshrutizacii v infokomunikacionnih mrezhah: vidmovostiikist, bezpeka, masshtabovanist]*, Kharkiv, NURE, 308 p.
16. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Nevzorova, O. (2017), "Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting", *Transport and Telecommunication Journal*, Vol. 18 (2), P. 155–167. DOI: <https://doi.org/10.1515/ttj-2017-0015>
17. Lemeshko, A. V., Nevzorova, E. S., Ilyashenko, A. Ye. (2016), "Development and analysis of the method of hierarchical coordination inter-domain routing in a telecommunication network" ["Razrabotka i analiz metoda ierarhicheskogo-kordinatsionnoy mezhdomennoy marshrutizacii v telekommunikatsionnoy seti"], *Scientific notes of the Ukrainian Research Institute of Communications*, No. 4 (44), P. 49–67.
18. Lemeshko, O., Nevzorova, O., Ilyashenko, A., Yevdokymenko, M. (2020), "Hierarchical Coordination Method of Inter-area Routing in Backboneless Network", *In Proc. Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 938, P. 90–102. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2_9
19. Lemeshko, A. V., Ilyashenko, A. Ye., Kovalenko, T. N., Nevzorova, E. S. (2018), "Development and analysis of a diakoptic method of inter-domain routing with load balancing in a telecommunication network", *Problems of telecommunications*, No. 1, P. 3–24. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2018.1.01>
20. Mesarovich, M., Mako, D., Takahara, I. (1973), *Theory of hierarchical multi-level systems [Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem]*, Mir, Moscow, 344 p.
21. Singh, M., Titli, A. (1986), *Systems: decomposition, optimization and management [Sistemi: dekompozitsiya, optimizatsiya, upravlenie]*, Engineering, Moscow, 494 p.
22. Yevdokymenko, M. O. (2019), "Method of hierarchical-coordination interdomain routing in software-defined infocommunication network with providing of normalized quality of service", *Problems of telecommunications*, No. 2 (25), P. 3–26. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2019.2.01>
23. Kron, G. (1978), *Tensor network analysis [Tenzornii analiz setei]*, Sov.radio, Moscow, 720 p.
24. Lemeshko, A. V., Yevseyeva, O. Yu. (2012), "Multipath routing tensor model with quality of service guarantees simultaneously for multiple heterogeneous indicators", *Problems of telecommunications*, No. 4 (9), P. 16–31, available at : http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/124_lemeshko_tensor.pdf
25. Lemeshko, A. V., Evseeva, O. Yu., Garkusha, S. V. (2014), "Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greate Number of Indices", *Telecommunications and RadioEngineering*, No. 15 (73), P. 1339–1360. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30>
26. Lemeshko, O. V., Garkusha, S. V., Yeremenko, O. S., Hailan, A. M. (2015), "Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks", *In Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147124>
27. Lemeshko, A. V., Yevseyeva, O. Yu. (2010), "Tensor geometrization of the structural-functional representation of a telecommunication system in the basis of interpolator paths and internal cuts" ["Tenzornaya geometrizatsiya strukturno-funktsional'nogo predstavleniya telekommunikatsionnoy sistemy v bazise mezhpoljuznykh putej i vnutrennykh razrezov"], *Scientific Proceeding of Ukrainian Research Institute of Communication*, No. 1 (13), P. 14–26.
28. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Alsaleem, A. (2018), "Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 2 (95), P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>
29. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Hailan, A. M. (2020), "Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network", *In Proc. The Third International Conference "Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEE 2020)"*, P. 1–12.
30. Lemeshko, O. V., Yevdokymenko, M. O. (2020), "Advanced Flow-based Routing Model with Quality of Service Ensuring in Multiservice Telecommunication Network", *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 1 (61), P. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.04>
31. Lemeshko, O. V., Yevdokymenko, M. O., Yeremenko, O. S. (2020), "Optimization routing model of delay-sensitive traffic in infocommunication networks", *Control, Navigation and Communication Systems*, Vol. 2, No. 60, P. 152–159. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.152>

Надійшла (Received) 26.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лемешко Олександр Віталійович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: oleksandr.lemeshko.ua@ieee.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0609-6520>.

Лемешко Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой инфокоммуникационной инженерии имени В.В. Поповского, Харьков, Украина.

Lemeshko Oleksandr – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Євдокименко Марина Олександрівна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського, Харків, Україна; email: maryna.yevdokymenko@iee.org; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7391-3068>.

Евдокименко Марина Александровна – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Yevdokymenko Maryna – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

МЕТОД ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МЕЖДОМЕННОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ МЕЖКОНЦЕВОГО КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Предметом исследования в статье являются процессы междоменной маршрутизации с обеспечением межконцевого качества обслуживания. **Цель** работы – разработать метод иерархической междоменной маршрутизации с обеспечением межконцевого качества обслуживания по показателю средней межконцевой задержки пакетов в мультидоменной программно-конфигурируемой телекоммуникационной сети. В статье решаются следующие **задачи**: разработка и исследование метода иерархической междоменной маршрутизации с обеспечением межконцевого качества обслуживания. Используются следующие **методы**: теория графов, теория тензоров, теория иерархических многоуровневых систем, теория массового обслуживания и методы математического программирования. Получены следующие результаты: разработан и исследован метод иерархической междоменной маршрутизации в программно-конфигурируемой телекоммуникационной сети с обеспечением межконцевого качества обслуживания, который позволяет на основании балансировки нагрузки в доменах телекоммуникационной сети обеспечить заданный уровень QoS по показателям производительности и средней межконцевой задержки пакетов. **Выводы**: В работе предложен метод иерархической междоменной маршрутизации в программно-конфигурируемой телекоммуникационной сети с обеспечением качества обслуживания по показателям пропускной способности и средней межконцевой задержки пакетов. Новизной метода является то, что выполнение QoS-требований по средней межконцевой задержке пакетов осуществляется не на основании предварительного нормирования ее значений по доменам, а путем введения и реализации двухуровневой координации маршрутных решений в соответствии с принципом целевой координации. В основу предложенного метода положена декомпозиционная потоковая модель междоменной маршрутизации, а для получения в аналитическом виде условий обеспечения межконцевого качества обслуживания использовано тензорное описание каждого из сетевых доменов. Использование метода иерархической междоменной маршрутизации позволяет без перераспределения канального ресурса, а лишь на основании балансировки нагрузки в доменах телекоммуникационной сети обеспечить заданный уровень QoS по показателям производительности и средней межконцевой задержки пакетов. Децентрализация вычислений маршрутов в каждом из доменов сети на основе использования локальной информации об их состоянии позволяет повысить масштабируемость маршрутных решений, а введение процедур координации позволяет обеспечить согласованность в работе SDN-контроллеров доменов с точки зрения обеспечения QoS. Исследование предложенного метода на ряде расчетных примеров подтвердило его сходимость к оптимальным решениям конечным количеством итераций координационной процедуры.

Ключевые слова: программно-конфигурируемая телекоммуникационная сеть; междоменная маршрутизация; качество обслуживания; средняя межконцевая задержка пакетов.

THE METHOD OF HIERARCHICAL INTER-DOMAIN ROUTING IN A SOFTWARE-DEFINED TELECOMMUNICATIONS NETWORK WITH ENSURING END-TO-END QUALITY OF SERVICE

The **subject** of research in the article is the processes of inter-domain routing with ensuring the end-to-end quality of service. The **aim** of the work is to develop a method of hierarchical inter-domain routing with ensuring the end-to-end quality of service in terms of average end-to-end packet delay in a multi-domain software-defined telecommunications network. The following **tasks** are solved in the article: development and research the hierarchical inter-domain routing method with ensuring the end-to-end quality of service. The following **methods** are used: graph theory, tensor theory, theory of hierarchical multi-level systems, queuing theory, and mathematical programming methods. The following **results** were obtained: the method of hierarchical inter-domain routing in a software-defined telecommunications network with the provision of end-to-end quality of service has been developed and investigated, which allows, based on load balancing in the telecommunication network domains, to provide a specified level of QoS in terms of performance and average end-to-end packet delay. **Conclusions**: The paper proposes a method of hierarchical inter-domain routing in a software-defined telecommunications network with ensuring the quality of service in terms of bandwidth and average packet end-to-end delay. The novelty of the method is that the implementation of QoS requirements for the average end-to-end packet delay is carried out not on the basis of preliminary normalization of its values by domain, but through the introduction and implementation of two-level coordination of route solutions in accordance with the principle of target coordination. The proposed method is based on a decomposition flow-based model of inter-domain routing, and to obtain in an analytical form the conditions for ensuring the end-to-end quality of service, a tensor description of each of the network domains is used. Using the hierarchical inter-domain routing method allows to reassign the channel resource, but only on the basis of load balancing in the telecommunication network domains, to provide the specified level of QoS in terms of performance and average end-to-end packet delay. Decentralization of route computations in each of the network domains based on the use of local information about their state makes it possible to increase the scalability of route decisions, and the introduction of coordination procedures ensures consistency in the work

of telecommunication domain controllers in terms of QoS. The investigation of the proposed method on a number of computational examples confirmed its convergence to optimal solutions with a finite number of iterations of the coordination procedure.

Keywords: software-defined telecommunication network; inter-domain routing; quality of service; average end-to-end packet delay.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Метод ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 2 (12). С. 169–182. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.169>.

Lemeshko, O., Yevdokymenko, M. (2020), "The method of hierarchical inter-domain routing in a software-defined telecommunications network with ensuring end-to-end quality of service", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (12), P. 169–182. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.169>.
