

О. В. Лемешко, М. О. Євдокименко, О. С. Єременко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЧУТЛИВОГО ДО ЗАТРИМОК ТРАФІКА В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. У роботі запропоновано вдосконалену оптимізаційну модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. Новизною моделі є використання критерію оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією середньої міжкінцевої затримки пакетів. В основу зазначеного критерію оптимальності покладено математичний вираз, який дозволяє аналітично розрахувати середню міжкінцеву затримку з урахуванням характеристик мережного трафіка, типів дисциплін обслуговування пакетів на маршрутизаторах інфокомунікаційної мережі, пропускних здатностей каналів зв'язку. Також отримано умови забезпечення якості обслуговування за середньою міжкінцевою затримкою пакетів для будь-якого виду трафіка в умовах реалізації як одношляхової, так і багатшляхової маршрутизації. Отримати зазначені результати вдалося на підставі тензорного моделювання інфокомунікаційної мережі, коли тензори основних QoS-показників та метричні тензори розглядалися у двох системах координат: гілок мережі та незалежних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Дослідження та порівняльний аналіз з іншими маршрутними рішеннями підтвердили більш високу ефективність удосконаленої моделі за показником середньої міжкінцевої затримки пакетів, що є важливим для чутливого до затримок трафіка, особливо в умовах високих навантажень на інфокомунікаційну мережу.

Ключові слова: інфокомунікаційна мережа, пакет, трафік, потік, маршрутизація, тензор, система координат, модель, затримка, канал зв'язку, пропускна здатність.

Вступ

Постановка проблеми. Відмінною рисою сучасного інформаційного суспільства є постійне зростання об'єму та різноманітності даних, які циркулюють між споживачами інформації. У зв'язку з впровадженням нових сервісів та інформаційних технологій, наприклад, інтернету речей (Internet of things, IoT), машинної взаємодії (Machine-to-Machine, M2M) тощо, висуваються все більш високі вимоги до інфокомунікаційних систем і мереж, які складають матеріальну основу єдиного інформаційного простору [1, 2].

Як правило, вимоги споживачів інформації до інфокомунікаційних мереж (ІКМ) стосуються підтримки мобільності та безпеки сервісів, а також забезпечення заданого рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS). При цьому трафік різних мережних додатків по-різному чутливий до того чи іншого QoS-показника (табл. 1).

Таблиця 1 – Чутливість трафіка різних мережних додатків до значень QoS-показників

Додаток	Надійність	Середня затримка	Пропускна здатність
Електронна пошта	Висока	Низька	Низька
Передача файлів	Висока	Низька	Середня
Web доступ	Висока	Середня	Середня
Аудіо за вимогою	Низька	Низька	Середня
Відео за вимогою	Низька	Висока	Висока
Телефонія	Низька	Висока	Низька
Відеоконференція	Низька	Висока	Висока

У свою чергу, все більше інфокомунікаційних послуг є чутливими до затримок пакетів. У зв'язку з

чим, до показника міжкінцевої затримки пакетів висуваються спеціальні вимоги з боку мережних додатків (табл. 2). Крім того, в мережній термінології широко використовується поняття Delay-Sensitive Networks (DSN) – мережі, чутливі до затримок [3-12].

Для повноцінного функціонування DSN повинні використовуватись системні рішення щодо забезпечення заданих значень середньої міжкінцевої затримки пакетів (СМЗП). До них, перш за все, варто віднести механізми управління чергами (scheduling), розподілу каналного ресурсу (bandwidth allocation), профілювання трафіка (shaping/policing) та протоколи резервування ресурсів (RSVP) [6, 8-13].

Таблиця 2 – Вимоги мережних додатків щодо максимально допустимої міжкінцевої затримки пакетів

Додаток	Максимально допустима міжкінцева затримка пакетів
IPTV	100 мс
Відео за вимогою	50 мс
VoIP	150 мс
Відеоконференція	150 мс
Мережні ігри	50 мс
IoT	100 мс

Окремо значна роль відводиться протоколам маршрутизації, що відповідають за визначення шляхів, вздовж яких СМЗП не перевищувала б допустимих значень (табл. 2). Це особливо важливо, зважаючи на те, що затримка, як часовий QoS-показник, є адитивною метрикою. Тобто затримка пакетів вздовж шляху є сумою затримок у мережних елементах (каналах і маршрутизаторах), які складають обраний шлях [13]. Крім того, для підвищення надійності QoS-рішень використовують протоколи відмовостійкої маршрутизації, які паралельно з розрахунком основного шляху визначають множину

резервних шляхів, які використовуються у випадку виходу з ладу елементів основного маршруту [14].

Варто зазначити, що перелічені технологічні засоби, механізми та протоколи мають носити теоретично обґрунтований характер, базуючись на адекватних математичних моделях та ефективних розрахункових методах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як на рівні теоретичних, так і технологічних рішень, знайшли своє застосування досить багато самих різноманітних підходів до розв'язання задач маршрутизації трафіка, чутливого до затримок пакетів, в ІКМ. Спільною рисою відомих протоколів маршрутизації, що застосовуються в існуючих IP та MPLS мережах, є використання маршрутних метрик, які так чи інакше пов'язані з затримками пакетів у каналах зв'язку та використовуються алгоритмами Дійкстри та Беллмана-Форда для визначення найкоротших шляхів [15, 16].

У протоколі RIP (Routing Information Protocol) метрикою шляху фактично виступає кількість переприйомів пакетів. Тобто, чим менша кількість маршрутизаторів у розрахованому шляху, тим нижчу затримку відчує пакет. Ця гіпотеза досить справедлива в негетерогенних мережах, в яких канали зв'язку мають приблизно однакову пропускну здатність. У протоколі OSPF (Open Shortest Path First) метрика каналу зв'язку обернено пропорційна до його пропускну здатності [17, 18]. Тому найкоротший шлях, який буде протокол OSPF, як правило, має максимально можливу пропускну здатність серед усіх доступних маршрутів, що позитивно впливає і на затримки пакетів уздовж цього шляху.

З погляду задачі, що вирішується, протокол IGRP (Interior Gateway Routing Protocol) є найбільш ефективним, так як використовує композитні маршрутні метрики, які одночасно з пропускну здатністю та завантаженістю каналів зв'язку, враховують номінальні значення затримки пакетів [17, 18]. На жаль, номінальне значення затримки чітко прив'язано до типу інтерфейсу та його номінальної пропускну здатності та практично не залежить від реальної затримки пакетів на цій ділянці мережі.

Перспективним напрямом покращення рівня затримок пакетів в ІКМ є реалізація вимог концепції Traffic Engineering (TE), направлених на забезпечення збалансованого завантаження каналів зв'язку. Це досягається, як показано в роботах [19, 20], шляхом мінімізації верхнього порогу завантаженості (коефіцієнту використання) каналів зв'язку. Подібне рішення орієнтоване на запобігання утворення в ІКМ так званих «вузьких місць», тобто перевантажених ділянок, затримки пакетів на яких можуть стрімко зростати, що дуже негативно впливає на загальний рівень QoS в мережі.

Проте найбільш ефективним варіантом забезпечення мінімальної або заданої середньої міжкінцевої затримки пакетів, є подальший розвиток оптимізаційного підходу до розв'язання задач маршрутизації, коли значення цього важливого QoS-показника в явному вигляді входить або до критерія оптимальності, або до умов-обмежень, що наклада-

ються на відповідні маршрутні змінні. Однак основною проблемою при цьому стає отримання в аналітичному вигляді виразу для розрахунку СМЗП, в якому б адекватно та взаємопов'язано враховувались як основні параметри ІКМ, так і характеристики мережного трафіка.

Як показав проведений аналіз [21-26], досить ефективним підходом до моделювання та оптимізації процесів маршрутизації в ІКМ є застосування тензорної методології досліджень. Подібний підхід до моделювання систем з мережною структурою, а саме електричних кіл та електротехнічних пристроїв, запропонував американський вчений-інженер Г. Крон [28]. За останні 50 років його ідеї були використані, розвинені та адаптовані під системи різного функціонального призначення, в тому числі під проблематику інфокомунікацій [21-26].

З точки зору задачі маршрутизації, розв'язанню якої присвячене дане дослідження, у роботах [21-26] тензорна формалізація ІКМ дозволила отримати шукані вирази для розрахунку СМЗП та визначити умови забезпечення якості обслуговування як за зазначеним QoS-показником, так і за пропускну здатністю та ймовірністю втрат пакетів. Проте адекватність таких QoS-умов забезпечувалась лише у випадку обов'язкового використання всіх каналів зв'язку ІКМ, які враховувались при побудові тензорної моделі. Тому, як показано в роботах [21-26], область переважного використання раніше відомих тензорних рішень – це режим функціонування мережі, близький до перевантаження. Саме в цьому режимі варто використовувати багатозшляхову маршрутизацію із завантаженням всього доступного каналного ресурсу ІКМ. Тому пошук тензорних рішень задач QoS-маршрутизації чутливого до затримок пакетів трафіка, направлених на розширення області застосування їхнього ефективного використання, є актуальною науковою та прикладною задачею.

Метою статті є розробка оптимізаційної моделі маршрутизації трафіка, чутливого до затримок, в інфокомунікаційних мережах.

Основна частина

1. Тензорний опис інфокомунікаційної мережі. Нехай структура ІКМ описується одновимірною мережею $S = (U, V)$, де $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ – множина вузлів, які моделюють маршрутизатори; m – загальна кількість вузлів у S ; $V = \{v_z, z = \overline{1, n}\}$ – множина гілок мережі, які моделюють канали зв'язку ІКМ; n – загальна кількість гілок у S .

Полюси мережі S моделюють маршрутизатори, через які той чи інший потік пакетів надходить та вибуває із ІКМ. Введемо наступні позначення: $\kappa(S)$ – кількість базисних міжполюсних шляхів в мережі S ; $\Theta(S)$ – число внутрішніх вузлових пар в мережі S , що включає в себе всі вузлові пари, крім полюсної.

У випадку моделювання зв'язної ІКМ одновимірною мережею S її структурні характеристики пов'язані між собою такими виразами:

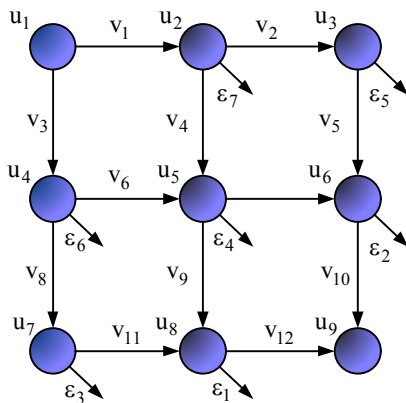
$$\kappa(S) = n - m + 2; \quad \vartheta(S) = m - 2. \quad (1)$$

Тоді на структурі ІКМ вводиться дискретний n -вимірний геометричний простір. У цьому просторі прийемо до уваги такі два типи ортогональних систем координат (СК) [21-26]:

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

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

Виконання умови $n = \kappa(S) + \vartheta(S)$ з урахуванням (1) і визначає ортогональність цих систем координат. На рис. 1 показано приклад визначення для мережі S базисних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, коли полюсами виступали вузли u_1 та u_9 , а основні структурні характеристики приймали такі значення: $n = 12$, $\kappa(S) = 5$, $\vartheta(S) = 7$.



- $\gamma_1 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_3 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9$
- $\gamma_2 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_7 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9$
- $\gamma_3 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9$
- $\gamma_4 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9$
- $\gamma_5 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9$

Рис. 1. Приклад моделювання ІКМ одновимірною мережею з визначенням базисних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар

З метою отримання для кожного окремого потоку пакетів аналітичного виразу для розрахунку СМЗП у введеному n -вимірному просторі інфокомунікаційна мережа бути описуватись за допомогою змішаного двовалентного тензора [21-26]:

$$Q = T \otimes A, \quad (2)$$

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

Для зручності вираз (2) доцільно представляти також в індексній формі:

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

де τ_j – середня затримка пакетів уздовж j -го координатного шляху (c); λ^i – середня інтенсивність потоку пакетів, які передаються уздовж i -го координатного шляху ($1/c$). Компоненти тензора Q (2) пов'язані між собою за допомогою відповідних метричних тензорів [21-26]:

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

де E – двічі коваріантний метричний тензор з координатами e_{ji} ; G – двічі контраваріантний метричний тензор з координатами g^{ij} .

Тензорні рівняння (4) у введених системах координат приймають відповідну векторно-матричну форму. Так у системі координат гілок мережі тензорні рівняння (4) набудуть такого вигляду:

$$T_v = E_v \Lambda_v \quad \text{та} \quad \Lambda_v = G_v T_v, \quad (5)$$

де Λ_v та T_v – відповідно проєкції тензорів Λ та T в СК гілок, які представлені n -вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів у каналах зв'язку ІКМ; $E_v = \|e_{ij}^v\|$ – представлена діагональною $n \times n$ -матрицею проєкція двічі коваріантного метричного тензора E в СК гілок; $G_v = \|g_{ij}^v\|$ – представлена діагональною $n \times n$ -матрицею проєкція двічі контраваріантного метричного тензора G . При цьому має місце таке правило:

$$E_v = [G_v]^{-1}, \quad (6)$$

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

У базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар мережі тензорні рівняння (4) матимуть такий вигляд:

$$T_{\gamma\varepsilon} = E_{\gamma\varepsilon} \Lambda_{\gamma\varepsilon} \quad \text{та} \quad \Lambda_{\gamma\varepsilon} = G_{\gamma\varepsilon} T_{\gamma\varepsilon}, \quad (7)$$

де $\Lambda_{\gamma\varepsilon}$ та $T_{\gamma\varepsilon}$ – проєкції 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 проєкція двічі коваріантного метричного тензора E в СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар; $G_{\gamma\varepsilon} = \|g_{ij}^{\gamma\varepsilon}\|$ – представлена діагональною $n \times n$ -матрицею проєкція двічі контраваріантного метричного тензора G в цій же СК.

По аналогії з (6) справедливим є правило:

$$E_{\gamma\varepsilon} = [G_{\gamma\varepsilon}]^{-1}. \quad (8)$$

Проєкції тензорів у різних системах координат пов'язані між собою лінійними законами перетворення [27]. Тоді перетворення координат проєкції коваріантного тензора T при зміні СК здійснюється наступним чином:

$$T_v = A_{\gamma\epsilon}^v T_{\gamma\epsilon}, \quad (9)$$

де $A_{\gamma\epsilon}^v$ – $n \times n$ -матриця коваріантного перетворення.

Вектор $T_{\gamma\epsilon}$ має наступну структуру [21-26]:

$$T_{\gamma\epsilon} = \begin{bmatrix} T_\gamma \\ \dots \\ T_\epsilon \end{bmatrix}; \quad T_\gamma = \begin{bmatrix} \tau_1^\gamma \\ \vdots \\ \tau_j^\gamma \\ \vdots \\ \tau_k^\gamma \end{bmatrix}; \quad T_\epsilon = \begin{bmatrix} \tau_1^\epsilon \\ \vdots \\ \tau_p^\epsilon \\ \vdots \\ \tau_9^\epsilon \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де T_γ – k -вимірний вектор середніх затримок пакетів уздовж базисних міжполюсних шляхів мережі; T_ϵ – 9 -вимірний вектор середніх затримок пакетів між вузлами, які утворюють внутрішні вузлові пари; τ_j^γ – середня затримка пакетів уздовж j -го базисного міжполюсного шляху (γ_j); τ_p^ϵ – середня затримка пакетів між вузлами, які утворюють p -ту внутрішню вузлову пару (ϵ_p).

Закон контраваріантного координатного перетворення при зміні розглянутих СК описується не-сингулярною $n \times n$ -матрицею $C_{\gamma\epsilon}^v$ [21-26]:

$$\Lambda_v = C_{\gamma\epsilon}^v \Lambda_{\gamma\epsilon}, \quad (11)$$

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

$$\Lambda_{\gamma\epsilon} = \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ \dots \\ \Lambda_\epsilon \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\gamma = \begin{bmatrix} \lambda_\gamma^1 \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^j \\ \vdots \\ \lambda_\gamma^k \end{bmatrix}; \quad \Lambda_\epsilon = \begin{bmatrix} \lambda_\epsilon^1 \\ \vdots \\ \lambda_\epsilon^p \\ \vdots \\ \lambda_\epsilon^9 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де Λ_γ – k -вимірний вектор інтенсивностей потоку уздовж базисних міжполюсних шляхів мережі; Λ_ϵ – 9 -вимірний вектор інтенсивностей потоку між вузлами, які утворюють внутрішні вузлові пари; λ_γ^j – інтенсивність потоку уздовж j -го базисного міжполюсного шляху (γ_j); $\lambda_\epsilon^p(t)$ – інтенсивність потоку, що надходить у мережу і виходить з мережі через вузли, які створюють p -ту внутрішню вузлову пару (ϵ_p).

Матриці ко- та контраваріантного перетворення координат при зміні зазначених базисів пов'язані між собою умовами ортогональності

$$C_{\gamma\epsilon}^v (A_{\gamma\epsilon}^v)^t = I, \quad (13)$$

де I – одинична $n \times n$ -матриця; $[\cdot]^t$ – операція

транспонування матриці. Правила формування матриць коваріантного та контраваріантного перетворення координат введених тензорів при зміні описаних СК детально описані у роботах [21-25].

Метричні властивості геометричного простору, який введено на структурі ІКМ, у загальному випадку залежать від характеристик мережного трафіка та параметрів інтерфейсів маршрутизаторів. Як приклад розглянемо варіант, коли функціонування інтерфейсів маршрутизаторів ІКМ моделюється системою масового обслуговування (СМО) М/М/1. Тоді середню затримку пакетів в i -му каналі зв'язку ІКМ, яка є i -ю координатою вектору T_v , можна розрахувати за допомогою формули [21-23, 25]:

$$\tau_i = \frac{1}{\phi_i - \lambda_i}, \quad (14)$$

де ϕ_i – пропускна здатність i -го каналу зв'язку; λ_i – сумарна інтенсивність всіх потоків пакетів, що протікають в i -му каналі зв'язку ІКМ ($i = \overline{1, n}$).

Узагальнення виразів (14) на всю множину каналів зв'язку та їхнє приведення до векторно-матричного виду (5), дозволяє отримати координати діагональної матриці G_v [21-23, 25]:

$$g_v^{ii} = \lambda_v^i (\phi_i - \lambda_i), \quad (15)$$

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

2. Методика розрахунку середньої міжкінцевої затримки пакетів з використанням тензорної моделі ІКМ. У межах подальшого дослідження варто врахувати, що середня міжкінцева затримка пакетів, які передаються між заданою парою маршрутизаторів за допомогою множини маршрутів P , розраховується за такою формулою

$$\tau_{MP} = \sum_{p=1}^{|P|} x_p \tau_p, \quad (16)$$

де $x_p = \lambda_p / \lambda^{(sum)}$ – доля потоку пакетів, які передаються до маршрутизатора-отримувача за допомогою p -го шляху; $\lambda^{(sum)}$ – середня інтенсивність потоку пакетів (1/с) на вході ІКМ; λ_p – інтенсивність потоку пакетів (1/с), які передаються до маршрутизатора-отримувача за допомогою p -го шляху; τ_p – середня затримка пакетів, які передаються уздовж p -го шляху в ІКМ; $|P|$ – загальна кількість доступних для маршрутизації шляхів між заданою парою маршрутизаторів.

Згідно з виразами (7), (8), (11) можна встановити закон перетворення проекцій двічі коваріантного тензора E при переході від базису гілок до базису міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар:

$$E_{\gamma\epsilon} = (C_{\gamma\epsilon}^v)^t E_v C_{\gamma\epsilon}^v. \quad (17)$$

Тоді з урахуванням (10) і (12) рівняння (7) можна представити у такій декомпозиційній формі:

$$\begin{bmatrix} T_\gamma \\ \dots \\ T_\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \\ \dots & & \dots \\ E_{\gamma\varepsilon}^{(3)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ \dots \\ \Lambda_\varepsilon \end{bmatrix} \quad (18)$$

при
$$\begin{bmatrix} E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \\ \dots & & \dots \\ E_{\gamma\varepsilon}^{(3)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \end{bmatrix} = E_{\gamma\varepsilon},$$

де $E_{\gamma\varepsilon}^{(1)}$ – квадратна підматриця розміру $\kappa \times \kappa$; $E_{\gamma\varepsilon}^{(2)}$ – квадратна підматриця розміру $\vartheta \times \vartheta$; $E_{\gamma\varepsilon}^{(3)}$ – підматриця розміру $\kappa \times \vartheta$; $E_{\gamma\varepsilon}^{(4)}$ – підматриця розміру $\vartheta \times \kappa$. З форми (18) можна отримати вираз

$$T_\gamma = E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma + E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \Lambda_\varepsilon. \quad (19)$$

Зважаючи на те, що прийнятий до розгляду потік пакетів може відбуватися лише через полюси мережі S , то в (19) $\Lambda_\varepsilon = 0$. Тоді для уточнення загальної форми виразу (16) спочатку помножимо ліву та праву частини формули (19) на Λ_γ^t , а потім поділимо їх же на $\lambda^{(sum)}$. У результаті проведених перетворень стане справедливою наступна рівність

$$\tau_{MP} = \frac{\Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma}{\lambda^{(sum)}}, \quad (20)$$

яка й визначає шукану формулу для розрахунку СМЗП в ІКМ.

При розв'язанні оптимізаційних задач маршрутизації чутливого до затримок трафіка формулу (20) доцільно використовувати, наприклад, як цільову функцію, що мінімізується. З іншого боку, якщо для значень СМЗП зазначаються певні норми (допуски), то вираз (20) може стати частиною QoS-умов:

$$\frac{\Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma}{\lambda^{(sum)}} \leq \tau_{(don)}, \quad (21)$$

де $\tau_{(don)}$ – максимально допустиме значення СМЗП для обраного потоку пакетів (табл. 2).

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 різнорідних процесів управління трафіком: маршрутизації, розподілу та резервування каналних і буферних ресурсів.

3. Потокова модель маршрутизації в інфокомунікаційній мережі. Потокова модель маршрутизації в ІКМ, яка підлягала вдосконаленню, описана в роботах [19, 20]. В її межах структура ІКМ описується орієнтованим графом $\Gamma = (U, W)$, де

$U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ – це введена у першому розділі множина вершин (вузлів), що моделюють маршрутизатори мережі, а $W = \{w_{i,j}, i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина дуг графа Γ , в якій кожна дуга $w_{i,j}$ моделює канал зв'язку, що з'єднує i -й та j -й маршрутизатори. Позначимо через $\varphi_{i,j}$ пропускну здатність (1/с) каналу $w_{i,j}$. Таким чином, потокова модель маршрутизації використовує не наскрізну нумерацію каналів зв'язку (як у попередніх розділах), а подвійну, тобто за номерами суміжних маршрутизаторів. Кожній гілці v_z мережі S можна поставити в однозначну відповідність дугу $w_{i,j}$ графа Γ .

Варто врахувати, що в ІКМ одночасно циркулює множина потоків пакетів K . Тоді в процесі розв'язання задач маршрутизації в ІКМ необхідно визначити множину маршрутних змінних $x_{i,j}^k$, кожна з яких кількісно характеризує долю k -го потоку пакетів, який протікає в каналі $w_{i,j}$. Залежно від типу стратегії маршрутизації, яка реалізується в ІКМ, на маршрутні змінні накладаються такі обмеження:

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad (22)$$

при реалізації одношляхової маршрутизації або

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1 \quad (23)$$

при використанні багатошляхової маршрутизації:

Умови збереження потоку на маршрутизаторах ІКМ мають вигляд [19, 20]:

$$\begin{cases} \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = 1, & k \in K, u_i = s_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = 0, & k \in K, u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = -1, & k \in K, u_i = d_k, \end{cases} \quad (24)$$

де s_k – маршрутизатор-джерело (відправник), d_k – маршрутизатор-отримувач пакетів k -го потоку.

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

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(sum)} x_{i,j}^k < \varphi_{i,j}, \quad (25)$$

де $\lambda_k^{(sum)}$ – середня інтенсивність k -го потоку пакетів (1/с) на вході в ІКМ.

QoS-умови (21) можуть виступати як додаткові обмеження, що накладаються на маршрутні змінні $x_{i,j}^k$, оскільки проєкції метричних тензорів E та G залежать від значень цих змінних:

$$\lambda_z = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \lambda_v^z = \lambda_k^z x_{i,j}^k. \quad (26)$$

Вирази (26) визначають інтенсивності агрегованого потоку (λ_z) та кожного k -го потоку окремо в одному й тому ж каналі зв'язку ІКМ, який у межах наскрізної нумерації моделюється гілкою v_z , а при подвійній нумерації – дугою $w_{i,j}$.

4. Порівняльний аналіз рішень задач маршрутизації чутливого до затримок пакетів трафіка в інфокомунікаційній мережі. З метою оцінки переваг використання виразу (20) для розрахунку СМЗП при розв'язанні задач маршрутизації чутливого до затримок трафіка було проведено дослідження отриманого рішення та його порівняльний аналіз з відомими маршрутними рішеннями. Запропоноване рішення задачі QoS-маршрутизації (model 1) базувалось на результатах розв'язання оптимізаційної задачі з критерієм оптимальності, який пов'язаний з мінімізацією виразу (20) при наявності обмежень (23)-(25).

Друга модель маршрутизації (model 2), яка використовувалась у процесі порівняльного аналізу, базувалась на застосуванні обмежень (23)-(25) та маршрутних метрик у квадратичній цільовій функції, яка підлягала мінімізації,

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x \left(\lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^k \right)^2, \quad (27)$$

де $h_{i,j}^x = 10^7 / \varphi_{i,j}$ – маршрутна метрика каналу зв'язку $w_{i,j}$, аналогічна до метрик протоколів EIGRP та OSPF [17, 18].

Третє рішення (model 3) представлено моделлю маршрутизації потоків пакетів відповідно до вимог концепції Traffic Engineering [19, 20]. В межах цієї моделі використовувався критерій оптимальності

$$\min_{x, \alpha} \alpha, \quad (28)$$

де α – верхній поріг завантаженості каналів зв'язку ІКМ, який відповідав таким обмеженням

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad (29)$$

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^k \leq \alpha \varphi_{i,j}. \quad (30)$$

У третій моделі обмеженнями також виступали вирази (23) та (24), а обмеження (30) вводилось замість виразу (25).

Вихідними даними для дослідження виступала структура ІКМ, яка представлена на рис. 2. На цьому рисунку у розривах каналів зв'язку вказані їхні пропускні здатності (1/с). Джерелом пакетів виступав перший маршрутизатор, а отримувачем – дев'ятий маршрутизатор.

Робота кожного каналу зв'язку моделювалась СМО М/М/1.

Для введених на рис. 1 систем координат матриця коваріантного координатного перетворення приймала такий вигляд:

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

У ході дослідження інтенсивність вхідного потоку змінювалась у діапазоні $\lambda^{(вим)} = 10 \div 430$ 1/с з тією метою, щоб $\tau_{MP} \leq 150$ мс (табл. 2). Ефективність порівнюваних маршрутних рішень (model 1 ÷ model 3) оцінювалась за показником СМЗП (16).

З точки зору описаної тензорної моделі (1)-(15) структура ІКМ (рис. 2) визначає 9-ти вимірний геометричний простір.

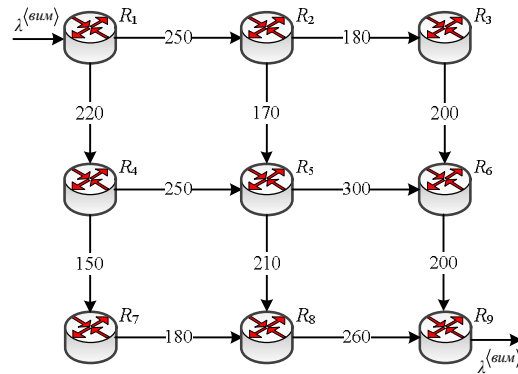


Рис. 2. Приклад структури ІКМ, яка підлягала дослідженню

На рис. 3 показано динаміку зміни СМЗП у залежності від навантаження на мережу ($\lambda^{(вим)}$). При невисокому навантаженні, коли $\lambda^{(вим)} \leq 300$ 1/с, всі три моделі забезпечували значення τ_{MP} , яке не перевищувало 50 мс.

З подальшим зростанням навантаження кращу ефективність постійно забезпечувала запропонована у роботі модель (model 1). Як показано на рис. 4, вигреш за СМЗП у порівнянні з моделлю на основі маршрутних метрик (model 2) складав від 3 до 50%, а при критичному навантаженні ($\lambda^{(вим)} \geq 410$ 1/с) – до 100% (крива «вигреш 1-2»). У порівнянні з моделлю маршрутизації на принципах ТЕ (model 3) вигреш за СМЗП складав від 11 до 30% (крива «вигреш 1-3» на рис. 4). Подібний вигреш запропонована модель маршрутизації змогла забезпечити завдяки використанню критерію оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією виразу (20).

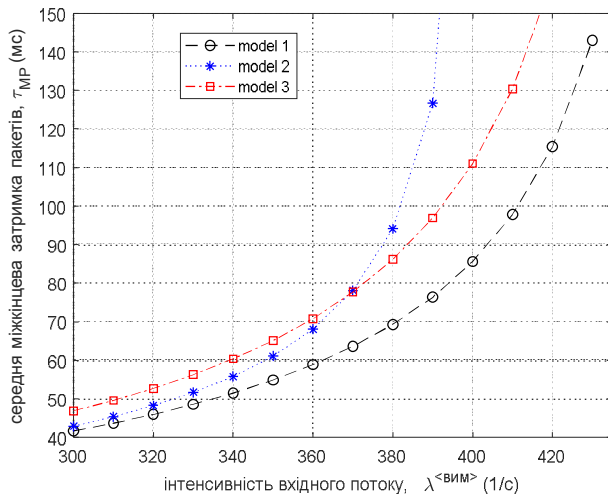


Рис. 3. Динаміка зміни СМЗП у залежності від навантаження на ІКМ

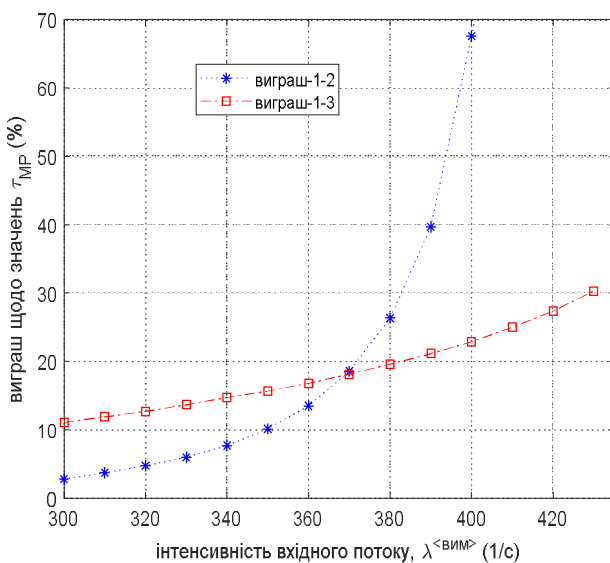


Рис. 4. Виграш за СМЗП від застосування запропонованої моделі маршрутизації в залежності від навантаження на мережу

Висновки

У роботі вдосконалено оптимізаційну модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в ІКМ, новизною якої є використання критерію оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією середньої міжкінцевої затримки пакетів. Отримати в аналітичному вигляді вираз для розрахунку СМЗП, що є основою зазначеного критерію, вдалось на підставі тензорного моделювання ІКМ (2), коли тензори основних QoS-показників та метричні тензори розглядались у двох системах координат: гілок мережі та незалежних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар.

Крім того, вираз (20) можна використовувати як частину QoS-умов (21), виконання яких дозволяє гарантувати наперед заданий рівень СМЗП для будь-якого виду трафіка в умовах реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

У виразі (20), який дозволяє аналітично розрахувати СМЗП, враховуються характеристики мережного трафіка, тип дисципліни обслуговування пакетів на маршрутизаторах ІКМ та пропускні здатності каналів зв'язку. Зміна цих даних не призводить до перегляду форми виразу (20), а лише вплине на значення проєкцій метричних тензорів (17).

Дослідження запропонованої оптимізаційної моделі маршрутизації та порівняльний аналіз з іншими маршрутними рішеннями підтвердили її більш високу ефективність за показником СМЗП, що є важливим для чутливого до затримок трафіка, особливо в умовах високих навантажень на ІКМ. Наприклад, у порівнянні з досить розповсюдженою моделлю маршрутизації, яка реалізована на принципах Traffic Engineering [19, 20], вдалось знизити СМЗП в області середніх і високих навантажень на мережу від 11 до 30%. Умовною платнею за отриманий виграш є ускладнення розрахунків, оскільки при визначенні маршрутних змінних (22), (23) необхідно розв'язувати оптимізаційну задачу нелінійного програмування, тому що використаний критерій оптимальності є нелінійним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Hanes, D., Salgueiro, G., Grossetete, P., Barton, R., Henry, J.: IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things. Cisco Press (2017)
- Peng, S.-L., Pal, S., Huang, L.: Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm. Springer, Cham (2020)
- Awan, I., Younas, M.: Towards QoS in Internet of Things for Delay Sensitive Information. Trends in Mobile Web Information Systems. 86–94 (2013). https://doi.org/10.1007/978-3-319-03737-0_10
- Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
- Gawas, M. A., Gudino, L. J., Anupama, K. R.: Congestion-Adaptive and Delay-Sensitive Multirate Routing Protocol in MANETs: A Cross-Layer Approach. Computer Networks and Communications, 1-13 (2019)
- Javed, U., Suchara, M., He, J., Rexford, J.: Multipath protocol for delay-sensitive traffic. In: 2009 First International Communication Systems and Networks and Workshops, pp. 1-8. IEEE (2009)
- Nasrallah, A., Thyagaturu, A. S., Alharbi, Z., Wang, C., Shao, X., Reisslein, M., & ElBakoury, H.: Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(1), 88-145. IEEE (2018)
- Goel, A., Ramakrishnan, K. G., Kataria, D., Logothetis, D.: Efficient computation of delay-sensitive routes from one source to all destinations. In: IEEE INFOCOM 2001 Conference on computer communications. Twentieth annual joint conference of the IEEE Computer and Communications Society (IEEE INFOCOM 2001), pp. 854-858. IEEE (2001)

9. Bicen, A., Ozan, V., Cagri, G., Ozgur, B. A.: Delay-sensitive and multimedia communication in cognitive radio sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 816-830 (2012)
10. Podlesny, M.: Networking Mechanisms for delay-sensitive applications. Dissertation of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (2009)
11. Khan, F. A., Noor, R. M., Mat Kiah, M. L., Noor, N. M., Altowaijri, S. M., Rahman, A. U.: QoS Enabled Layered Based Clustering for Reactive Flooding in the Internet of Things. *Symmetry*, 11(5), 634, 1-22 (2019) <https://doi.org/10.3390/sym11050634>
12. Yeremenko, O., Lemeshko, O.: QoS Ensuring over Probability of Timely Delivery in Multipath Routing. *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. Vol. 754. 244–254 (2019) https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_25
13. Вегешна, Ш.: Качество обслуживания в сетях IP. М.: Вильямс (2003)
14. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O., Shapovalova, A.: Investigation of Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. In: *Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020)*, pp. 1-12 (2020)
15. Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik* (1959)
16. Bellman, R.: On a routing problem. *Quarterly of applied mathematics*. Vol. 16, No. 1. 87-90. (1958)
17. Medhi, D., Ramasamy, K.: *Network Routing, Algorithms, Protocols, and Architectures*. Cambridge, Elsevier (2018)
18. Misra, S., Goswami, S.: *Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies*. Hoboken, Wiley (2017)
19. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
20. Wang, N., Ho, K., Pavlou, G., Howarth, M.: An overview of routing optimization for internet traffic engineering. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 10, No. 1. 36-56 (2008) <https://doi.org/10.1109/COMST.2008.4483669>.
21. Лемешко, А. В., Евсеєва, О. Ю.: Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базе межполюсных путей и внутренних разрезов. *Наукові записки УНДІЗ*. Вип. 1(13), 14-26 (2010)
22. Lemeshko, A. V., Evseeva, O. Yu., Garkusha, S. V.: Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greater Number of Indices. *Telecommunications and RadioEngineering*. Vol. 73, No. 15. 1339-1360 (2014) <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30>.
23. Лемешко, А. В., Еременко, А. С.: Динамическое представление тензорной модели многопутевой QoS-маршрутизации в нестационарном режиме работы сетевых интерфейсов. *Проблеми телекомунікацій*. № 1 (18). 3–21 (2016) URL: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/161_lemeshko_dynamic.pdf.
24. Lemeshko, O. V., Garkusha, S. V., Yeremenko, O. S., Hailan, A. M.: Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks. In: *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings*, Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, pp. 1–4 (2015)
25. Лемешко, А. В., Евсеєва, О. Ю.: Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базе межполюсных путей и внутренних разрезов. *Наукові записки УНДІЗ*. Вип. 1(13). 14-26 (2010)
26. Lemeshko O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Hailan, A.M.: Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. In: *Advances in Computer Science for Engineering and Education III (ICCSEEA 2020): The Third International Conference*, pp. 1-12. (2020)
27. Крон, Г.: Тензорный анализ сетей. Москва: Сов. Радио (1978)

Received (Надійшла) 12.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

Optimization routing model of delay-sensitive traffic in infocommunication networks

O. Lemeshko, M. Yevdokymenko, O. Yeremenko

Abstract. In this work, an improved optimization routing model of delay-sensitive traffic in infocommunication networks is proposed. The novelty of the model is the use of the optimality criterion associated with minimizing the average end-to-end packet delay. This optimality criterion is based on a mathematical expression that allows one to analytically calculate the average end-to-end delay taking into account the characteristics of network traffic, types of packet servicing disciplines on infocommunication network routers, and communication link bandwidths. The conditions for ensuring the Quality of Service in terms of the average end-to-end packet delay for any type of traffic under the conditions of implementing both single path and multipath routing has been obtained. These results were achieved based on tensor modeling of the infocommunication network when tensors of the main QoS indicators and metric tensors were considered in two coordinate systems: network edges, as well as independent interpolator paths and internal node pairs. The study and comparative analysis with other routing solutions confirmed the higher efficiency of the improved model in terms of the average end-to-end packet delay, which is important for delay-sensitive traffic, especially in conditions of high loads on infocommunication networks.

Keywords: infocommunication network, packet, traffic, flow, routing, tensor, coordinate system, model, delay, communication link, bandwidth.