УДК 621.391

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖАХ MPLS-TE

М.О. Євдокименко, Б.Д. Кравченко,
Харківський національний
університет радіоелектроніки

Н.В. Лукова-Чуйко
Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка

Abstract *– One of the approaches to eliminating the shortage of the basic model of routing of Traffic Engineering, aimed at preventing the use of channels and routes through which very low intensity flows are transmitted, has been investigated, which leads to inefficient use of the network resource. The approach is implemented by introducing additional expressions into the model, which prevent the flow from being smoothed more than it is administratively specified. This was accompanied by a transition from solving the optimization problem of linear programming to solving a more complex problem of mixed integer linear programming. In addition, the results of the research on a variety of network structures have shown that in a number of cases, innovations lead to a loss of adequacy of the resulting final solutions. The optimization problem had a solution only for those variants of the initial data, when the value of the minimum fraction of the flux was a multiple of the intensity of the flow entering the network. In other conditions, the percentage of cases for which an adequate solution could be obtained was reduced to 33-50%, which is not satisfactory in modern conditions. The results of the study were less influenced by the topology of the network, and more by the requirements for the values of the minimum share of the flow, which can still be transmitted via the communication channels of the MPLS-TE network.*

Анотація *– Досліджено один з підходів щодо усунення недоліку базової моделі Traffic Engineering маршрутизації, направленого на запобігання використанню каналів та маршрутів, за якими передаються потоки з дуже низькою інтенсивністю, що призводить до неефективного використання мережного ресурсу. Результати дослідження на множині мережних структур показали, що відсоток випадків, для яких вдавалось отримати адекватне рішення, міг знизитись до 33-50%, що не є задовільним в сучасних умовах.*

Аннотация *– Исследован один из подходов по устранению недостатка базовой модели Traffic Engineering маршрутизации, направленного на предотвращение использования каналов и маршрутов, по которым передаются потоки с очень низкой интенсивностью, что приводит к неэффективному использованию сетевого ресурса. Результаты исследования на множестве сетевых структур показали, что процент случаев, для которых удавалось получить адекватное решение, мог снизиться до 33-50%, что не является удовлетворительным в современных условиях.*

Вступ

З появою нових телекомунікаційних технологій висуваються більш жорсткі вимоги щодо ефективності їх функціювання та якості наданих інфокомунікаційних послуг. Відомо, що для більшості мережних додатків (передача даних, голосовий трафік, відео і т.ін.) необхідно забезпечити якість обслуговування (Quality of Service, QoS) одночасно за міжкінцевими показниками середньої затримки пакетів, джитера, ймовірності втрат та швидкості передачі пакетів [1]. Проте числові значення перелічених показників QoS є, як правило, нелінійними функціями від коефіцієнтів вико-

ристання каналів зв'язку, що визначають той чи інший використаний маршрут в цілому. Тому на практиці в мережах багатопротокольної комутації за мітками (MultiProtocol Label Switching, MPLS) активно використовується технологія Traffic Engineering (TE), впровадження якої орієнтоване на забезпечення ефективного балансування навантаження як в окремих каналах зв'язку, так і в мережі в цілому [2, 3].

Технологія Traffic Engineering наклала свій відбиток на зміст багатьох протокольних засобів управління трафіком – від організації черг до резервування мережних ресурсів [4, 5]. Проте найбільше розповсюдження отримала саме маршрутизація на основі балансування навантаження (Load Balancing Routing). Питання TE-маршрутизації досить детально висвітлено в роботах [6-9]. На сьогоднішній день відомо два основних типа моделей маршрутизації: графові та потокові [10]. Для графових моделей характерно те, що вони враховують лише топологію ТКМ. Для даних моделей задачею маршрутизації є пошук одного найкоротшого шляху (за кількістю переприйомів) на графі – для одношляхової маршрутизації, а також мультишляху – для багатошляхової маршрутизації. Графові моделі та комбінаторні алгоритми Дейкстри та Белмана-Форда покладені в основу роботи сучасних протоколів маршрутизації таких як OSPF, IS-IS, RIP, IGRP. Для потокових моделей [6-9] характерне те, що вони можуть враховувати не тільки структуру мережі, а також параметри каналів зв'язку та потоків трафіка, які ними передаються. Завдяки використанню потокових моделей можна більш ефективно розв'язувати задачі щодо балансування навантаження у MPLS-TE. Тому виберемо для подальшого дослідження потокову модель TE-маршрутизації, представлену в роботах [8, 9].

I. Опис базової моделі маршрутизації з урахуванням вимог технології Traffic Engineering

Нехай структура MPLS-мережі у рамках даної моделі описується за допомогою орієнтованого графу $G=(V,E)$, де V – множина вузлів-маршрутизаторів у телекомунікаційній мережі, E – множина дуг (каналів зв'язку). Кожна дуга $(i,j)\in E$ зважується параметром $c_{i,j}$, який характеризує пропускну здатність каналу зв'язку, що моделюється. Нехай s_k і t_k – вузол-відправник і вузол-отримувач k-го потоку відповідно, λ_k – інтенсивність k-го потоку з множини K [8, 9].

Керуючою зміною є величина $x_{i,j}^k$ яка характеризує частку k-го потоку в каналі зв'язку між i-м та j-м вузлами. Відповідно до особливостей багатошляхової маршрутизації на маршрутні зміні $x_{i,j}^k$ накладаються такі обмеження:

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

Фізичний зміст змінних обмеження (1) визначає можливість розгалуження потоку за шляхами мережі, тобто потік може передаватися як одним, так і множиною шляхів. У ході розв'язання маршрутних задач необхідно не допустити втрати пакетів

на мережних вузлах та у мережі в цілому. Для цього необхідно забезпечити виконання умови збереження потоку:

$$\begin{cases} \sum\limits_{j:(i,j)\in E} x_{i,j}^k - \sum\limits_{j:(j,i)\in E} x_{j,i}^k = 1, \; k \in K, \; i = s_k; \\ \sum\limits_{j:(i,j)\in E} x_{i,j}^k - \sum\limits_{j:(j,i)\in E} x_{j,i}^k = 0, \; k \in K, \; i \neq s_k, t_k; \\ \sum\limits_{j:(i,j)\in E} x_{i,j}^k - \sum\limits_{j:(j,i)\in E} x_{j,i}^k = -1, \; k \in K, \; i = t_k. \end{cases} \quad (2)$$

Крім умов збереження потоку (2) необхідно виконати умови запобігання перевантаженню каналів зв'язку:

$$\sum_{k\in K} \lambda_k \cdot x_{i,j}^k \le \alpha \cdot c_{i,j} \text{ при } (i,j) \in E, \quad (3)$$

де α – змінна, яка визначає верхній поріг використання каналів зв'язку в MPLS-мережі. На змінну α накладаються наступні обмеження:

$$0 \le \alpha \le 1. \quad (4)$$

При розв'язанні задачі маршрутизації з урахуванням вимог технології Traffic Engineering [8, 9] використовується критерій оптимальності виду:

$$\alpha \to \mathbf{min}. \quad (5)$$

Задача пошуку множини оптимальних шляхів (5) в рамках розглянутої потокової моделі (1)-(5) зведена до задачі лінійного програмування при мінімізації функції (5) за умови виконання обмежень (1)-(4). До основних переваг даної моделі стосовно балансування навантаження в мережі MPLS в порівнянні з іншими моделями маршрутизації можна віднести наступні [5]:

- прийнятна обчислювальна складність розрахунків, тому що розв'язується задача лінійного програмування.

- зі збільшенням навантаження на мережу параметр α зростає лінійно, що гарантує відсутність різких коливань і в значеннях основних QoS-показників.

Однак описана модель маршрутизації (1)-(5) має і ряд суттєвих недоліків, дослідженню яких присвячено ряд публікацій вітчизняних та закордонних вчених [11-14]:

1. Орієнтація на централізовану маршрутизацію в мережі;

2. Виникнення зациклення пакетів при маршрутизації в мережах з дуплексними або напівдуплексними каналами зв'язку;

3. Неможливість забезпечення максимально допустимого рівня якості обслуговування в мережах з неоднорідною структурою;

4. Використання каналів та маршрутів, за якими передаються потоки з дуже низькою інтенсивністю, що призводить до неефективного використання мережного ресурсу.

Для усунення перших трьох недоліків в роботах [11-13] запропоновано досить результативні підходи та обчислювальні методи. В дані роботі основна увага буде

приділена четвертому недоліку з наведеного списку, та дослідженню одного з підходів до його усунення [14].

II. Дослідження одного з підходів до усунення недоліку щодо неефективного балансування навантаження в мережі MPLS-TE

В рішенні, що описане в роботі [14], пропонується обмежити ділення потоку на частини, які менші, аніж адміністративно встановлене значення. Це забезпечується доповненням моделі (1)-(5) наступними умовами:

$$x_{i,j}^k = g \cdot M_{i,j}^k, \tag{6}$$

$$0 \le g \le 1, \tag{7}$$

$$0 \le M_{i,j}^k \le \left\lfloor 1/g \right\rfloor, \tag{8}$$

де g – мінімальна доля (частина) потоку, яка може протікати каналами зв'язку мережі MPLS-TE, значення якої задається на початку моделювання; $M_{i,j}^k$ – кількість дискретних мінімальних частин розділеного k-го потоку, що можуть передаватись каналом (i, j), причому $M_{i,j}^k \in Z$, а Z – множина цілих чисел; $\lfloor . \rfloor$ – операція округлення до найближчого цілого в бік негативної нескінченності.

Виконання умови (6) гарантує, що доля потоку, який протікає каналом $(i, j) \in E$, дорівнює добутку мінімальної часини g, що обмежує ділення потоку, на їх кількість. Умова (7) накладає обмеження на значення мінімальної частини потоку, пропорційно якої буде ділитися потік та нижче якої ділення потоку буде заборонено. Завдяки умові (8), значення кількості мінімальних частин k-го потоку пакетів, що пересилаються каналом $(i, j) \in E$, може приймати тільки цілі значення.

Проведено кількісний аналіз адекватності рішень щодо балансування навантаження в мережі MPLS-TE в рамках моделі (1)-(8) для двох різних мережних топологій та характеристик трафіка при різних значеннях мінімальних частин g. Для прикладу інтенсивність потоку, який надходив до мережі, була постійною для усіх випадків моделювання та дорівнювала 100 1/с. У результаті аналізу будувались залежності максимального порогу завантаження пропускних здатностей каналів зв'язку мережі α від різних значень мінімальних частин g.

У першому випадку топологія мережі складалась з п'яти маршрутизаторів та шести каналів зв'язку (рис. 1). Як відправник було обрано перший маршрутизатор, а як отримувач – п'ятий маршрутизатор. На рис. 1 у розривах каналів зв'язку вказані їх пропускні здатності.

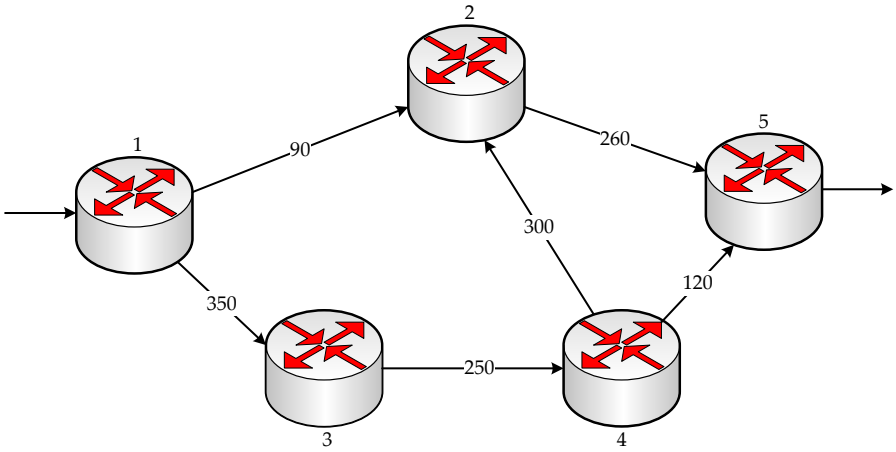

Рис. 1. Структура досліджуваної мережі

Відповідно до умови (7) значення g задавались у вигляді дробу:

$$g = \frac{q}{p}, \tag{9}$$

де q – чисельник, який приймав, наприклад, значення 1, 2 та 3; p – знаменник дробу ($p = \overline{q,100}$).

Залежності α від p при $g = \frac{1}{p}$, $g = \frac{2}{p}$ та $g = \frac{3}{p}$ для топології мережі, що показана на рис. 1, приведені на рис. 2 – рис. 4. При проведенні дослідження щодо адекватності моделі було встановлено, що при введені додаткових обмежень (6)-(8), оптимізаційна задача не завжди мала рішення. На рис. 2 – рис. 4 при значеннях p, коли оптимізаційна задача не мала рішень, значення α для наочності вказані нульовими.

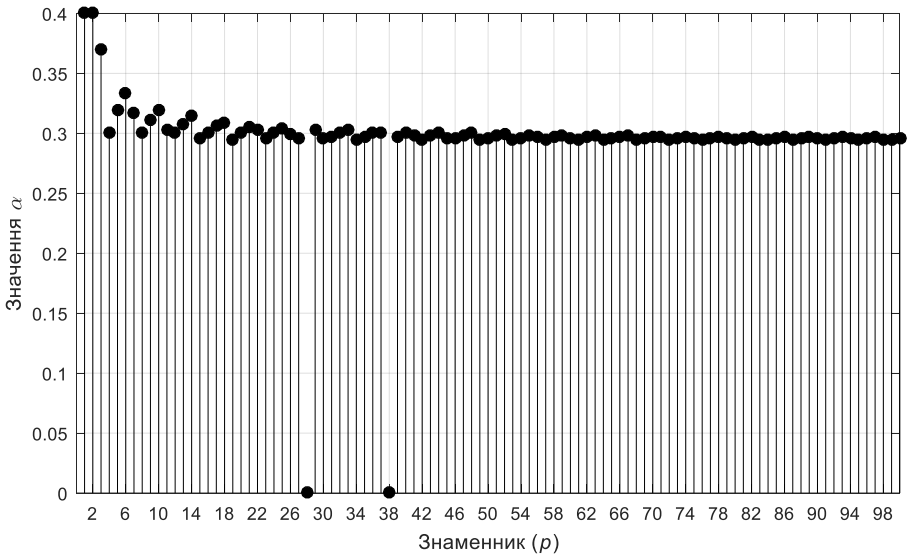

Рис. 2. Залежність α від p при $g = \frac{1}{p}$

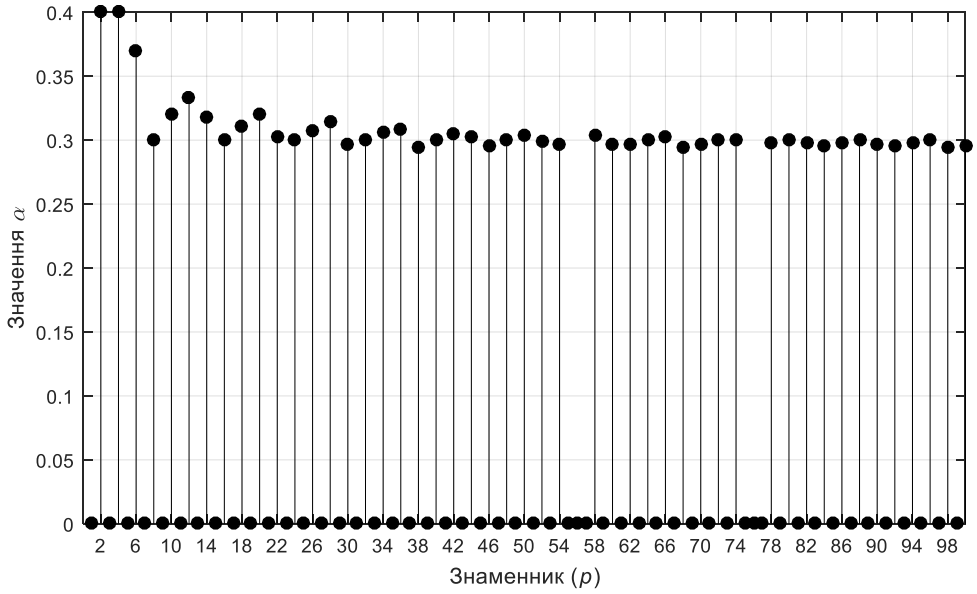

Рис. 3. Залежність α від p при $g = \frac{2}{p}$

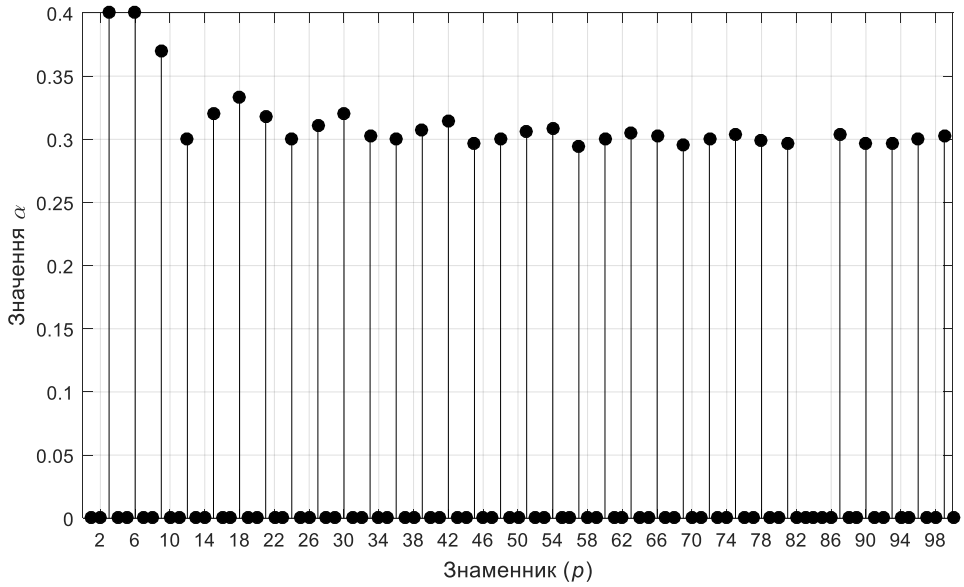

Рис. 4. Залежність α від p при $g = \frac{3}{p}$

Стосовно отриманих результатів (рис. 2 – рис. 4) зроблені такі висновки:

1. Задача має рішення тільки у тих випадках, коли значення g кратне інтенсивності потоку, що надходить до мережі.

2. При зростанні значення чисельника q (9) кількість значень p, при яких існує рішення, зменшується (при $g=\frac{1}{p}$ рішення є у 98% можливих випадків, при $g=\frac{2}{p}$ – у 44,5%, а при $g=\frac{3}{p}$ – тільки у 32,65%).

У другому випадку була обрана топологія, що складалась з дев'яти маршрутизаторів та дванадцяти каналів зв'язку (рис. 5). Вузлом-відправником було обрано перший вузол, а вузлом-отримувачем – дев'ятий.

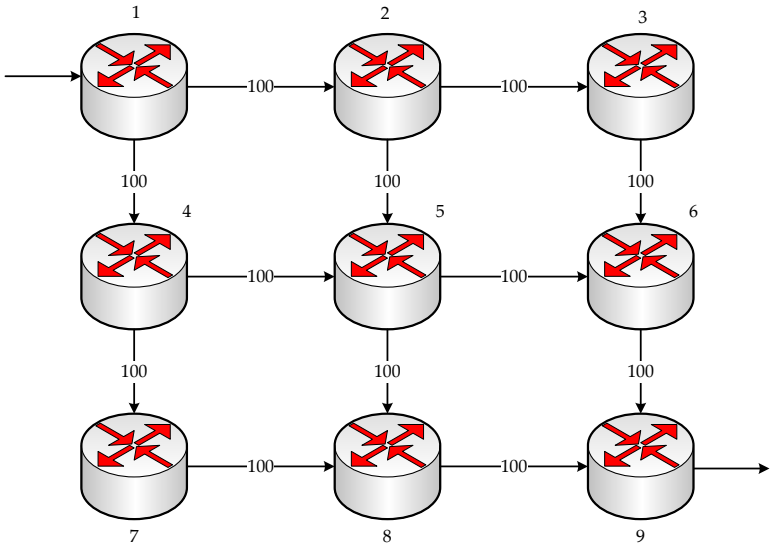

Рис. 5. Структура досліджуваної мережі

Залежність α від p при $g=\frac{1}{p}$, $g=\frac{2}{p}$ та $g=\frac{3}{p}$ приведена на рис. 6 – рис. 8.

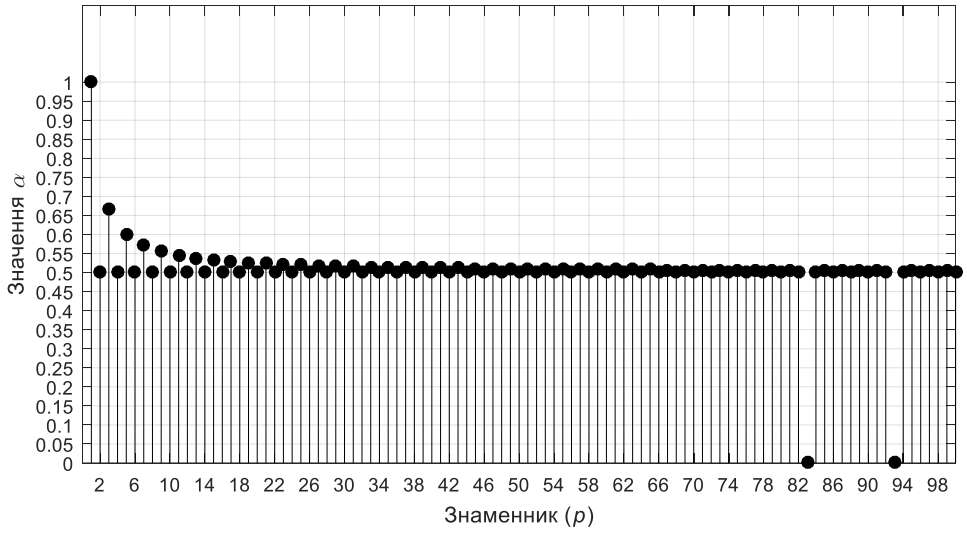

Рис. 6. Залежність α від p при $g=\frac{1}{p}$

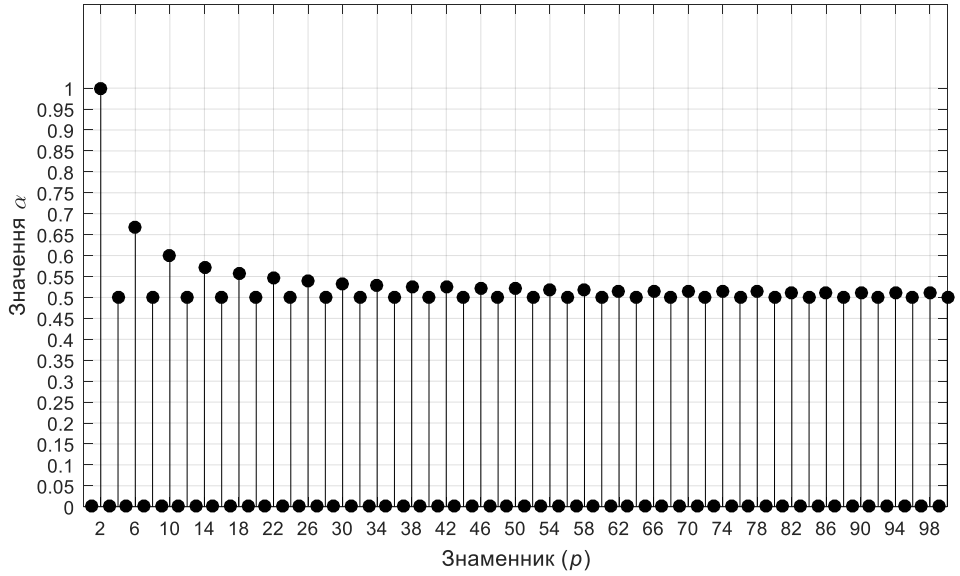

Рис. 7. Залежність α від p при $g = \frac{2}{p}$

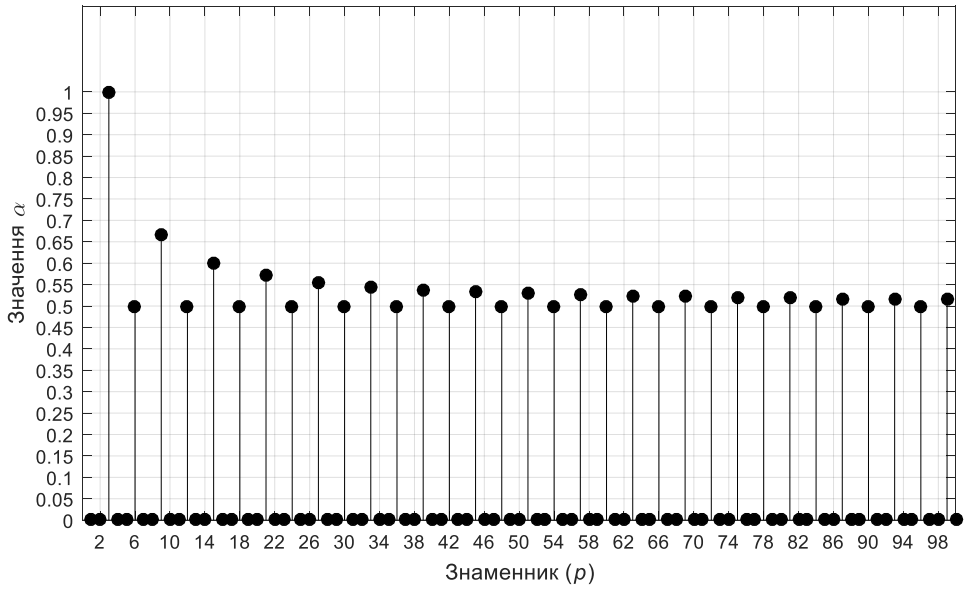

Рис. 8. Залежність α від p при $g = \frac{3}{p}$

Стосовно отриманих результатів для другої мережної топології (рис. 5) можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз побудованих залежностей (рис. 6-8) довів, що як і для першої топології мережі (рис. 1), оптимізаційна задача має рішення тільки у тих випадках, коли значення g кратне інтенсивності потоку, що надходить до мережі.

2. При зростанні значення чисельника q (9) кількість значень p, при яких існує рішення, зменшується (при $g=\frac{1}{p}$ рішення є у 98% можливих випадків, при $g=\frac{2}{p}$ – у 50,5%, а при $g=\frac{3}{p}$ – тільки у 33,7%).

Висновки

Технологія Traffic Engineering є дієвим засобом забезпечення балансування навантаження в мережі MPLS та підвищення рівня якості обслуговування в цілому. Ефективність технологічного рішення маршрутизації з балансуванням навантаження в мережах MPLS-TE залежить від адекватності математичних моделей та методів, що покладені в основу відповідних протоколів. Проведено дослідження одного з підходів щодо усунення недоліку базової моделі ТЕ-маршрутизації (1)-(5), направленого на запобігання використанню каналів та маршрутів, за якими передаються потоки з дуже низькою інтенсивністю, що призводить до неефективного використання мережного ресурсу. Досліджуваний підхід щодо усунення виявленого недоліку реалізується шляхом введення в модель виразів (6)-(8), забороняючи потоку розгладжуватись більше, а ніж задано адміністративно. Це супроводжувалось переходом від рішення оптимізаційної задачі лінійного програмування до розв'язання дещо складнішої з обчислювальної точки зору задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування.

Крім того результати дослідження на множині мережних структур показали, що в ряді випадків нововведення призводять до втрати адекватності отримуваних кінцевих рішень. Оптимізаційна задача мала рішення тільки для тих варіантів вихідних даних, коли значення g було кратним інтенсивності потоку, що надходить до мережі. В інших умовах відсоток випадків, для яких вдавалось отримати адекватне рішення, міг знизитись до 33-50%, що не є задовільним в сучасних умовах. На результати дослідження в меншій мірі впливала топологія мережі, а в більшій – вимоги щодо значень мінімальної долі (частки) потоку, яка ще може передаватись каналами зв'язку мережі MPLS-TE.

Список літератури:

1. *Вегешна Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: пер. с англ. / Ш. Вегешна. – Москва: Вильямс, 2003. – 368 с.

2. *Simha A.* Traffic Engineering with MPLS / A. Simha, E. Osborne. – Cisco Press, 2002. – 608 p.

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

4. *Li Y. Panwar S. Liu C.J.* On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing // Simulation series. – 2004. – Vol. 36; part 3. – P. 170–174.

5. *Kompella K., Rekhter Y.* Signalling Unnumbered Links in Resource ReSerVation Protocol - Traffic Engineering (RSVP-TE), RFC 3477, January 2003. – 9 p.

6. *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.

7. *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.

8. *Seok Y., Lee Y., Kim C., Choi Y.* Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks // IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. – 2001. – №3. – P. 348 – 353.

9. *Поповский В.В.* Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях / В.В Поповский, АВ. Лемешко, Л.И. Мельникова, Д.В. Андрушко // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Том.4. –Вып. № 4. – С. 372-382.

10. *Лемешко О.В., Дробот О.А., Симоненко Д.В.* Результати порівняльного аналізу потокових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Вип. 1(13), 2007. – С. 66-69.

11. *Лемешко А. В.* Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29.

12. *Мерсни А.* Исследование потоковой модели балансировки нагрузки в телекоммуникационной сети с неоднородной архитектурой [Електронний ресурс] / А. Мерсни // Проблеми телекомунікацій. – 2016. – № 2 (19). – С. 59 - 80. – Режим доступу до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162_mersni_routing.pdf .

13. *Mersni A., Ilyashenko A.E.* Complex criterion of load balance optimality for multipath routing in telecommunication networks of nonuniform topology // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – 76 (7). – P. 579-590.

14. *Seok Y.* Constrained Multipath Traffic Engineering Scheme for MPLS Networks / Y. Seok, Y. Lee, C. Kim, Y. Choi // IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. – 2002. – P. 2431–2436.