

УДК 621.391

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОТОКОВОЇ МОДЕЛІ БАГАТОАДРЕСНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ПРИНЦИПАХ ТЕХНОЛОГІЇ TRAFFIC ENGINEERING



[О.С. НЕВЗОРОВА](#), [Б. СЛЕЙМАН](#), [А. МЕРСНІ](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки



[В.М. СУХОТЕПЛИЙ](#)

Харківський національний університет повітряних сил імені Івана Кожедуба

Abstract – The paper proposes to improve the mathematical model of multicast routing with balanced use of network resource in accordance with the requirements of the concept of Traffic Engineering (TE). The model is based on the optimality criterion, which quantitatively equals the minimization of the utilization rate of the most downloaded network link. A research of the proposed improved model on the number of network structures was conducted. The research found that when using the optimization criterion of minimization of the utilization rate of the most loaded network link, inappropriately loaded links occur. This is caused by the fact that utilization coefficients of these links are not the highest in the network, and they are not critical to the value of the optimality criterion, and therefore the flow of packets in those links was not prohibited. To solve this problem in the work it is proposed to introduce two additional conditions into the model, the fulfillment of the first condition implies that the flow can come from no more than one adjacent node to an arbitrary node; and the second condition is that the flow of packets on the incoming interfaces of the transit node can only appear if its outgoing interfaces are used. Using the proposed conditions, it was possible to solve the problem of misuse of the links resource without reducing the efficiency of the calculation solutions. The use of an advanced model allows balanced use of the network resource, especially for the traffic structure, which consists of a large number of multicast flows with relatively low intensity compared to the bandwidth of the links.

Анотація – У роботі запропоновано вдосконалення математичної моделі багатоадресної маршрутизації зі збалансованим використанням каналного ресурсу відповідно до вимог концепції Traffic Engineering (TE). Модель базується на використанні критерію оптимальності, який кількісно відповідає мінімізації коефіцієнту використання найбільш завантаженого каналу зв'язку мережі. Було проведено дослідження запропонованої вдосконаленої моделі. У ході дослідження було виявлено, що при застосуванні TE-критерію оптимальності деякі канали можуть неадекватно включатись у дерево рішень. Це обумовлено тим, що коефіцієнти завантаженості цих каналів критично не впливали на значення критерію оптимальності, тому протікання потоку пакетів в цих каналах зв'язку не заборонялось. Для вирішення такої проблеми в роботі пропонується ввести в модель дві додаткові умови: виконання першої умови орієнтує на те, що до довільного вузла, крім джерела, потік може надходити не більше, ніж з одного суміжного вузла; а друга умова полягає в тому, що потік пакетів на вхідних інтерфейсах транзитного вузла може з'явитись лише за умови використання його вихідних інтерфейсів. З використанням запропонованих умов вдалося вирішити проблему нецільового використання каналного ресурсу без зниження ефективності розрахункових рішень. Застосування вдосконаленої моделі дозволяє збалансовано використовувати каналний ресурс мережі особливо для структури трафіку, який складається з великої множини багатоадресних потоків з відносно невисокою інтенсивністю порівняно з пропускною здатністю каналів зв'язку.

Вступ

Однією з основних тенденцій розвитку сучасних телекомунікаційних мереж (ТКМ) є розширення переліку послуг зв'язку, які надаються користувачам. При цьому з часом питома вага мультимедійних послуг постійно зростає, що вимагає безперервного вдосконалення технологічних засобів забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS), основними з яких є протоколи маршрутизації [1, 2]. Варто

зазначити, що для більшості мультимедійних застосунків, до яких можна віднести послуги IPTV, дистанційного навчання, on-line радіо, відео за запитом, відеоконференцзв'язку, доцільним є використання саме протоколів багатоадресної маршрутизації. Їх ефективна реалізація сприяє значній економії каналного ресурсу ТКМ на підставі зменшення навантаження, пов'язаного з мінімізацією дублювання контенту.

На цей час в ТКМ використовуються різноманітні протоколи багатоадресної маршрутизації, які відрізняються областю застосування. Так протокол Border Gateway Multicast Protocol (BGMP) відноситься до класу протоколів зовнішнього шлюзу (міждоменної маршрутизації). На рівні рішень внутрішнього шлюзу (внутрішньодоменної маршрутизації) використовуються протоколи DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol), MOSPF (Multicast Open Shortest Path First), PIM-DM (Protocol Independent Multicast – Dense Mode), CBT (Core-Based Trees), PIM-SM (Protocol Independent Multicast – Sparse Mode). При цьому перші три протоколи, які описані в RFC 1075 та 1584, доцільно використовувати в мережах з високою зв'язністю вузлів, а останні два – в мережах з розрідженою структурою. В свою чергу протоколи MoM (Mobile Multicast), MMA (Multicast by Multicast Agent), MobiCast та MRMP (Maximum-Residual Multicast Protocol) адаптовані під мережі, в яких вузли можуть бути рухомими об'єктами [2-4].

Проте перелічені протоколи мають одну спільну рису: за їхньою допомогою розраховується багатоадресний маршрут шляхом побудови Spanning Tree, тобто остового дерева, яке зв'язує всі вузли, що включені до багатоадресної групи. Характерною ознакою алгоритмів пошуку MST (Minimum Spanning Tree), до основних з яких варто віднести алгоритми Прима, Краскала та Борувка [5, 6], є прийнятна обчислювальна складність розрахунків. Вони практично ідеально підходять під технологічні рішення, які пов'язані з передачею окремих відносно невеликих за своїм об'ємом повідомлень, наприклад, оновлень маршрутних таблиць в протоколах RIPv2 або EIGRP [7]. Однак при наданні мультимедійних сервісів використання графових моделей та зазначених комбінаторних алгоритмів може призвести до зниження ефективності функціонування ТКМ через те, що вони не враховують в явному виді параметри досить інтенсивних мультимедійних потоків та пропускні здатності каналів зв'язку мережі, що може на практиці призвести до перевантаження мережі. У зв'язку з цим актуальним напрямком розвитку рішень щодо багатоадресної маршрутизації є використання саме поточкових моделей і методів, розробці та вдосконаленню яких присвячені, наприклад, такі роботи [8-14].

Мета даної роботи полягає в удосконаленні потокової моделі багатоадресної маршрутизації, представленої в роботах [12-14], на принципах технології Traffic Engineering, які пов'язані із забезпеченням збалансованої завантаженості каналів зв'язку та ТКМ взагалі, що, як відомо [15, 16], сприяє покращенню рівня якості обслуговування.

I. Математична модель багатоадресної маршрутизації

Нехай структура мережі описується графом $G = (R, E)$, в якому $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$ – це множина вершин, що моделюють маршрутизатори, а $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина дуг, що представляють канали зв'язку в мережі. Тоді $|E| = n$ визначає кількість каналів зв'язку в телекомунікаційній мережі. При цьому кожній дузі $E_{i,j} \in E$ ставиться у відповідність її пропусканна здатність $\varphi_{i,j}$.

Позначимо через K множину потоків, що циркулюють у мережі. Тоді для кожного k -го багатоадресного потоку відомі наступні вихідні дані: λ^k – середня пакетна швидкість (інтенсивність), яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с); s_k – вузол-відправник пакетів k -го потоку, а також множина вузлів-отримувачів

$$d_k^* = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^{m_k}\}, \quad (1)$$

де m_k – їхня загальна кількість.

Порядок багатоадресної маршрутизації в мережі визначають маршрутні змінні $x_{i,j}^k$, кожна з яких характеризує долю (частину) k -го потоку, що протікає в каналі зв'язку між i -м та j -м вузлами (маршрутизаторами) мережі. Виходячи з фізичного змісту введених маршрутних змінних на них накладаються умови виду

$$x_{i,j}^k \in \{0; 1\}, \quad (2)$$

що передбачає реалізацію одношляхової багатоадресної маршрутизації.

Для запобігання перевантаження каналів зв'язку мережі необхідно забезпечити виконання наступних умов:

$$\sum_{k \in K} \lambda^k x_{i,j}^k \leq \varphi_{i,j}, \quad E_{i,j} \in E, \quad (3)$$

число яких відповідає кількості каналів зв'язку в мережі.

При багатоадресній маршрутизації на маршрутні змінні (2) накладається ряд обмежень, пов'язаних з реалізацією умов збереження потоку в мережі [12-14]:

$$\sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k \geq 1 \quad \text{при } k \in K, \quad R_i = s_k, \quad (4)$$

а також

$$\sum_{i: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k = 1 \quad \text{при } k \in K; \quad R_j \in d_k^*. \quad (5)$$

Умова (4) вводиться лише для вузла-джерела пакетів k -го потоку для того, щоб потік від цього вузла був переданий хоча б одному суміжному вузлу. Виконання

умов (5) орієнтоване на забезпечення доставки пакетів k -го потоку на кожен вузол-отримувач. Важливо, щоб пакети згідно з фізикою процесу багатоадресної маршрутизації надходили на ці вузли лише від одного суміжного вузла.

Для кожного транзитного вузла $R_j \in R$, яким у даному випадку може бути довільний маршрутизатор, крім вузла-джерела, додатково вводяться наступні умови [12-14]:

$$\sum_{i: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k \geq x_{j,p}^k \quad \text{при } k \in K; R_j \notin s_k, \quad (6)$$

виконання яких робить можливим появу пакетів на будь-якому з вихідних від транзитного вузла інтерфейсів ($E_{j,p} \in E$) лише в тому випадку, коли цей потік надходить на цей вузол хоча б через один вхідний інтерфейс ($E_{i,j} \in E$).

Для попередження виникнення локальних циклів у розрахованих багатоадресних маршрутах у модель вводяться відповідні умови (за числом таких циклів)

$$\sum_{E_{i,j} \in E_\pi^i} x_{i,j}^k < |E_\pi^q|, \quad (7)$$

де E_π^q – множина дуг графа, які утворюють q -й цикл (π); $|E_\pi^q|$ – потужність множини E_π^q . Виконання умови (6) гарантує [12-14], що число задіяних у ході багатоадресної маршрутизації дуг, що складають той чи інший цикл, завжди менше загальної кількості дуг у цьому циклі.

В ході розрахунку шуканих маршрутних змінних як критерій оптимальності отриманих рішень може бути використано, наприклад, мінімум наступної цільової функції, що досить повно описано в роботі [12]:

$$\sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k \Rightarrow \min, \quad (8)$$

де $c_{i,j}^k$ – маршрутна метрика, яка характеризує основні параметри каналу зв'язку $E_{i,j} \in E$ та кількісно відображає умовну вартість його використання в багатоадресному шляху. Наприклад, якщо $c_{i,j}^k = 1$, то в мережі буде використовуватись метрика протоколу RIP (кількість переприйомів). При $c_{i,j}^k = 10^7 / \phi_{i,j}$ у мережі буде організовано маршрутизацію за аналогом метрики протоколів IGRP/EIGRP.

Використання критерія (8) з умовами (2)-(7) при розв'язанні задачі багатоадресної маршрутизації дає можливість сформулювати технологічну задачу в оптимізаційному вигляді. Лінійність критерію та обмежень дозволяє використовувати для отримання шуканих рішень досить ефективно з обчислювальної точки зору методи цілочисельного лінійного програмування або наближені евристичні методи.

II. Удосконалення математичної моделі багатоадресної маршрутизації на принципах технології Traffic Engineering

Застосування лінійного критерію (8) орієнтує на те, що в ході багатоадресної маршрутизації більш інтенсивно будуть завантажуватись канали зв'язку з найменшою маршрутною метрикою $c_{i,j}^k$, і лише після їх перевантаження будуть використовуватись канали з більш високою метрикою. Це не сприяє забезпеченню збалансованої завантаженості ТКМ і може призвести до перевантаження окремих каналів зв'язку при наявності недовантажених сегментів мережі. Тому для забезпечення збалансованого використання каналного ресурсу мережі відповідно до вимог концепції Traffic Engineering пропонується змінити форму запису умов запобігання перевантаження каналів зв'язку (3) на вирази вигляду [15, 16]

$$\sum_{k \in K} \lambda^k x_{i,j}^k \leq \alpha \varphi_{i,j}, \quad E_{i,j} \in E, \quad (9)$$

де α – додатково введена керуюча змінна, яка характеризує верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі. На неї відповідно до її фізичного змісту накладається таке обмеження:

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (10)$$

Тобі оновленим критерієм оптимальності буде виступати така умова [15, 16]:

$$\alpha \rightarrow \min. \quad (11)$$

Використання критерію (11) орієнтує на те, що результуюче мінімальне значення змінної α , відповідно до умов (9) та (10), кількісно характеризує коефіцієнт використання найбільш завантаженого каналу.

III. Дослідження вдосконаленої математичної моделі багатоадресної маршрутизації в ТКМ

Проведено дослідження вдосконаленої моделі багатоадресної маршрутизації з використанням критерію оптимальності (11) на ряді мережних структур, які відрізнялись кількістю маршрутизаторів і каналів зв'язку. Методику проведених досліджень продемонструємо на наступному числовому прикладі. Розглядався випадок телекомунікаційної мережі, структура якої наведена на рис. 1. Мережа складалася з шести маршрутизаторів ($R_1 \div R_6$) та десяти каналів зв'язку, у розривах яких вказана їхня пропускна здатність (1/с).

Розглядався багатопотоковий випадок, коли в мережі циркулювало, наприклад, одночасно два багатоадресні потоки. Джерелом для обох потоків виступав маршрутизатор R_1 , а отримувачі визначались наступним чином: $d_1^* = \{R_3, R_4, R_6\}$ і $d_2^* = \{R_2, R_6\}$.

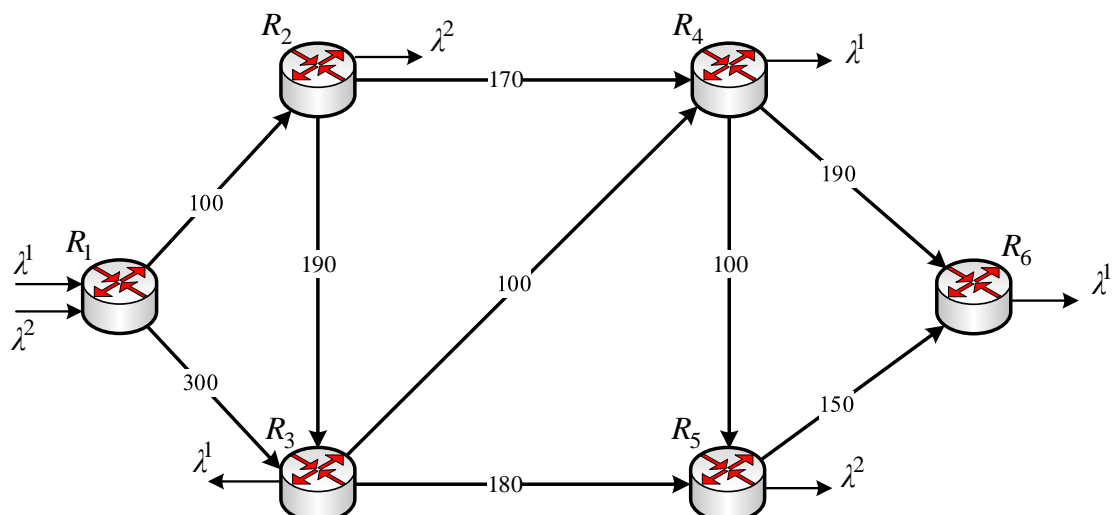


Рис. 1. Структура телекомунікаційної мережі, яка досліджувалась

Інтенсивності цих потоків змінювались від 10 до 90 1/с. Тоді на рис. 2, наприклад, наведено дерево маршрутів окремо для першого багатоадресного потоку пакетів при максимально допустимій його інтенсивності ($\lambda^1 = 90$ 1/с). У цьому випадку (рис. 2) в розривах каналів зв'язку показано дріб, де в чисельнику наведено інтенсивність багатоадресного потоку пакетів, а в знаменнику – пропускна здатність даного каналу зв'язку.

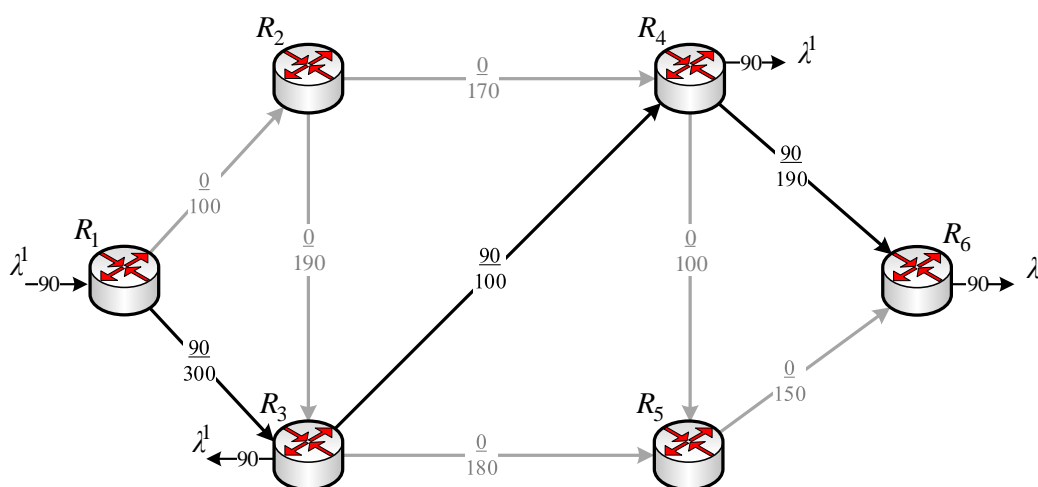


Рис. 2. Дерево маршрутів для першого багатоадресного потоку пакетів

На рис. 3 наведено рішення маршрутної задачі для другого багатоадресного потоку при $\lambda^2 = 90$ 1/с. Позначення на рис. 3 були аналогічні позначенням, введеним на рис. 2.

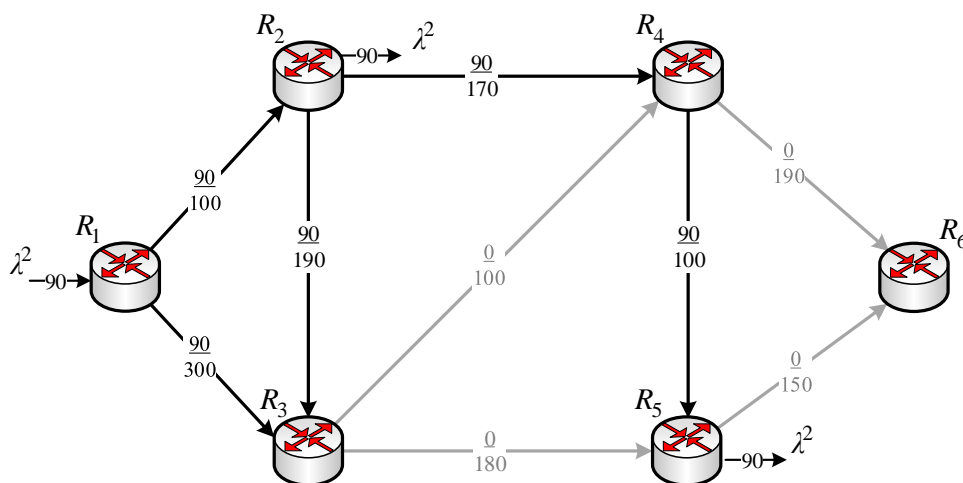


Рис. 3. Дерево маршрутів для другого багатоадресного потоку пакетів

Характерною рисою маршрутного рішення, представленого на рис. 3, є недоцільне використання другим багатоадресним потоком каналів $E_{1,3}$ та $E_{2,3}$. Це обумовлено тим, що найбільш завантаженими в ТКМ є канали $E_{1,2}$ та $E_{4,5}$, їхні коефіцієнти завантаженості кількісно визначали параметр α , який дорівнював 0,9. Проте коефіцієнт завантаженості каналу $E_{1,3}$ дорівнював 0,67, а каналу $E_{2,3}$ – 0,52, тобто вони критично не впливали на значення критерію оптимальності (11), а умови (2), (4)-(7), (9) в явному вигляді не забороняли протікання потоку в цих каналах зв'язку. Подібна ситуація не виникала при використанні математичної моделі (2)-(8), тому що всі маршрутні змінні (2) безпосередньо впливали на значення критерію оптимальності (8), тобто використання того чи іншого каналу призводило до зростання (8). Тому у запропоновану вдосконалену модель багатоадресної маршрутизації для попередження випадків неефективного використання каналного ресурсу пропонується ввести ряд додаткових умов.

Перша умова має такий вигляд:

$$\sum_{i: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k \leq 1 \text{ при } k \in K, R_j \notin d_k^* \cup s_k, \quad (12)$$

а її виконання гарантує, що потік пакетів до транзитного вузла R_j може надходити не більше ніж з одного суміжного вузла.

Друга додаткова умова доповнює за своїм фізичним змістом умову (6):

$$\sum_{p: E_{j,p} \in E} x_{j,p}^k \geq x_{i,j}^k \text{ при } k \in K; R_j \notin d_k^* \cup s_k. \quad (13)$$

Фізичний зміст умов (13) полягає в тому, що потік пакетів на вхідних інтерфейсах транзитного вузла R_j може з'явитись лише за умови використання його вихідних інтерфейсів.

Врахування умов (12) та (13) при розрахунку маршрутних змінних (2) забезпечило більш адекватне рішення задачі багатоадресної маршрутизації для другого потоку (рис. 4). В результаті вдалося вирішити проблему недоцільного використання каналів $E_{1,3}$ та $E_{2,3}$.

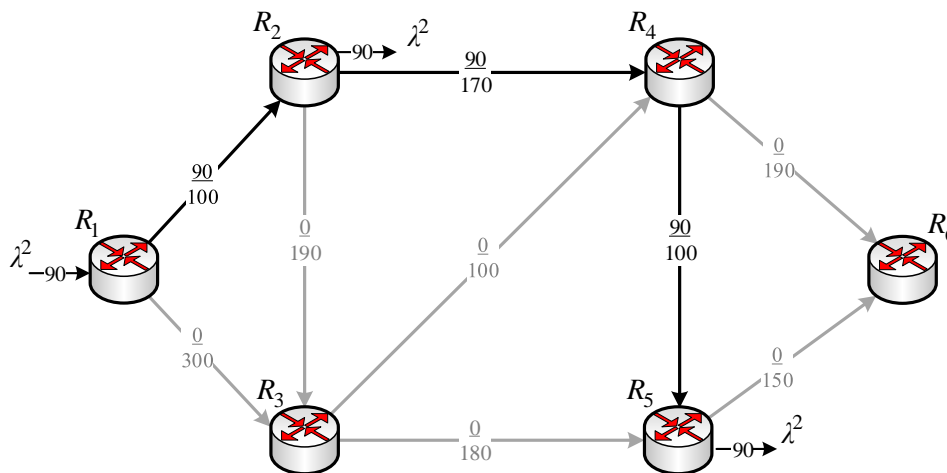


Рис. 4. Дерево маршрутів для другого багатоадресного потоку пакетів з використанням умови (12)

На рис. 5 зображено залежність порогу завантаженості каналів зв'язку мережі α від значень інтенсивностей потоків пакетів, що циркулюють у мережі, представленої на рис. 1.

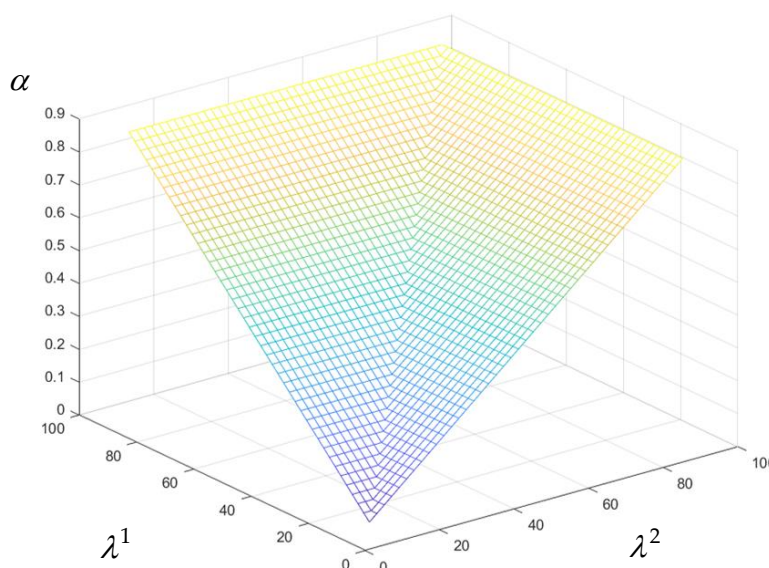


Рис. 5. Залежність порогу завантаженості каналів зв'язку мережі α від інтенсивностей двох потоків пакетів

Результати моделювання, які зображені на рис. 5, підтверджують лінійну залежність верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку мережі α від значень інтенсивностей потоків, які надходили до ТКМ.

Висновки

У роботі вдосконалено математичну модель багатоадресної маршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка відноситься до класу поточкових рішень. Новизною моделі є використання критерію оптимальності (11), який кількісно відповідає мінімізації коефіцієнту використання найбільш завантаженого каналу зв'язку мережі, для забезпечення збалансованого використання ресурсу мережі відповідно до вимог концепції Traffic Engineering. У ході дослідження було виявлено, що при використанні критерію оптимальності (11) можуть необґрунтовано задіятися канали зв'язку (рис. 3), коефіцієнти використання яких не критично впливають на порогове значення α . У зв'язку з цим для запобігання цій ситуації модель доповнена умовами (12) та (13). Використання моделі (2), (4)-(7), (9)-(13) дозволяє збалансовано використовувати каналний ресурс мережі особливо для структури трафіку, який складається з великої множини багатоадресних потоків з відносно невисокою інтенсивністю порівняно з пропускну здатністю каналів зв'язку. Модель гарантує лінійне зростання верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку мережі (рис. 5), що позитивно впливає на кількісні значення основних показників якості обслуговування.

Список літератури:

1. Routing Protocols Companion Guide: 1st Edition, Kindle Edition. Cisco Networking Academy. Cisco Press. 2014. 792 p.
2. Szigeti T., Barton R., Hattingh Ch., Briley K. Jr. End-to-End QoS Network Design: Quality of Service for Rich-Media & Cloud Networks (Networking Technology) 2nd Edition. Cisco Press. 2013. 1040 p.
3. Loveless J. IP Multicast, Volume I: Cisco IP Multicast Networking (Networking Technology) 1st Edition. Cisco press. 2016. 384 p.
4. Rosenberg E. A Primer of Multicast Routing. Springer Briefs in Computer Science. 2012. 128 p.
5. Benjamin A., Chartrand G., Zhang P. The Fascinating World of Graph Theory. Princeton University Press. 2017. 344 p.
6. Bertsimas D. The Probabilistic Minimum Spanning Tree Problem: Part I--complexity and Combinatorial Properties. Palala Press. 2015. 50 p.
7. Forouzan B.A. TCP/IP Protocol Suite 4th Edition. McGraw-Hill Education. 2017.
8. Wang X., Hui C., and Min H. QoS multicast routing protocol oriented to cognitive network using competitive coevolutionary algorithm. Expert Systems with Applications. 2014. № 41(10). P. 4513-4528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.01.020>
9. Marquez J., Gutierrez I., Sanchez E. Approach of Multicasting Routing with Solution for Network Coding Applying Edmonds-Karp. 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA). 2018 DOI: <https://doi.org/10.1109/ica-acca.2018.8609753>
10. Kucharzak M., Walkowiak K. A mixed integer formulation for multicast flow assignment in multilayer networks. 2010 Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications, 2010. P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ib2com.2010.5723619>

11. Kotachi S., Sato T., Shinkuma R., Oki E. Multicast Routing Model to Minimize Number of Flow Entries in Software-Defined Network. 2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2019. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.23919/apnoms.2019.8893074>
12. Лемешко А.В., Арус К.М. Поточкові моделі многадресної і ширококешательної маршрутизації в телекомунікаційних мережах. Проблеми телекомунікацій. 2013. № 1 (10). С. 38-45. URL: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/151_lemeshko_coordination.pdf.
13. Lemeshko O., Arous K. The flow-based model of multicast routing. 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2013. P. 523-524.
14. Nevzorova O., Arous K., Hailan A. Flow-based model of hierarchical multicast routing. Second International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications Science and Technology» PICS&T'2015, Kharkiv, Ukraine, October 13-15, 2015. P. 50-53. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357266>
15. Seok Y., Lee Y., Choi Y., Kim C. Dynamic Constrained Traffic Engineering for Multicast Routing. Proc. Wired Communications and Management. 2002. Vol. 2343. P. 278-288. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-45803-4_26
16. Wang Y., Wang Z. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering. Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999. P. 582-588. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCN.1999.805577>