

УДК 621.391

О.В. Лемешко<sup>1</sup>, О.А. Дробот<sup>1</sup>, Д.В. Симоненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

## РЕЗУЛЬТАТИ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПОТОКОВИХ МОДЕЛЕЙ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

*Наведено результати порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації з метриками різних мережних протоколів за часовими та швидкісними показниками якості обслуговування.*

*телекомунікаційна мережа, математична модель, багатошляхова маршрутизація, якість обслуговування, середня затримка, трафік*

### Вступ

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Незважаючи на широке поширення графових (графокомбінаторних) моделей маршрутизації [1, 2], які покладено в основу більшості існуючих протоколів – RIP (Routing Internet Protocol), IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), EIGRP (Extended IGRP), IS-IS (Intermediate System - to - Intermediate System), OSPF (Open Shortest Path First), PNNI (Private Network - to - Network Interface), все більше затребувані саме поточкові моделі маршрутизації, які, з одного боку, враховують поточковий характер сучасного, переважно мультимедійного трафіка (відео, мова й ін.), а з іншого боку, більш адаптовані під вирішення завдань балансування навантаження й забезпечення якості обслуговування в мультисервісних телекомунікаційних мережах (ТКМ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** дозволяє зробити висновок про те, що до теперішнього часу запропонована значна низка підходів до поточкового моделювання задач маршрутизації в рамках існуючих і перспективних телекомунікаційних технологій [3 – 6]. Залежно від повноти обліку особливостей структурно-функціональної побудови й функціонування телекомунікаційної мережі на виході тієї або іншої математичної моделі маршрутизації, як правило, формулюється оптимізаційна задача,

тому що в загальному випадку розрахувати шуканий маршрут (множину маршрутів) можна декількома способами. Для розв'язання сформульованих таким чином оптимізаційних задач можуть використатися різні засоби: для графових моделей – комбінаторні алгоритми Дійкстри (OSPF, IS-IS, PNNI), Беллмана-Форда (RIP, IGRP, EGRP), Флойда-Уоршела [3, 6], а для поточкових моделей – методи математичного програмування або оптимального управління [4, 5].

Для кожної з поточкових моделей і відповідних їй алгоритмів та методів розв'язання задач маршрутизації характерні свої особливості, умови й область застосування. На жаль, у раніше відомих роботах, присвячених аналізу різних моделей маршрутизації [4, 6 – 8], отримані досить загальні й переважно якісні висновки, за якими досить важко, а іноді й зовсім неможливо з'ясувати їх основні переваги, недоліки, а також кращі варіанти використання.

**Формулювання мети статті.** Метою даної роботи є одержання кількісних результатів порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації для різних мережних топологій і характеристик трафіків користувачів ТКМ. Проведення порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації в аспектах балансування навантаження й забезпечення гарантованої якості обслуговування дозволить більш точно визначитися з напрямками їх подальшого застосування.

## Загальна характеристика порівнюваних моделей маршрутизації

У роботі в ході досліджень порівняльному аналізу піддавалися такі основні п'ять поточкових моделей маршрутизації:

1. М-1. Модель одношляхової маршрутизації, яка ґрунтується на пошуку найкоротшого шляху, який містить мінімальну кількість переприйомів (hop), як у протоколі RIP v1 [10].

2. М-2. Модель багатошляхової маршрутизації (БШМ), у якій на відміну від моделі М-1 підтримується балансування навантаження за шляхами з рівною вартістю (довжиною). У цьому випадку розв'язання маршрутною задачі було зведено до розв'язання задачі лінійного програмування шляхом мінімізації цільової функції

$$f = c^t x, \quad (1)$$

де  $c$  – вектор вартісних (метричних) коефіцієнтів розмірності  $n$ , всі координати якого дорівнюють одиниці, тобто  $c_{i,j} = 1$  ( $i, j = \overline{1, m}$ ;  $i \neq j$ );  $n$  – кількість трактив передачі (ТП);  $m$  – кількість мережних вузлів у ТКС у ТКМ  $x$  – шуканий вектор, координата  $x_{i,j}$  якого моделює величину інтенсивності трафіка ( $1/c$ ) у тракті передачі ( $i, j$ ).

Відповідно до фізики розв'язуваної задачі на координати вектора  $x$  накладається система обмежень, що моделює умови збереження потоку в кожному з мережних вузлів  $i$  у ТКМ у цілому [4]:

$$\begin{cases} \sum_{j(i,j)} x_{i,j} - \sum_{j(j,i)} x_{j,i} = 0 & \text{для транзитних вузлів;} \\ \sum_{j(i,j)} x_{i,j} - \sum_{j(j,i)} x_{j,i} = r_{\text{вх}} & \text{для вузла-відправника;} \\ \sum_{j(i,j)} x_{i,j} - \sum_{j(j,i)} x_{j,i} = -r_{\text{вх}} & \text{для вузла-отримувача,} \end{cases} \quad (2)$$

де  $r_{\text{вх}}$  – інтенсивність трафіка на вході в мережу.

3. М-3. Модель БШМ із закладеною в основу метрикою протоколу IGRP і забезпеченням балансування навантаження за шляхами з нерівною вартістю (довжиною). Модель М-5 представлена виразами (1) – (3) з різницею лише в тому, що метрики трактив передачі в протоколі IGRP, яким відповідають координати вектора  $c$  у виразі (1), являють собою наведені значення пропускної здатності ТП [1]:

$$c_{i,j} = 10^7 / \varphi_{i,j} \quad (i, j = \overline{1, m}; i \neq j). \quad (3)$$

Крім того, з метою формалізації умов запобігання перевантаженням ТП поряд з виразом (2) вводяться додаткові обмеження вигляду

$$x_{i,j} \leq \varphi_{i,j} \quad (i, j = \overline{1, m}; i \neq j), \quad (4)$$

де  $\varphi_{i,j}$  – пропускна здатність тракту передачі ( $1/c$ ).

4. М-4. Модель БШМ, запропонована Галлагером [3], у рамках якої розв'язання маршрутною задачі зводиться до розв'язання задачі нелінійного про-

грамування із забезпеченням мінімуму такої цільової функції:

$$f = \max_{(i,j)} \{x_{ij} / \varphi_{ij}\}. \quad (5)$$

Використання виразу (5) гарантує мінімізацію максимального коефіцієнта використання всіх трактив передачі в ТКМ. Крім того, у процесі розв'язання необхідно виконувати умову збереження потоку

$$\gamma_{i,j} = r_{i,j} + \sum_{k \in M^i} \gamma_{k,j} \phi_{j,i}^k \quad \text{при} \quad \sum_{j \in M} \gamma_{i,j} \phi_{j,k}^i = x_{i,k}, \quad (6)$$

де  $M^i$  – множина сусідніх вузлів вузлу  $i$ ;  $r_{i,j}$  – інтенсивність вхідного потоку ( $1/c$ ), що надходить від користувачів на вузол  $i$  для вузла  $j$ ;  $\gamma_{i,j}$  – сума вхідного потоку й потоку, що надходить на вузол  $i$  від сусідніх вузлів для вузла  $j$ ;  $\phi_{j,k}^i$  – маршрутна змінна, тобто частина потоку  $\gamma_{i,j}$ , яку відправляє вузол  $i$  по тракту ( $i, k$ ).

На маршрутні змінні накладаються такі умови:

$$\phi_{j,k}^i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } i = j; \\ \geq 0, & \text{якщо } i \neq j, \end{cases} \quad \text{та} \quad \sum_{k \in M^i} \phi_{j,k}^i = 1 \quad (7)$$

Через обмежену пропускну здатність трактив передачі в моделі М-5, так як і в моделях М-3 і М-4, враховується обмеження (4).

5. М-5. Модель БШМ Галлагера (5) – (7), яка отримала розвиток у роботі [9] шляхом введення умов забезпечення гарантованої якості обслуговування за показниками швидкості передачі пакетів, їх середньої затримки, джитеру та ймовірності своєчасної доставки.

### Критерії порівняльного аналізу

При проведенні порівняльного аналізу досліджувалася якість розв'язання маршрутних задач на множині структур С-1 та С-2 (рис. 1), які відрізнялись розмірністю, пропускними здатностями трактив передачі й зв'язністю мережних вузлів.

Ефективність розв'язання задач маршрутизації оцінювалася за коефіцієнтом завантаження мережі ( $k_{\text{зав}}$ ), який характеризував якість балансування навантаження в мережі, та двома основними показниками якості обслуговування – середньою затримкою ( $\tau_{\text{сер}}$ ) та швидкістю передачі пакетів ( $r$ ). При моделюванні, наприклад, трактив передачі системою масового обслуговування М/М/1, затримка в довільному ТП ( $i, j$ ) розраховувалася за формулою [10]

$$\tau_{i,j} = 1 / (c_{i,j} - x_{i,j}).$$

Для наочності швидкість передачі даних ( $r$ ) нормувалася по відношенню до пропускної здатності мережі ( $\varphi$ ), тобто  $r_0 = r / \varphi$ .

Відповідно до структур ТКС (рис.1) кількість вузлів мережі варіювалося від 4 до 7; кількість трактив передачі – від 5 до 12; пропускні здатності трактив передачі ТКМ – від 500 до 900  $1/c$ . Інтенсивність

зовнішнього трафіка ( $\tau$ ) обмежувалася пропускною здатністю ТКМ, обумовленої пропускними здатностями трактів передачі.

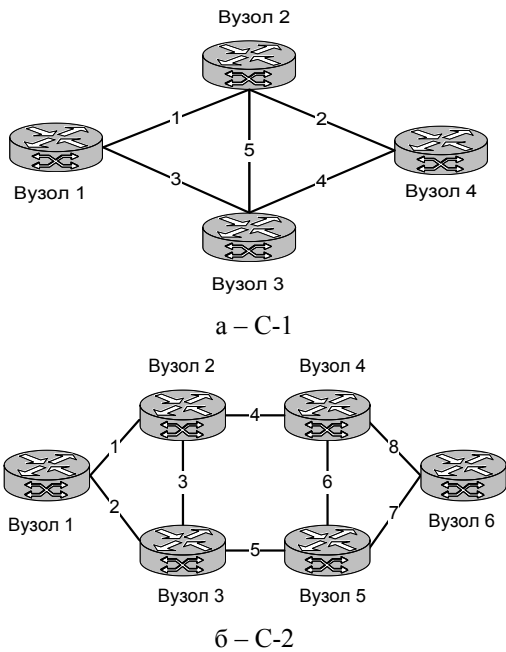


Рис. 1. Топології ТКМ, які досліджувалися

### Аналіз отриманих результатів

На підставі отриманих результатів моделювання, порівняння та кількісної оцінки ефективності розглянутих потокових моделей маршрутизації за обраними критеріями (рис. 2, 3) можна зробити такі висновки.

**По-перше**, модель одношляхової маршрутизації (М-1) та модель БШМ (М-2) з балансуванням навантаження за шляхами з рівною вартістю (довжиною) забезпечують необхідні показники якості обслуговування лише в області невисокого навантаження ( $\tau_0 \approx 0 \div 0,5$ ).

**По-друге**, потокова модель багатошляхової маршрутизації з метрикою протоколу IGRP (М-3) стабільно працює практично на всій ділянці абонентського навантаження. Ця модель з ростом навантаження на мережу забезпечує послідовне використання шляхів у порядку зростання їх пропускної здатності, тобто спочатку використовується один шлях з максимальною пропускною здатністю, якщо цей шлях перевантажується, то «включається» в роботу другий шлях з наступною за величиною пропускною здатністю (рис. 2, а). Ця процедура повторюється до використання всіх доступних шляхів між заданою парою вузлів мережі.

**По-третє**, модель Галлагера (М-4) забезпечує балансування навантаження одночасно за всіма доступними шляхами між заданою парою мережних вузлів. Ця модель сприяє ефективному функціонуванню ТКМ на всій області абонентського навантаження ( $\tau_0 \approx 0 \div 1$ ) та забезпечує кращі показники середньої затримки (у середньому в 1,3 – 2 рази),

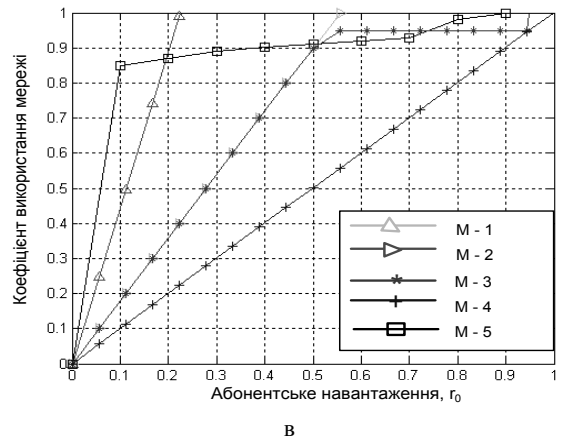
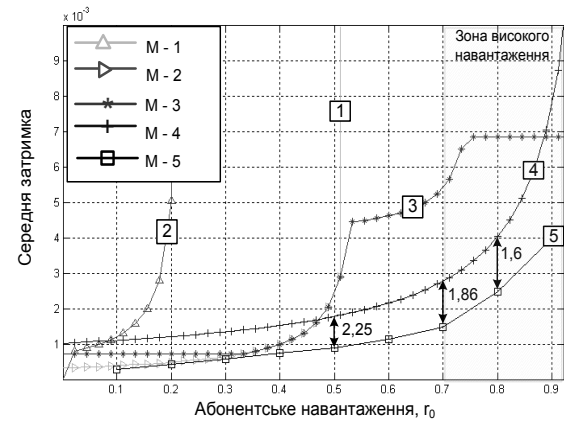
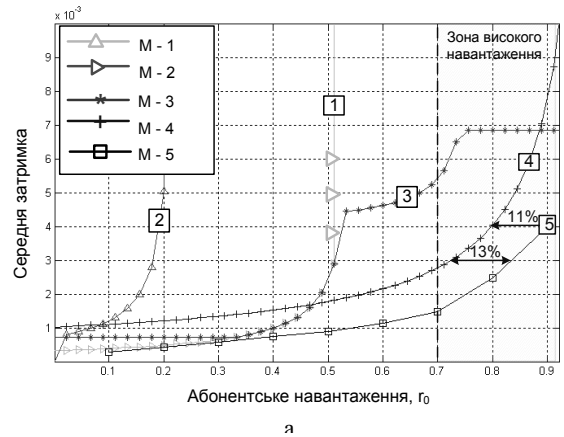
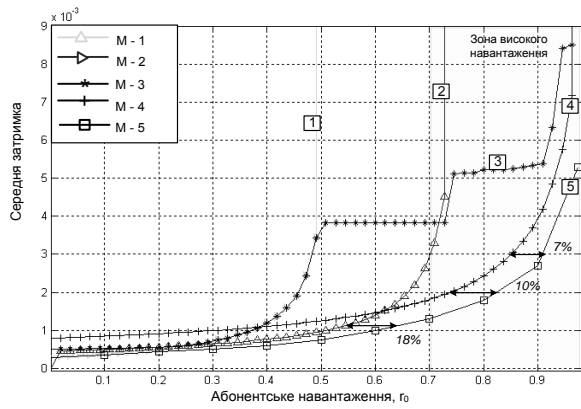


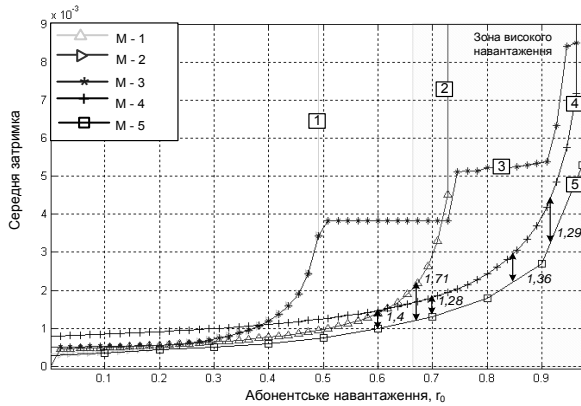
Рис. 2. Результати порівняльного аналізу моделей М-1 – М5 для структури С-1

швидкості передачі (до 30%) та коефіцієнта використання мережі (у середньому на 30-60%), ніж модель М-3 в області середнього та високого навантаження.

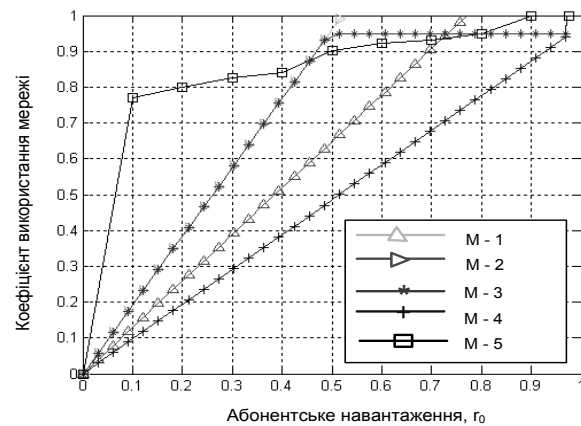
**По четверте**, модифікована модель Галагера, тобто модель із врахуванням умов забезпечення якості обслуговування (М-5), також здійснює балансування навантаження одночасно за всіма доступними шляхами між заданою парою мережних вузлів. Однак ця модель у порівнянні з моделлю попередньою М-4 забезпечує зниження середньої затримки доставки пакетів в 1,2 – 1,9 рази або збільшення швидкості їх передачі в середньому на 10 – 13% при зростанні коефіцієнта завантаження ТКМ у середньому на 18-22 % в області високого навантаження (рис. 3, в).



а



в



в

Рис. 3. Результати порівняльного аналізу моделей М-1 – М-5 для структури С-2

### Висновки

Як показали результати проведеного порівняльного аналізу різних потокових моделей маршрутизації (М1-М5), найбільш ефективними в рамках обраних критеріїв є моделі з балансуванням навантаження за шляхами з нерівною вартістю (довжиною). Причому в цих моделях БШМ важлива роль відводиться вибору метрики трактів передачі, від вигляду якої залежить стратегія (послідовна або паралельна) використання шляхів нерівної вартості.

Крім того, слід зазначити, що вдалий вибір метрики ТП є лише необхідною, але недостатньою умовою забезпечення більш високих показників якості обслуговування. Необхідно в рамках математичних моделей маршрутизації не тільки забезпечувати балансування навантаження з реалізацією багатошляхових стратегій маршрутизації, а й у явному вигляді враховувати умови забезпечення якості обслуговування (М-5) за тими чи іншими показниками [9]. Прикладом цьому є результати порівняння моделей М-4 та М-5, серед яких модель М-4 забезпечує більш якісне балансування навантаження (рис. 3, в), однак значення показників середньої затримки та швидкості передачі кращі в моделі М-5.

У подальшому при проведенні порівняльного аналізу різних моделей багатошляхової маршрутизації необхідно більше уваги звернути на дослідження впливу щодо якості розв'язання задач балансування та якості обслуговування не лише інтенсивності трафіка, але й інших його характеристик – розміру пакета пачковості та інших.

### Список літератури

1. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – С.-Пб.: BHV, 2002. – 512 с.
2. Руденко И. Маршрутизаторы CISCO для IP-сетей. – М.: КУДИС-ОБРАЗ, 2003. – 656 с.
3. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
4. Вишневикий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных систем. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 384 с.
6. Lee G. M. A survey of multipath routing for traffic engineering // Proc. of LNCS 3391. Springer-Verlag, 2005. – Vol. 4. – P. 635-661.
7. Дымарский Я.С., Нурмиева М. В. Оптимальное распределение ресурсов в сети с разнородными потоками // Вестник МАИСУ. – 2002. – № 6. – С. 31-35.
8. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J. A traffic engineering approach based on minimum-delay routing // Proc. of IEEE IC3N. Las Vegas, 2000. – P. 42-47.
9. Лемешко А.В., Дробот О.А. Модель многопутевой QoS-маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХТУРЭ, 2006. – Вып. 144. – С. 16-22.
10. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.

Надійшла до редколегії 9.01.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Поповський, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.