УДК 621.391 DOI: 10.30748/soivt.2020.61.04

О.В. Лемешко, М.О. Євдокименко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОТОКОВОЇ МОДЕЛІ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ

У статті запропонована вдосконалена потокова модель маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі. Вона ґрунтується на оновлених умовах забезпечення якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів. Це особливо актуально для мереж військового призначення, які функціонують в умовах обмеження мережного ресурсу, спричиненого постійною радіоелектронною та вогневою протидією противника. Отримати шукані умови забезпечення якості обслуговування вдалося на основі використання тензорного підходу до моделювання мультисервісних телекомунікаційних мереж. Як показали результати проведеного дослідження з підвищенням завантаженості телекомунікаційної мережі число задіяних маршрутів поступово зростало. Таким чином, оновлені умови забезпечення якості обслуговування були адекватними в умовах реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації, що сприяло більш ефективному використанню доступного мережного ресурсу.

Ключові слова: *телекомунікаційна мережа, маршрутизація, модель, маршрутні метрики, канал зв'язку, буферний ресурс, пропускна здатність, потоки пакетів, тензор, простір, система координат.*

Вступ

Постановка проблеми. Основною задачею сучасних телекомунікаційних мереж (ТКМ) різного функціонального призначення є забезпечення заданого рівня якості обслуговування (Quality of service, QoS). Мультисервісний характер побудови ТКМ вимагає чіткої диференціації щодо рівня QoS, котрий надається користувачам та додаткам, які вони використовують. При цьому все більше мережних додатків генерують потоки пакетів, чутливих одночасно до множини показників якості обслуговування – пропускної здатності, середньої затримки, джитеру, рівня втрат пакетів [1–2].

Особливо жорсткі вимоги щодо числових значень перелічених QoS-показників висуваються в ТКМ військового призначення, які функціонують в умовах обмеженості мережного ресурсу, котра викликана постійною радіоелектронною та вогневою протидією противника. Тому важливе значення при забезпеченні QoS відіграють технологічні та протокольні засоби управління доступним мережним ресурсом, до якого, як правило відносять пропускну здатність каналів зв’язку (канальний ресурс), буфер черг на маршрутизаторах мережі (буферний ресурс), мережний трафік (інформаційний ресурс), який підлягає розподілу та резервуванню в інтересах того чи іншого користувача (додатка) [2–3]. Одним з ключових засобів забезпечення якості обслуговування та управління мережним ресурсом є протоколи маршрутизації [4–5], на які покладаються функції щодо розрахунку та підтримки шляхів передачі пакетів в ТКМ відповідно до її стану та вимог щодо рівня QoS. При цьому ефективність подібних протокольних рішень напряму залежить від якості математичних моделей та методів маршрутизації, які постійно розвиваються та вдосконалюються.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переважна більшість існуючих протоколів маршрутизації, які, наприклад, використовуються в IP-мережах, базуються на графових моделях та методах (алгоритмах) пошуку найкоротшого шляху на графі. Так протоколи дистанційно-векторної маршрутизації RIP та IGRP використовують алгоритм Беллмана-Форда, а протоколи стану каналів OSPF та I-PNNI – алгоритм Дійкстри [4–7]. Ці алгоритмічні рішення, які мали прогнозовано низьку обчислювальну складність, вперше реалізувались на практиці в умовах, коли швидкості обробки пакетів на вузлах мережі складали десятки пакетів за секунду. Крім того, відмінною рисою цих рішень є використання інтегральних (композитних або складних) метрик, які б зважено враховували множину основних функціональних параметрів каналів зв’язку, в т.ч. QoS-показників: пропускної здатності та завантаженості каналу, середньої затримки та рівня втрат пакетів. Однак мінімізація довжини розрахованого шляху сприяла лише опосередкованому покращенню QoS-показників, які входили у вигляді згортки до обраної метрики. Гарантувати наперед задані значення кожного показника окремого, як сьогодні вимагає прак-

© Лемешко О.В., Євдокименко М.О., 2020

тика [8], при використанні лише маршрутних метрик неможливо.

У зв'язку з цим актуальним напрямком наукових досліджень в області телекомунікацій в цілому та маршрутизації зокрема є пошук та реалізація підходів, направлених на забезпечення саме заданих значень основних QoS-показників для кожного з потоків пакетів окремо (диференційовано). При цьому зростаюча обчислювальна складність практичної реалізації новітніх маршрутних рішень повинна компенсуватись, по-перше, підвищенням продуктивності сучасних комутаційних пристроїв (до мільйонів та мільярдів пакетів за секунду), по-друге, використанням програмно-конфігурованих мереж, коли функції розрахунку маршрутів реалізуються не на окремих комутаторах/маршрутизаторах, а на надпотужному сервері (контролері) мережної операційної системи [2]. Досить перспективним напрямком розвитку методів маршрутизації є використання оптимізаційних математичних моделей для опису ТКС та розрахунку шляхів. При цьому, зважаючи на переважно потоковий характер сучасного мережного трафіка, науковці все частіше використовуються саме потокові математичні моделі маршрутизації [9–15]. Перевагою подібних рішень є те, що за допомогою потокових моделей можна не тільки визначати шукані шляхи, але й досліджувати вплив характеристик трафіка на завантаженість мережного ресурсу (каналів зв'язку та буферу черг) [9], а в кінцевому випадку і на показники якості обслуговування [10–15]. Результативним підходом при моделюванні процесів маршрутизації є використання апарату тензорного аналізу мереж, запропонованого Г. Кроном [16] та розвиненим на телекомунікаційну сферу в наукових працях [17–25]. Саме тензорний опис ТКМ як складної системи дозволив отримати в аналітичному виді умови забезпечення якості обслуговування за множиною показників та використати їх як обмеження при розв'язанні оптимізаційних задач QoS-маршрутизації. Однак використання раніше відомих умов забезпечення якості обслуговування [17–25] має таку основну особливість – всі канали зв'язку ТКМ, які приймають участь у визначенні геометричного простору для подальшої побудови тензорної моделі, мають бути задіяними, тобто по ним обов'язково мають передаватись потоки пакетів. Тому, як показано в роботах [17–25], область виправданого використання відомих QoS-умов – це режим роботи ТКМ, близький до перевантаження, що вимагає задіяння всіх доступних ресурсів, перш за все канальних, з обов'язковою реалізацією багатошляхових стратегій маршрутизації. Якщо ж для того чи іншого потоку використання всіх доступних каналів зв'язку ТКМ в ході забезпечення заданого рівня якості обслуговування не є необхідним, то примусово виключити деякі з них з процесу тензорного опису можна лише на етапі геометризації структури ТКМ, як це, наприклад, показано в роботі [26]. Проте, процес виключення повинен носити не евристичний, а теоретично обґрунтований характер, так як нестача виключеного з розгляду канального ресурсу може негативно вплинути на рівень QoS.

Мета статті. Метою статті є вдосконалення потокової моделі маршрутизації в ТКМ, в межах якої пропонується використовувати оновлені умови забезпечення якості обслуговування за множиною показників, які є адекватними в умовах реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації при різній завантаженості доступного мережного ресурсу.

Виклад основного матеріалу

I. Геометризація структурно-функціональної побудови мультисервісної телекомунікаційної мережі

Як показав аналіз наукових праць, присвячених питанням становлення та розвитку теорії та методології тензорного моделювання ТКМ [17–25], першочерговим етапом побудови тензорної моделі мультисервісної ТКМ є геометризація її структури. Відповідно до підходу, запропонованим Г. Кроном [16] та розвиненим у роботах [17–25], структура ТКМ буде моделюватись одновимірною мережею $S=(U,V)$. Тоді маршрутизатори ТКМ будуть описуватись множиною вузлів мережі $U=\left\{u_i, i=\overline{1,m}\right\}$, де m – загальна кількість вузлів в мережі S. Множина гілок мережі $V=\left\{v_z; z=\overline{1,n}\right\}$ моделює канали зв'язку ТКМ, де n – загальна кількість гілок в мережі S. Таким чином, для опису елементів мережі використовується їх наскрізна нумерація.

Полюсами мережі S виступають вузли, що моделюють маршрутизатори, через які той чи інший потік пакетів надходить або вибуває з ТКМ. У подальших дослідженнях також будуть використовуватись такі структурні характеристики мережі S: $\kappa(S)$ – кількість базисних міжполюсних шляхів в мережі S; $\vartheta(S)$ – кількість базисних внутрішніх вузлових пар в мережі S, де множина внутрішніх вузлових пар включає в себе всі вузлові пари, крім полюсної.

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

$$\kappa(S)=n-m+2\,;\quad \vartheta(S)=m-2\,. \qquad (1)$$

На структурі телекомунікаційної мережі вводиться дискретний n-вимірний геометричний простір, тобто його розмір визначається кількістю каналів зв'язку в ТКМ. В залежності від аспекту розгля-

ду ТКМ у введеному дискретному n-вимірному просторі можуть визначатись ряд систем координат (СК), в яких координатними осями виступатимуть різнотипні базисні шляхи [17–20]: гілки, контури, вузлові пари, розрізи тощо. В межах даної роботи до уваги будуть прийняті наступні ортогональні системи координат, в яких будуть у подальшому взаємопов'язано розглядаються проекції тензорів основних функціональних параметрів ТКМ [17–18]:

– система координат гілок мережі $\left\{v_z, z=\overline{1,n}\right\}$, проекції тензорів в якій будуть позначатися індексом v;

– система координат міжполюсних шляхів $\left\{\gamma_i, i=\overline{1,\kappa}\right\}$ та внутрішніх вузлових пар $\left\{\varepsilon_j, j=\overline{1,\vartheta}\right\}$ мережі S, проекції тензора в якій будуть позначатися індексом $\gamma\varepsilon$. Ортогональність цих систем координат обґрунтовується тим, що відповідно до виразів (1) виконується умова $n=\kappa(S)+\vartheta(S)$.

На рис. 1 показано приклад визначення для мережі S базисних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, коли полюсами виступали вузли u_1 та u_5, а основні структурні характеристики приймали такі значення: $n=7$, $\kappa(S)=4$, $\vartheta(S)=3$.

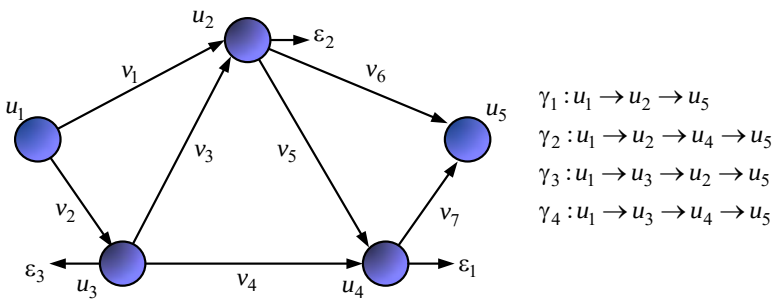


Рис. 1. Приклад одновимірної мережі S, яка моделює структуру ТКМ, та визначення базисних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар

У введеному n-вимірному просторі телекомунікаційна мережа відносно кожного окремо обраного потоку пакетів, для якого необхідно отримати умови забезпечення якості обслуговування, може бути описана за допомогою змішаного двовалентного тензора [17–20]:

$$Q = T \otimes \Lambda, \qquad (2)$$

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

Вираз (2) інколи доцільно представляти також в індексній формі:

$$q_j^i = \tau_j \lambda^i, \left(i, j = \overline{1,n}\right), \qquad (3)$$

де τ_j – середня затримка пакетів уздовж j-го координатного шляху (с); λ^i – середня інтенсивність потоку пакетів, які передаються уздовж i-го координатного шляху (1/с). В загальному випадку компоненти змішаного двовалентного тензора Q (2) пов'язані між собою за допомогою відповідних метричних тензорів [17–20]:

$$T = E\Lambda \quad \text{та} \quad \Lambda = GT \qquad (4)$$

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

В індексній формі вирази (4) приймають такий вигляд:

$$\tau_j = e_{ji}\lambda^i \quad \text{та} \quad \lambda^i = g^{ij}\tau_j, \ (i, j = \overline{1,n}). \qquad (5)$$

Тензорні рівняння (4) в тій чи іншій системі координат приймають відповідну векторно-матричну форму. Наприклад в системі координат гілок мережі тензорні рівняння (4) набудуть такого вигляду:

$$T_v = E_v \Lambda_v \quad \text{та} \quad \Lambda_v = G_v T_v, \qquad (6)$$

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

При цьому має місце наступне правило:

$$E_v = \left[G_v\right]^{-1}, \qquad (7)$$

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

Аналогічно в системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар мережі тензорні рівняння (4) матимуть такий вид:

$$T_{\gamma\varepsilon} = E_{\gamma\varepsilon}\Lambda_{\gamma\varepsilon} \quad \text{та} \quad \Lambda_{\gamma\varepsilon} = G_{\gamma\varepsilon}T_{\gamma\varepsilon}, \qquad (8)$$

де $\Lambda_{\gamma\varepsilon}$ та $T_{\gamma\varepsilon}$ – проекції тензорів Λ та T в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, які

представлені n-вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів в відповідних міжполюсних шляхах та внутрішніх вузлових парах ТКМ; $E_{\gamma\varepsilon} = \left\| e_{ij}^{\gamma\varepsilon} \right\|$ – проекція двічі коваріантного метричного тензора E в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, яка представлена діагональною $n \times n$-матрицею; $G_{\gamma\varepsilon} = \left\| g_{\gamma\varepsilon}^{ij} \right\|$ – проекція двічі контраваріантного метричного тензора G в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, яка представлена також відповідною діагональною $n \times n$-матрицею.

По аналогії з (7) справедливим є правило:

$$E_{\gamma\varepsilon} = \left[G_{\gamma\varepsilon} \right]^{-1}. \qquad (9)$$

Як відомо [16-20], проекції тензорів в різних системах координат пов'язані між собою за допомогою лінійних законів перетворення. Тоді перетворення координат проекції коваріантного тензора T при переході від СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар до СК гілок мережі здійснюється наступним чином:

$$T_v = A_{\gamma\varepsilon}^v T_{\gamma\varepsilon}, \qquad (10)$$

де $A_{\gamma\varepsilon}^v$ – $n \times n$-матриця коваріантного перетворення для цих базисів.

Проекція тензора середніх затримок пакетів в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, яка представлена n-вимірним вектором $T_{\gamma\varepsilon}$, має наступну структуру [17–18]:

$$T_{\gamma\varepsilon} = \begin{bmatrix} T_\gamma \\ -- \\ T_\varepsilon \end{bmatrix}; \; T_\gamma = \begin{bmatrix} \tau_1^\gamma \\ \vdots \\ \tau_j^\gamma \\ \vdots \\ \tau_\kappa^\gamma \end{bmatrix}; \; T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \tau_1^\varepsilon \\ \vdots \\ \tau_p^\varepsilon \\ \vdots \\ \tau_\vartheta^\varepsilon \end{bmatrix}, \qquad (11)$$

де T_γ – κ-вимірний вектор середніх затримок пакетів вздовж базисних міжполюсних шляхів мережі; T_ε – ϑ-вимірний вектор середніх затримок пакетів між вузлами, які утворюють базисні внутрішні вузлові пари; τ_j^γ – середня затримка пакетів вздовж j-го базисного міжполюсного шляху (γ_j); τ_p^ε – середня затримка пакетів між вузлами, які утворюють p-ту базисну внутрішню вузлову пару (ε_p).

Закон контраваріантного координатного перетворення при зміні розглянутих СК може бути описаний несингулярною $n \times n$-матрицею $C_{\gamma\varepsilon}^v$ [17–18]:

$$\Lambda_v = C_{\gamma\varepsilon}^v \Lambda_{\gamma\varepsilon}, \qquad (12)$$

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

$$\Lambda_{\gamma\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ -- \\ \Lambda_\varepsilon \end{bmatrix}; \; \Lambda_\gamma = \begin{bmatrix} \lambda_\gamma^1 \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^j \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^\kappa \end{bmatrix}; \; \Lambda_\varepsilon = \begin{bmatrix} \lambda_\varepsilon^1 \\ \vdots \\ \lambda_\varepsilon^p \\ \vdots \\ \lambda_\varepsilon^\vartheta \end{bmatrix}, \qquad (13)$$

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

Матриці коваріантного і контраваріантного перетворення координат при зміні зазначених базисів пов'язані між собою умовами ортогональності

$$C_{\gamma\varepsilon}^v (A_{\gamma\varepsilon}^v)^t = I, \qquad (14)$$

де I – одинична матриця розміру $n \times n$; $[\cdot]^t$ – операція транспонування матриці. Правила формування матриць коваріантного і контраваріантного перетворення координат введених тензорів при зміні описаних СК детально описані у роботах [17–18].

Метричні властивості введеного на структурі ТКМ геометричного простору напряму залежать від таких основних функціональних параметрів мережі та її елементів:

– *характеристики мережного трафіка*: кількість потоків, їх інтенсивності (швидкості передачі пакетів), довжини пакетів, тощо;

– *параметри інтерфейсів маршрутизаторів:* пропускна здатність, ступінь завантаженості, максимальний розмір (N) та завантаженість буферу черг, тощо.

Розглянемо приклад, коли функціонування інтерфейсів маршрутизаторів мережі моделюється системою масового обслуговування (СМО) M/M/1/N, що є адекватним в умовах перевантаження ТКМ. Тоді середню затримку пакетів в i-му каналі зв'язку ТКМ, яка є відповідною координатою проекції тензора T в системі координат гілок мережі (T_v), можна розрахувати за допомогою формули [19–20; 22; 24–25]:

$$\tau_i = \frac{\rho_i - \rho_i^{N+2} - (N+1)\rho_i^{N+1}(1-\rho_i)}{\lambda_i (1-\rho_i^{N+1})(1-\rho_i)}. \qquad (15)$$

де φ_i та ρ_i – це пропускна здатність та коефіцієнт використання *i*-го каналу зв'язку відповідно:

$$\rho_i = \frac{\boldsymbol{\lambda}_i}{\varphi_i},\ \rho_i < 1, \tag{16}$$

коли $\boldsymbol{\lambda}_i$ – це сумарна інтенсивність всіх потоків пакетів, які направляються до *i*-го каналу зв'язку ТКМ. Якщо вираз (15) узагальнити на всю множину каналів зв'язку та привести до векторно-матричного виду (6), то координати проекції двічі контраваріантного метричного тензора G в системі координат гілок мережі можуть бути представлені значеннями діагональних елементів матриці G_v [19–20; 22; 24–25]:

$$g_v^{ii} = \frac{\boldsymbol{\lambda}_i\,(1-\rho_i^{N+1})(1-\rho_i)\lambda_v^i}{\rho_i - \rho_i^{N+2} - (N+1)\rho_i^{N+1}(1-\rho_i)}, \tag{17}$$

де λ_v^i – інтенсивність потоку пакетів, який розглядається з точки зору побудови тензорної моделі (3), в *i*-му каналі зв'язку ТКМ.

У роботі [27] продемонстровано приклади метризації тензорної моделі ТКМ у випадку моделювання роботи інтерфейсу СМО SS/M/1/*N*, де символ SS вказує на самоподібність вхідного потоку (від англ. selfsimilar).

II. Формалізація умов забезпечення якості обслуговування з використанням тензорної моделі мережі

Для внутрішніх (неполюсних) вузлів, які по відношенню до аналізованого потоку пакетів є транзитними, всі координати λ_ε^j вектору Λ_ε (13) визначають для кожного окремого j-го вузла сумарну за всіма його інтерфейсами інтенсивність потоку втрачених пакетів. Тоді умова забезпечення якості обслуговування за ймовірністю втрат пакетів, набуває вигляду

$$\sum_{j=1}^{\vartheta} \lambda_\varepsilon^j \le \lambda^{\langle вим \rangle} p_{\langle доп \rangle}. \tag{18}$$

де $\lambda^{\langle вим \rangle}$ – середня інтенсивність потоку пакетів (1/с) на вході в ТКМ, в інтересах якого побудована тензорна модель (3); $p_{\langle доп \rangle}$ – допустима ймовірність втрат пакетів цього ж потоку в ТКМ. Фактично значення $\lambda^{\langle вим \rangle}$ та $p_{\langle доп \rangle}$ визначають QoS-вимоги до рівня пропускної здатності та надійності, які повинна надати ТКМ для цього потоку.

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

$$\tau_{MP} = \sum_{p=1}^{|P|} x_p \tau_p, \tag{19}$$

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

В загальному випадку для розрахунку x_p може бути використано вираз

$$x_p = \frac{\lambda_p}{\lambda^*}, \tag{20}$$

де λ_p – інтенсивність потоку пакетів, які були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою *p*-го шляху; λ^* – інтенсивність потоку пакетів, які були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою всіх доступних шляхів з множини *P*. За відсутності втрат пакетів в ТКМ $\lambda^* = \lambda^{\langle вим \rangle}$. При цьому умова забезпечення QoS-вимог за середньою міжкінцевою затримкою пакетів має такий вид:

$$\tau_{MP} \le \tau_{\langle доп \rangle}. \tag{21}$$

Згідно виразів (8)–(10), (12), (14) можна записати закон перетворення проекцій двічі коваріантного тензора E при зміні систем координат – від базису гілок до базису міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар:

$$E_{\gamma\varepsilon} = (C_{\gamma\varepsilon}^v)^t E_v C_{\gamma\varepsilon}^v. \tag{22}$$

Тоді з врахуванням (11) та (13) рівняння (8) можна представити у такій векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} T_\gamma \\ -- \\ T_\varepsilon \end{bmatrix} = \left\| \begin{matrix} E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \\ --- & + & --- \\ E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \end{matrix} \right\| \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ -- \\ \Lambda_\varepsilon \end{bmatrix} \tag{23}$$

при

$$\left\| \begin{matrix} E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \\ --- & + & --- \\ E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \end{matrix} \right\| = E_{\gamma\varepsilon},$$

де $E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle}$ – квадратна підматриця розміру $\kappa \times \kappa$; $E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle}$ – квадратна підматриця розміру $\vartheta \times \vartheta$; $E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle}$ – підматриця розміру $\kappa \times \vartheta$; $E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle}$ – підматриця розміру $\vartheta \times \kappa$. З виразу (23) можна отримати формулу

$$T_\gamma = E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_\gamma + E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_\varepsilon. \tag{24}$$

Щоб отримати вираз, еквівалентний до (19), спочатку помножимо ліву й праву частини формули (24) на Λ_γ^t, а потім поділимо їх же на λ^*. В результаті проведених перетворень є справедливою наступна рівність

$$\tau_{MP} = \frac{1}{\lambda^*}\left(\Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1\rangle}\Lambda_\gamma + \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2\rangle}\Lambda_\varepsilon\right). \qquad (25)$$

Беручи до уваги нерівність (21), умова забезпечення якості обслуговування за середньою затримкою пакетів та пропускною здатністю в умовах ймовірного перевантаження ТКМ набуде виду

$$\tau_{\langle доп\rangle}\lambda^* \geq \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1\rangle}\Lambda_\gamma + \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2\rangle}\Lambda_\varepsilon . \qquad (26)$$

Перевагами отриманих умов забезпечення якості обслуговування (18) та (26) є наступне:

– взаємопов'язане охоплення одночасно множини різнотипних QoS-показників: швидкості передачі пакетів, середньої міжкінцевої затримки (26) та ймовірності втрат пакетів (18);

– врахування основних структурних та функціональних параметрів ТКМ, характеристик трафіка та дисциплін обслуговування пакетів;

– аналітична форма умов, що дозволяє забезпечити їх використання при оптимізації процесів управління трафіком: маршрутизації, розподілу та резервування канальних та буферних ресурсів, тощо;

– інваріантність виду отриманих умов, які є справедливими для широкого класу вихідних даних щодо структурно-функціональної побудови ТКМ, характеристик трафіка та використаних на маршрутизаторах дисциплін обслуговування пакетів, в т.ч. в умовах перевантаження та ймовірних втрат пакетів при реалізації як одношляхової, так і багатошляхової стратегій маршрутизації, алгоритмів статичного та/або динамічного розподілу мережних ресурсів.

III. Базова потокова модель маршрутизації в телекомунікаційній мережі з урахуванням ймовірних втрат пакетів

У загальному випадку, як показано в роботах [9–10; 15; 19], структура потокової математичної моделі маршрутизації в ТКМ містить наступні умови, які в подальшому при формулюванні відповідних оптимізаційних задач, виступають як обмеження або критерії оптимальності: умови збереження потоку на окремих маршрутизаторах та в ТКМ в цілому; умови запобігання перевантаження каналів зв'язку мережі; умови відсутності петель в розрахованих маршрутах; умови збалансованого завантаження доступних мережних ресурсів; умови реалізації одно або багатошляхової маршрутизації; умови захисту елементів мережі та її пропускної здатності; а також умови забезпечення гарантованої якості обслуговування в ТКМ.

За базову потокову модель маршрутизації в ТКМ було запропоноване рішення, яке досить повно описане та доповнене у роботах [19–20; 22; 24; 27]. Тому нехай структура ТКМ описується орієнтованим графом $\Gamma = (U, W)$, де $U = \left\{u_i, i = \overline{1,m}\right\}$ – це фактично введена у першому розділі множина вершин (вузлів), що моделюють маршрутизатори мережі, а $W = \left\{w_{i,j},\ i, j = \overline{1,m};\ i \neq j\right\}$ – множина дуг графа Γ, кожна дуга $w_{i,j}$ якої моделює канал зв'язку, що з'єднує i-й та j-й маршрутизатори ТКМ. Таким чином, базова модель маршрутизації використовує не наскрізну нумерацію каналів зв'язку (як у попередніх розділах), а подвійну – за номерами суміжних маршрутизаторів. Тобто кожній гілці v_z мережі S можна поставити у однозначну відповідність дугу $w_{i,j}$ графа Γ. Також позначимо через $\varphi_{i,j}$ пропускну здатність (1/с) каналу $w_{i,j}$, яка фактично визначається пропускною здатністю j-го мережного інтерфейсу на i-му маршрутизаторі телекомунікаційної мережі.

Нехай в мультисервісній ТКМ циркулює множина потоків пакетів K, які генеруються відповідними мережними додатками. Тоді в процесі розв'язання задач маршрутизації в ТКМ необхідно розрахувати множину маршрутних змінних $x_{i,j}^k$, кожна з яких кількісно визначає долю k-го потоку пакетів, який направляється з i-го на j-й маршрутизатор через відповідний інтерфейс. Проте, не всі пакети, які надходять на той чи інший інтерфейс будуть передаватись відповідним каналом. Частина цих пакетів може бути втрачена, відкинута з черги у зв'язку з її переповненням. Тому позначимо через $p_{i,j}^k$ – ймовірність втрат пакетів k-го потоку на j-му інтерфейсі i-го маршрутизатора. Тоді інтенсивність k-го потоку пакетів, які відкинуті (втрачені) на j-му інтерфейсі i-го маршрутизатора, можна розрахувати за допомогою наступної формули

$$r_{i,j}^k = \lambda_k^{\langle вим\rangle} x_{i,j}^k p_{i,j}^k . \qquad (27)$$

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

$$\lambda_{i,j}^k = \lambda_k^{\langle вим\rangle} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k) . \qquad (28)$$

В залежності від типу стратегії маршрутизації, яка підтримується в ТКМ, на маршрутні змінні накладаються такі мови:

– при реалізації одношляхової маршрутизації:

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} , \qquad (29)$$

– при реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації:

$$0 \le x_{i,j}^k \le 1 . \qquad (30)$$

Для забезпечення зв'язності розрахованих маршрутів варто виконати умови збереження потоку [19–20; 22; 24; 27]:

$$\begin{cases} \sum\limits_{j:w_{i,j}\in W} x_{i,j}^k = 1, \\ k \in K,\ \ u_i = s_k; \\ \sum\limits_{j:w_{i,j}\in W} x_{i,j}^k - \sum\limits_{j:w_{j,i}\in W} x_{j,i}^k (1 - p_{j,i}^k) = 0 , \\ k \in K,\ \ u_i \ne s_k, d_k; \\ \sum\limits_{j:w_{i,j}\in W} x_{j,i}^k (1 - p_{j,i}^k) = b^k , \\ k \in K,\ \ u_i = d_k , \end{cases} \qquad (31)$$

де s_k – маршрутизатор-джерело (відправник); d_k – маршрутизатор-отримувач пакетів k-го потоку; b^k – доля k-го потоку пакетів, які були успішно передані (доставлені) мережею від маршрутизатора-джерела до вузла-отримувача.

Умови збереження потоку на маршрутизаторах ТКМ (31) мають нелінійний характер, так як в загальному випадку ймовірність втрат пакетів є нелінійною функцією як від характеристик трафіка, так і від параметрів самого інтерфейсу. Математична формалізація виразів для розрахунку ймовірності втрат пакетів, як правило, визначається реалізованою дисципліною їх обслуговування на інтерфейсі. Наприклад, якщо робота j-го інтерфейсу i-го вузла моделюється системою масового обслуговування з відмовами виду $M/M/1/N$, то ймовірність втрат пакетів k-го потоку може бути розрахована наступним чином:

$$p_{i,j}^k = \frac{(1-\rho_{i,j})(\rho_{i,j})^N}{1-(\rho_{i,j})^{N+1}} . \qquad (32)$$

де коефіцієнт використання j-го інтерфейсу на i-му маршрутизаторі ($\rho_{i,j}$) визначається за формулою

$$\rho_{i,j} = \frac{\sum\limits_{k\in K} \lambda_k^{\langle вим \rangle} x_{i,j}^k}{\varphi_{i,j}} . \qquad (33)$$

З метою запобігання перевантаження каналів зв'язку ТКМ на маршрутні змінні $x_{i,j}^k$ накладаються відповідні обмеження:

$$\sum_{k\in K} \lambda_k^{\langle вим \rangle} x_{i,j}^k < \varphi_{i,j} , \qquad (34)$$

де $\lambda_k^{\langle вим \rangle}$ – середня інтенсивність k-го потоку пакетів (1/с) на вході в ТКМ, значення якої напряму визначає вимоги щодо пропускної здатності, необхідної для цього потоку.

Фактично в ході виконання обмежень (34) забезпечується виконання раніше введених умов (15). В умовах обмеженості максимальної довжини черги та випадкового характеру сучасного мережного трафіка виконання обмежень (34) не гарантує відсутність перевантаження самої черги. В найкращому випадку в умовах ймовірних втрат пакетів виконання (34) фактично забезпечує лише керованість процесу боротьби з перевантаженням у ТКМ. Таким чином, в термінах описаної базової моделі умови забезпечення якості обслуговування за ймовірністю втрат пакетів (18) по відношенню до k-го потоку можна представити в наступному вигляді:

$$p_{\langle доп \rangle}^k \ge p^k \text{ при } p_д^k = 1 - b^k , \qquad (35)$$

де $p_д^k$ та $p_{\langle доп \rangle}^k$ – дійсне та допустиме значення ймовірності втрат пакетів k-го потоку в ТКМ.

QoS-умови (26) та (35) виступають як додаткові обмеження, що накладаються на маршрутні змінні $x_{i,j}^k$. Проекції метричних тензорів E та G залежать від значень маршрутних змінних наступним чином

$$\lambda_z = \sum_{k\in K} \lambda_k^{\langle вим \rangle} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \lambda_v^z = \lambda_k^{\langle вим \rangle} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k) . \qquad (36)$$

У виразах (36) визначаються інтенсивності потоків (агрегованого та окремо k-го) в одному й тому ж каналі зв'язку ТКМ, який в межах наскрізної нумерації моделюється гілкою v_z, а при подвійній нумерації – дугою $w_{i,j}$.

IV. Критерій оптимальності рішень задач маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування

Важливим моментом при постановці, а в подальшому і розв'язанні задачі маршрутизації в ТКМ є вибір (формулювання) критерію оптимальності маршрутних рішень. Традиційно його зміст повинен мати чітке фізичне трактування з точки зору процесу маршрутизації в ТКМ, а його вид та форма мають орієнтувати на можливість отримання шуканого рішення з мінімальними обчислювальними затратами та в реальному часі, тобто вписуватись в існуючі таймери оновлення маршрутних таблиць, які складають в існуючих ТКМ десятки секунд [2–3]. Зважаючи на те, що на цей час єдиної форми критерію оптимальності маршрутних рішень, яка б задовольняла більшість висунутих до нього вимог, не існує. Тому науковці в залежності від мети дослідження використовують досить потужну систему критеріїв оптимальності маршрутних рішень [9–20], кожен з яких має певні переваги та недоліки, а отже і свою область пріоритетного використання в тих чи інших умовах функціонування мультисервісної телекомунікаційної мережі. В даній роботі критерієм оптима-

льності обрано мінімум наступної лінійної цільової функції:

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^{x} \lambda_{k}^{\langle вим \rangle} x_{i,j}^{k} , \qquad (37)$$

де $h_{i,j}^{x}$ – маршрутна метрика каналу зв'язку, який з'єднує i -й та j -й маршрутизатори ТКМ.

Традиційно маршрутні метрики безпосередньо пов'язані з функціональними параметрами каналів зв'язку, хоча у випадку, коли $h_{i,j}^{x} = 1$, рішенням задачі маршрутизації для кожного k-го потоку пакетів, як правило, є шлях з мінімальною кількістю переприйомів (хопів). Проте, якщо використовувати метрику $h_{i,j}^{x} = \varphi^{*} / \varphi_{i,j}$, то фактично цільова функція (37) буде визначати зважену суму коефіцієнтів завантаження всіх каналів зв'язку. У випадку невеликих значень вагового коефіцієнта φ^{*} використання подібної метрики призводить до розрахунку шляхів з найменшою сумарною метрикою, тобто з найвищою пропускною здатністю. При збільшенні значень φ^{*} за результатами мінімізації (37) розраховані шляхи будуть знову ж таки більш критичними також до кількості переприйомів пакетів.

В існуючих протоколах, наприклад, OSPF або IGRP/EIGRP ваговий коефіцієнт φ^{*} приймає значення 10^{8} або 10^{7}, що можливо пояснюються різними одиницями вимірювання пропускної здатності $\varphi_{i,j}$, відповідно біт/с або кбіт/с [2–3].

V. Дослідження процесу маршрутизації за допомогою запропонованої тензорної моделі телекомунікаційної мережі

З метою аналізу особливостей розв'язання задач маршрутизації з використанням вдосконалених QoS-умов (26) та (35) було проведено дослідження, в якому вихідними виступали такі дані:

– структура ТКМ представлена на рис. 2, якій відповідає одновимірна мережа, що наведена на рис. 1;

– на рис. 2 в розривах каналів зв'язку вказані їх пропускні здатності (1/с);

– перший маршрутизатор виступав джерелом, а п'ятий – отримувачем пакетів;

– функціонування кожного з інтерфейсів маршрутизаторів моделювалось системою масового обслуговування M/M/1/N;

– кількісно QoS-вимоги приймали такі значення:

$$\lambda^{\langle вим \rangle} = 10 \div 485 \ \ 1/с; \ \tau_{\langle доп \rangle} = 80 \text{ мс};$$

$$p_{\langle доп \rangle} = 0,02 \ ; \ N = 30 . \qquad (38)$$

Структура ТКМ (рис. 2) визначає 7-ми вимірний геометричний простір.

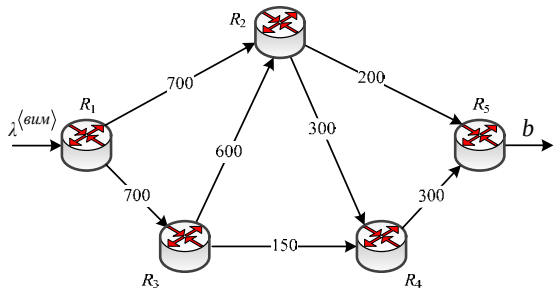
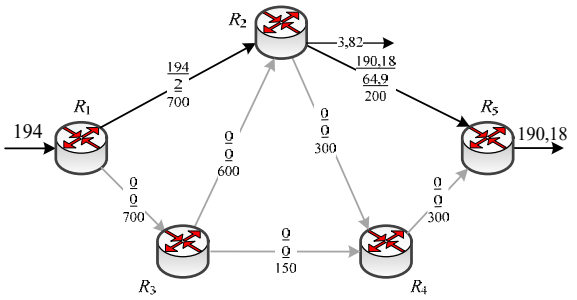


Рис. 2. Приклад структури ТКМ, яка досліджувалась

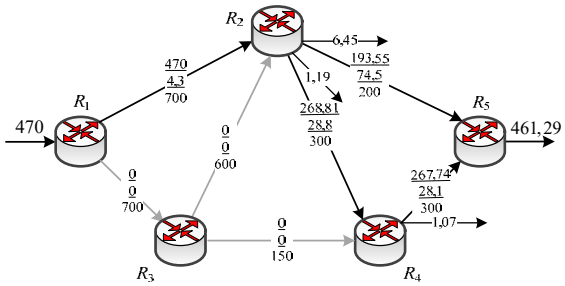
Тоді матриця перетворення координат введених тензорів при переході від базису міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар до базису гілок мережі (рис. 1) буде мати такий вигляд

$$A_{\gamma\varepsilon}^{v} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{Vmatrix} .$$

При використанні лінійного критерію оптимальності (37) з метриками $h_{i,j}^{x} = 10^{7} / \varphi_{i,j}$ в залежності від вимог щодо значень $\lambda^{\langle вим \rangle}$ реалізувався порядок маршрутизації, що представлений на рис. 3 та рис. 4.



а



б

Рис. 3. Порядок одно та двошляхової QoS-маршрутизації потоку пакетів при використанні критерію оптимальності (37):

а – $\lambda^{\langle вим \rangle}$ =194 1/с; б – $\lambda^{\langle вим \rangle}$ =470 1/с

В розривах каналів зв'язку показано наступні дані (згори до низу): інтенсивність потоку пакетів,

середня затримка пакетів та його пропускна здатність.

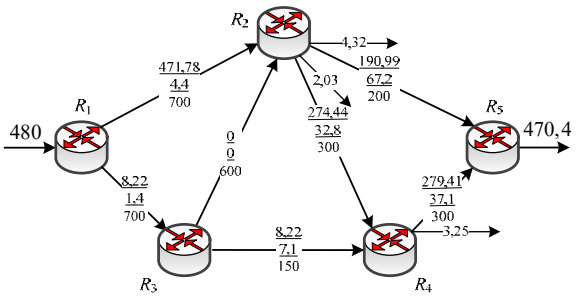
При наявності втрат пакетів біля відповідного вихідного інтерфейсу маршрутизатора на цих же рисунках у розриві стрілочки показано інтенсивність потоку відкинутих пакетів.

Особливістю представленого рішення є підтримка стратегій як одношляхової (рис. 3, а), так і багатошляхової QoS-маршрутизації (рис. 3, б; рис. 4, а, б).

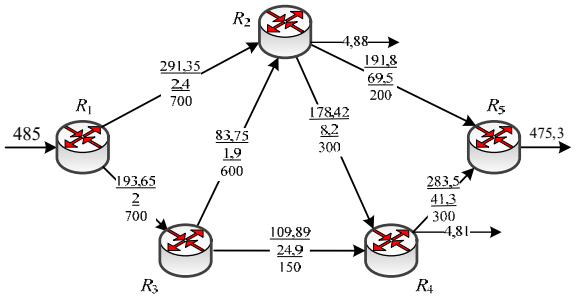
При цьому використання критерію оптимальності (37) завжди призводило до мінімізації кількості використаних маршрутів, яка напрямку залежала від рівня QoS-вимог.

Зростання навантаження на ТКМ ($\lambda^{\langle вим \rangle}$) супроводжувалось адаптивним збільшенням кількості використаних маршрутів, тобто задоволення більш жорстких QoS-вимог відбувалось за рахунок задіяння додаткового мережного (канального та буферного) ресурсу.

Характеристики розрахованих шляхів та рівень якості обслуговування, який вони забезпечували в ТКМ, детально представлені в табл. 1.



а



б

Рис. 4. Порядок тришляхової та чотиришляхової QoS-маршрутизації потоку пакетів при використанні критерію оптимальності (37):

а – $\lambda^{\langle вим \rangle} = 480$ 1/с; б – $\lambda^{\langle вим \rangle} = 485$ 1/с.

Таблиця 1

Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. 3 та рис. 4, при забезпеченні заданого рівня QoS

№	$\lambda^{\langle вим \rangle}$ (1/с)	λ^* (1/с)	$\lvert P \rvert$	Характеристики розрахованих шляхів			τ_{MP} (мс)	$p_д$
				Маршрут	λ_p (1/с)	τ_p (мс)		
1	194	190,18	1	$R_1 \to R_2 \to R_5$	190,18	66,9	66,9	0,0197
2	470	461,28	2	$R_1 \to R_2 \to R_5$	193,55	78,8	68,6	0,185
				$R_1 \to R_2 \to R_4 \to R_5$	267,74	61,2		
3	480	470,4	3	$R_1 \to R_2 \to R_5$	190,99	71,5	72,7	0,02
				$R_1 \to R_2 \to R_4 \to R_5$	271,29	74,3		
				$R_1 \to R_3 \to R_4 \to R_5$	8,12	45,6		
4	485	475,3	4	$R_1 \to R_2 \to R_5$	191,8	71,9	64	0,02
				$R_1 \to R_2 \to R_4 \to R_5$	93,09	51,9		
				$R_1 \to R_3 \to R_2 \to R_4 \to R_5$	82,35	53,4		
				$R_1 \to R_3 \to R_4 \to R_5$	108,06	68,2		

Висновки

У статті вдосконалено потокову модель QoS-маршрутизації, яка ґрунтується на оновлених умовах забезпечення якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів (26) та (35).

Зазначені QoS-умови виступали як одні з ключових обмежень, які накладались на маршрутні змінні (29) або (30), при формулюванні та розв'язанні оптимізаційної задачі маршрутизації з критерієм оптимальності (37).

Отримати шукані умови забезпечення якості обслуговування вдалося на основі використання тензорної методології досліджень ТКМ шляхом

геометризації структури мережі з введенням адекватного простору та систем координат гілок мережі та незалежник міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар (рис. 1).

Отримані QoS-умови (35) мають інваріантний вид. При цьому метрика введеного простору (17) враховувала основні функціональні параметри каналів зв'язку (пропускну здатність та дисципліну обслуговування пакетів) та характеристики мережного трафіка (кількість потоків та їх інтенсивність).

Як показали результати проведеного дослідження (табл. 1) використання критерію оптимальності (37) орієнтувало на мінімізацію кількості використаних шляхів.

Запропонована потокова модель маршрутизації адаптивно реагувала на зміну завантаженості мережі. При цьому з підвищенням QoS-вимог число задіяних маршрутів зростало, тобто оновлені умови забезпечення якості обслуговування були адекватними в умовах реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації, що сприяє більш ефективному використанню доступного мережного ресурсу.

Список літератури

1. Поповський В.В. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура та основні функції [Електронний ресурс] / В.В. Поповський. – Х.: СМІТ, 2011. – Режим доступу: http://www.znanius.com/3534.html.

2. Monge A.S. MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services / A.S. Monge, K.G. Szarkowicz. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2016. – 920 p.

3. Barreiros M. QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations / M. Barreiros, P. Lundqvist. – Hardcover: Wiley, 2016. – 254 p.

4. Medhi D. Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures / D. Medhi, K. Ramasamy. – Cambridge: Elsevier Inc., 2018. – 1018 p.

5. Misra S. Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies 1st Edition / S. Misra, S. Goswami. – Hoboken: Wiley, 2017. – 536 p.

6. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs / E.W. Dijkstra // Numerische Mathematik. – 1959. – № 1. – P. 269-271.

7. Bellman R. On a routing problem / R. Bellman // Quarterly of Applied Mathematics. – 1958. – № 1(16). – P. 87-90.

8. The official site of ITU.INT. ITU-T Rec. Y.1541. Network performance objective for IP-based services. – Available at: https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I/en.

9. A constrained multipath traffic engineering scheme for MPLS networks / Yo. Seok, Yo. Lee, Ya. Choi, C. Kim // Proceedings of the IEEE International Conference "International Conference on Communications ICC 2002 (Cat. No.02CH37333)". – New York, 28 April-2 May 2002. – P. 2431-2436. https://doi.org/10.1109/ICC.2002.997280.

10. An overview of routing optimization for internet traffic engineering / N. Wang, K. Ho, G. Pavlou, M. Howarth // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2008. – № 1(10). – P. 36-56. https://doi.org/10.1109/COMST.2008.4483669.

11. Heuristic and exact algorithms for QoS routing with multiple constraints / G. Feng, K. Makki, N. Pissinou, C. Douligeris // IEICE Transactions on Communications. – 2002. – № 12(85). – P. 2838-2850.

12. Sanguankotchakorn T. Hybrid multi-constrained optimal path QoS routing with inaccurate link state / T. Sanguankotchakorn, N. Perera // Proceedings of the Ninth International Conference "Networks". – Menuires, 11-16 April 2010. – P. 321-326. https://doi.org/10.1109/ICN.2010.57.

13. Evaluation of heuristic path selection algorithms for multi-constrained QoS routing / W. Xiao, B.H. Soong, C.L. Law, Y.L. Guan // Proceedings of the International Conference "Networking, Sensing and control", Taipei, 21-23 March 2004. – P. 112-116. https://doi.org/10.1109/ICNSC.2004.1297418.

14. Agrawal H. Optimization of QoS routing / H. Agrawal, M. Grah, M. Gregory // Proceedings of the 6th IEEE/ACIS International Conference "Computer and Information Science ICIS 2007". – 2007. – P. 598-603.

15. Евсеева О.Ю. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания / О.Ю. Евсеева, С.В. Гаркуша // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 3(8). – С. 24-46. – Режим доступу: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/123_evseeva_review.pdf.

16. Крон Г. Тензорный анализ сетей / Г. Крон. – М.: Сов. радио, 1978. – 720 с.

17. Лемешко А.В. Методика выбора независимых путей с определением их количества при решении задач многопутевой маршрутизации / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, О.А. Дробот // Праці Українського науково-дослідного інституту радіо і телебачення. – 2006. – № 4(48). – С. 69-73.

18. Евсеева О.Ю. Диакоптическая тензорная модель ТКС в базисе путей и внутренних разрезов / О.Ю. Евсеева // Проблеми телекомунікацій. – 2010. – № 1(1). – С. 6-22. – Режим доступу: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/101_yevseyeva_diakoptics.pdf.

19. Лемешко А.В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 4(9). – С. 16-31. – Режим доступу: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/124_lemeshko_tensor.pdf.

20. Lemeshko A.V. Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greate Number of Indices / A.V. Lemeshko, O.Yu. Evseeva, S.V. Garkusha // Telecommunications and Radio-Engineering. – 2014. – № 15(73). – P. 1339-1360. https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30.

21. Лемешко А.В. Динамическое представление тензорной модели многопутевой QoS-маршрутизации в нестационарном режиме работы сетевых интерфейсов / А.В. Лемешко, А.С. Еременко // Проблеми телекомунікацій. – 2016. – № 1(18). – С. 3-21. – Режим доступу: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/161_lemeshko_dynamic.pdf.

22. Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks / O.V. Lemeshko, S.V. Garkusha, O.S. Yeremenko, A.M. Hailan // Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Omsk, 21-23 May 2015. – P. 1-4.

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

24. Lemeshko O. Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating / Lemeshko O., Yevdokymenko M., Alsaleem A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – № 2(95). – pp. 40-46. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989.

25. Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network / O. Lemeshko, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, A.M. Hailan // The Third International Conference "Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020)". – Kyiv, 21-22 January 2020. – P. 1-12.

26. Лемешко А.В. Повышение масштабируемости управления трафиком и обеспечения качества обслуживания с использованием оверлейных сетей [Електронний ресурс] / А.В. Лемешко, О.А. Дробот, Ю.Н. Добрышкин // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 1(3). – С. 11-27. – Режим доступу: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/111_lemeshko_scalability.pdf.

27. Лемешко А.В., Гаркуша С.В. Обеспечение качества обслуживания в условиях согласованного решения задач управления трафиком в телекоммуникационной сети [Електронний ресурс] / А.В. Лемешко, С.В. Гаркуша // Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 2(14). – С. 52-66. – Режим доступу: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/142_lemeshko_qos.pdf.

References

1. Popovskyi, V.V. (2011), "*Telekomunikatsiini systemy ta merezhi. Struktura ta osnovni funktsii*" [*Telecommunication systems and networks. Structure and main functions*], SMIT, Kharkiv, available at: www.znanius.com/3534.html.

2. Monge, A.S. and Szarkowicz, K.G. (2016), *MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services*, O'Reilly Media, Sebastopol, 920 p.

3. Barreiros, M. and Lundqvist, P. (2016), *QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations*, Wiley, Hardcover, 254 p.

4. Medhi, D. and Ramasamy, K. (2018), *Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures*, Elsevier Inc., Cambridge, 1018 p.

5. Misra, S. and Goswami, S. (2017), *Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies 1st Edition*, Wiley, Hoboken, 536 p.

6. Dijkstra, E.W. (1959), A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, No. 1, pp. 269-271.

7. Bellman, R. (1958), On a routing problem, *Quarterly of Applied Mathematics*, No. 1(16), pp. 87-90.

8. The Official Site of ITU.INT (2011), *ITU-T Rec. Y.1541. Network performance objective for IP-based services*, available at: www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I/en.

9. Seok, Yo., Lee, Yo., Choi, Ya. and Kim, C. (2002), A constrained multipath traffic engineering scheme for MPLS networks, *Proceedings of the IEEE International Conference "International Conference on Communications ICC 2002 (Cat. No.02CH37333)"*, 28 April-2 May, New York, USA, pp. 2431-2436. https://doi.org/10.1109/ICC.2002.997280.

10. Wang, N., Ho, K., Pavlou, G. and Howarth, M. (2008), An overview of routing optimization for internet traffic engineering, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, No. 1(10), pp. 36-56. https://doi.org/10.1109/COMST.2008.4483669.

11. Feng, G., Makki, K., Pissinou, N. and Douligeris, C. (2002), Heuristic and exact algorithms for QoS routing with multiple constraints, *IEICE Transactions on Communications*, No. 12(85), pp. 2838-2850.

12. Sanguankotchakorn, T. and Perera, N. (2010), Hybrid multi-constrained optimal path QoS routing with inaccurate link state, *Proceedings of the Ninth International Conference "Networks"*, 11-16 April, Menuires, France, pp. 321-326. https://doi.org/10.1109/ICN.2010.57.

13. Xiao, W., Soong, B.H., Law, C.L. and Guan, Y.L. (2004), Evaluation of heuristic path selection algorithms for multi-constrained QoS routing, *Proceedings of the International Conference "Networking, Sensing and control"*, 21-23 March, Taipei, Taiwan, pp. 112-116. https://doi.org/10.1109/ICNSC.2004.1297418.

14. Agrawal, H., Grah, M. and Gregory, M. (2007), Optimization of QoS routing, *Proceedings of the 6th IEEE/ACIS International Conference "Computer and Information Science ICIS 2007"*, 12 July, pp. 598-603.

15. Evseeva, O.Yu. and Harkusha, S.V. (2012), "Obzor tekhnolohycheskykh y teoretycheskykh reshenyi v oblasty marshrutyzatsyy na osnove kachestva obsluzhyvanyia" [A review of technological and theoretical solutions in the field of routing based on the quality of service], *Problems of Telecommunications*, No. 3(8), pp. 24-46, available at: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/123_evseeva_review.pdf.

16. Kron, H. (1978), "*Tenzornyi analyz setei*" [*Tensor analysis of networks*], Sov. radyo, Moscow, 720 p.

17. Lemeshko, A.V., Evseeva, O.Yu. and Drobot, O.A. (2006), "Metodika vybora nezavisimyh putej s opredeleniem ih kolichestva pri reshenii zadach mnogoputevoj marshrutizacii" [The technique of choosing independent paths with determining their number when solving multi-path routing problems], *Proceedings of the Ukrainian Research Institute of Radio and Television*, No. 4(48), pp. 69-73.

18. Evseeva, O.Yu. (2010), "Dyakoptycheskaia tenzornaia model TKS v bazyse putei y vnutrennykh razrezov" [Diakoptic tensor model of TCS in the basis of paths and internal sections], *Problems of Telecommunications*, No. 1(1), pp. 6-22, available at: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/101_yevseyeva_diakoptics.pdf.

19. Lemeshko, A.V. and Evseeva, O.Yu. (2012), "Tenzornaia model mnohoputevoi marshrutyzatsyy s harantyiamy kachestva obsluzhyvanyia odnovremenno po mnozhestvu raznorodnыkh pokazatelei" [Tensor Multipath Routing Model with Quality of Service Guarantees Simultaneously by Multiple Heterogeneous Indicators], *Problems of Telecommunications*, No. 4(9), pp. 16-31, available at: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/124_lemeshko_tensor.pdf.

20. Lemeshko, A.V., Evseeva, O.Yu. and 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), pp. 1339-1360. https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30.

21. Lemeshko, A.V. and Evseeva, O.Yu. (2012), "Tenzornaia model mnohoputevoi marshrutyzatsyy s harantyiamy kachestva obsluzhyvanyia odnovremenno po mnozhestvu raznorodnykh pokazatelei" [Dynamic representation of the tensor model of multipath QoS routing in non-stationary mode of operation of network interfaces], *Problems of Telecommunications*, No. 1(18), pp. 3-21, available at: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/161_lemeshko_dynamic.pdf.

22. Lemeshko, O.V., Garkusha, S.V., Yeremenko, O.S. and Hailan, A.M. (2015), Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks, *Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 21-23 May, Omsk, Russia, pp. 1-4.

23. Lemeshko, A.V. and Evseeva, O.Yu. (2010), "Tenzornaia heometryzatsyia strukturno-funktsyonalnoho predstavlenyia telekom-munykatsyonnoi systemy v bazyse mezhpoliusnykh putei y vnutrennykh razrezov" [Tensor geometry of the structural and functional representation of the telecommunication system in the basis of interpolar paths and internal sections], *Scientific notes of the Ukrainian Communication Research Institute*, No. 1(13), pp. 14-26.

24. Lemeshko, O. and Yevdokymenko, M. (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), pp. 40-46. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989.

25. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M. and Hailan, A.M. (2020), Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network, *The Third International Conference "Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020)"*, 21-22 January, Kyiv, Ukraine, pp. 1-12.

26. Lemeshko, A.V., Drobot, O.A. and Dobryshkyn, Yu.N. (2011), "Povyshenye masshtabyruemosty upravlenyia trafykom y obespechenyia kachestva obsluzhyvanyia s yspolzovanyem overleinykh setei" [Increasing the scalability of traffic management and quality of service using overlays], *Problems of Telecommunications*, No. 1(3), pp. 11-27, available at: www.pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/111_lemeshko_scalability.pdf.

27. Lemeshko, A.V. and Harkusha, S.V. (2014), "Obespechenye kachestva obsluzhyvanyia v uslovyiakh sohlasovannoho reshenyia zadach upravlenyia trafykom v telekommunykatsyonnoi sety" [Provision of quality of service in the conditions of the coordinated solution of the problems of traffic management in the telecommunication network], *Problems of Telecommunications*, No. 2(14), pp. 52-66, available at: www.pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/142_lemeshko_qos.pdf.

Надійшла до редколегії 03.02.2020
Схвалена до друку 10.03.2020

Відомості про авторів:

Лемешко Олександр Віталійович
доктор технічних наук професор
завідувач кафедри
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-0609-6520

Євдокименко Марина Олександрівна
кандидат технічних наук доцент
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-7391-3068

Information about the authors:

Oleksandr Lemeshko
Doctor of Technical Sciences Professor
Head of Department
of Kharkiv National University
of Radio Electronics,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-0609-6520

Maryna Yevdokymenko
Candidate of Technical Associate Professor
of Kharkiv National University
of Radio Electronics,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-7391-3068

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ В МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

А.В. Лемешко, М.А. Евдокименко

В статье предложена усовершенствованная потоковая модель маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети. Она основывается на обновленных условиях обеспечения качества обслуживания по показателям пропускной способности, средней междуконечной задержки и вероятности потерь пакетов. Это

особенно актуально для сетей военного назначения, функционирующих в условиях ограниченности сетевого ресурса, вызванным постоянным радиоэлектронным и огневым противодействием противника. Получить искомые условия обеспечения качества обслуживания удалось на основе использования тензорного подхода к моделированию мультисервисных телекоммуникационных сетей. Как показали результаты проведенного исследования с увеличением загруженности телекоммуникационной сети число задействованных маршрутов постепенно росло. Обновленные условия обеспечения качества обслуживания были адекватными в условиях реализации как однопутевой, так и многопутевой маршрутизации, что способствовало более эффективному использованию доступного сетевого ресурса.

Ключевые слова: *телекоммуникационная сеть, маршрутизация, модель, маршрутные метрики, канал связи, буферный ресурс, пропускная способность, потоки пакетов, тензор, пространство, система координат.*

ADVANCED FLOW-BASED ROUTING MODEL WITH QUALITY OF SERVICE ENSURING IN MULTISERVICE TELECOMMUNICATION NETWORK

O. Lemeshko, M. Yevdokymenko

In this article, the improved flow-based routing model in a multiservice telecommunication network is proposed. The structure of the mathematical flow-based routing model in a telecommunication network contains the conditions of flow conservation on individual routers and on the network as a whole; conditions for preventing overload of network communication links; lack of loops in the calculated routes; balanced load of available network resources; implement single-path or multi-path routing; protection conditions for network elements and its bandwidth. A feature of the proposed model is that it is based on updated conditions for ensuring quality of service for such indicators as bandwidth, average end-to-end delay, and packet loss probability. This is especially important for military networks that operate in conditions of limited network resources, which is caused by constant electronic and fire opposition of the enemy. When formulating and solving the optimization problem of routing, the proposed conditions for ensuring the quality of service acted as important restrictions, which were imposed on route variables. The analytical form of conditions allows their use in optimizing traffic management processes: routing, distribution and reservation of link and buffer resources. The required conditions for ensuring quality of service were obtained using the tensor approach to modeling multiservice telecommunication networks. Introduced geometric space and coordinate systems based on the features of the structural construction of the telecommunications network. The metric of the introduced space in the structure of the telecommunication network took into account the main functional parameters of communication links and characteristics of network traffic: bandwidth and congestion links, package queuing system, the number of flows and their intensity (packet rate). The results of the investigation showed that the proposed flow-based routing model adaptively responded to changes network congestion. Wherein, with increasing telecommunications network congestion, the number of involved routes gradually increased. Thus, the updated conditions for ensuring the quality of service were adequate in term of the implementation of both single-path and multipath routing, which contributed to a more efficient use of the available network resource.

Keywords: *telecommunication network, routing, model, route metrics, communication link, buffer resource, bandwidth, packet flows, tensor, space, coordinate system,*