

МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦІЇ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШЛЯХІВ, ЩО ПЕРЕТИНАЮТЬСЯ ЗА ВУЗЛАМИ

© Єременко О. С., Андрушко Д. В., 2015

Запропоновано розв'язання актуальної наукової та практичної задачі, пов'язаної з розробленням потокової моделі багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, в телекомунікаційній мережі. Запропонована модель є подальшим розвитком відомої моделі багатошляхової маршрутизації на підставі введення в її структуру нелінійних обмежень, які відповідають за розрахунок шляхів, що перетинаються за вузлами. Результати моделювання підтвердили працездатність запропонованої потокової моделі багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами. Запропонована модель може використовуватись за умови забезпечення заданого рівня якості обслуговування, відмовостійкості та мережевої безпеки.

Ключові слова: якість обслуговування, багатошляхова маршрутизація, потокова модель, маршрути, що перетинаються за вузлами.

O. S. Yeremenko, D.V. Andrushko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv

MODEL OF ROUTING IN TELECOMMUNICATION NETWORK WITH OVERLAPPING BY NODES PATHS

© Yeremenko O. S., Andrushko D. V., 2015

In this article it was suggested a solution of topical scientific and practical problem associated with the development of flow-based model of multipath routing by overlapping by nodes paths within the Telecommunication Network (TCN). The model is a further development of the well known multipath routing model based on the introduction to the structure of non-linear constraints responsible for the calculation of routes that intersect at nodes. It is possible to obtain the order of multipath routing by overlapping by nodes paths in the solution of nonlinear programming problem with given objective function, linear constraints and nonlinear terms.

Search for a compromise on the providing fault-tolerance and security, on the one hand, and quality of service, on the other, led to the fact that in some important cases the requirements for overlapping paths can be slightly reduced and it is allowable to use paths overlapping, for example, only by TCN nodes. In these routes not only sender and receiver are common, but some transit nodes, anyway they do not contain the shared communication links. This is relevant in the case when, for example, the place of failures is radio channel. Moreover, the operational reliability of node, which operates on the basis of modern switching equipment, can meet the availability factor 0.99999. Another example is the fact that the wireless radio channel of TCN is also a major source of compromise of data transmitted on OSI physical layer. That is exactly in such cases where the failures and/or compromise is

inclined links, but not nodes of TCN, it is advisable to use overlapping by nodes paths, because it can lead to increased network performance with providing the same level of fault-tolerance or security as using the non-overlapping paths.

Simulation results confirmed the efficiency of the proposed model of multipath routing with overlapping by nodes paths. Among the advantages of the proposed model of multipath routing with overlapping by nodes paths, one can distinguish the fact that with the same parameters of security and fault-tolerance can be achieved higher performance and quality of service parameters in TCN in a whole. The model can find its use at providing a required level of quality of service, fault-tolerance and network security. In addition, that kind of models can be the basis of relevant routing protocols.

Key words: quality of service, multipath routing, flow-based model, overlapping by nodes paths.

Вступ

Сьогодні розвиток телекомунікаційних мереж (ТКМ) характеризується упровадженням все більшої кількості інфокомунікаційних сервісів і пов'язаного з цим вдосконалення технологічних засобів забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS) користувачів. Важливе місце в переліку таких засобів відводиться протоколам маршрутизації. Завдяки обґрунтованому вибору шляхів проходження пакетів між парою вузлів відправник-отримувач визначаються числові значення міжкінцевих QoS-показників: середньої затримки, джитера, ймовірності втрат пакетів і продуктивність ТКМ загалом [1, 2]. Практично всі сучасні маршрутні протоколи вдосконалили свою функціональність з погляду підтримки багатошляхової маршрутизації [4]. Як показала практика і результати наукових досліджень [2–5], багатошляхова маршрутизація завдяки забезпеченню балансування навантаження одночасно за множиною шляхів сприяє поліпшенню показників QoS.

Важливе місце з позиції застосування багатошляхової маршрутизації відводиться також сфері підвищення відмовостійкості та безпеки ТКМ, в якій традиційно використовується маршрутизація за множиною шляхів, що не перетинаються [6–9], в яких спільними є тільки вузли – відправник та отримувач пакетів. Використання маршрутів, що не перетинаються, гарантує, що вихід з ладу або компрометація одного елемента мережі (вузла або каналу) спричинить вихід з ладу або компрометацію лише одного, а не декількох маршрутів [10–12], як у разі маршрутизації за шляхами, що перетинаються. Однак реалізація багатошляхової маршрутизації за шляхами, що не перетинаються, завдяки відмові у використанні мережевого ресурсу, що є спільним для множини шляхів, як правило, негативно позначається на продуктивності ТКМ та рівні якості обслуговування в мережі загалом.

Пошук компромісу в питанні забезпечення відмовостійкості та безпеки, з одного боку, та якості обслуговування, з іншого, привів до того, що в деяких важливих випадках вимоги щодо перетинання використовуваних шляхів можна дещо знизити, і використовувати шляхи, які допускають перетин, наприклад, лише за вузлами ТКМ. У таких маршрутах спільними є не тільки вузли відправник та отримувач, але й деякі транзитні вузли, проте вони не містять спільних каналів зв'язку. Це актуально в умовах, коли місцем відмов є, наприклад, радіоканал, причому експлуатаційна надійність вузла, що функціонує на базі сучасного комутаційного обладнання, може відповідати коефіцієнту готовності 0,99999 [13]. Інший приклад полягає в тім, що радіоканал безпроводової ТКМ також є основним джерелом компрометації переданих даних на фізичному рівні OSI [7, 8]. Тобто саме в таких випадках, коли до відмов та/або компрометації схильні саме канали зв'язку, а не вузли ТКМ, доцільно використовувати маршрути, що перетинаються лише за вузлами, бо це може привести до підвищення продуктивності мережі із забезпеченням того самого рівня відмовостійкості або безпеки, що й у разі задіяння маршрутів, які не перетинаються.

Для розрахунку шляхів у багатошляховій маршрутизації переважно використовуються графокомбінаторні моделі та алгоритми [4, 6], до переваг яких зазвичай зараховують невисоку обчислювальну складність і високу масштабованість. Прикладом цьому можуть бути модифікації алгоритму Дейкстри [14], які покладено в основу протоколів багатошляхової маршрутизації SMR (Split Multipath Routing) і AODVM (AODV-Multipath), що використовуються в безпроводових ТКМ, а також за безпечної маршрутизації в MANET згідно з протоколом SPREAD (Secure Protocol for REliable dAta Delivery) [7, 8]. Незважаючи на зазначені переваги, графокомбінаторні рішення мають і важливі недоліки. До них належать, насамперед, відсутність використання характеристик потоків пакетів, які передаються, що ускладнює роботу засобів боротьби з перевантаженням каналів зв'язку ТКМ, а також складність розрахунку і регулювання кількості використовуваних шляхів. У зв'язку з цим все більше уваги приділяють використанню поточкових моделей [2–5], у межах яких характеристики трафіку, що передається в мережі, враховуються повніше порівняно з графокомбінаторними моделями.

Тому наукова та практична задача, пов'язана з розробленням нових математичних моделей багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, видається актуальною. Такі моделі можуть бути покладені в основу відповідних маршрутних протоколів для забезпечення заданого рівня якості обслуговування, підвищення безпеки даних, що передаються, а також підвищення відмовостійкості й ефективного використання мережевих ресурсів.

Класифікація шляхів у багатошляховій маршрутизації

Шляхи, які використовуються у багатошляховій маршрутизації, можна поділити на класи. Насамперед треба виділити такий клас, як шляхи, що не перетинаються, під якими розуміють маршрути тільки зі спільними вузлами відправник-отримувач. Якщо шляхи містять хоча б один спільний вузол та (або) канал, то їх називають такими, що перетинаються. Причому якщо шляхи мають спільні вузли, то їх називають шляхами, що перетинаються за вузлами, а якщо спільні канали – шляхами, що перетинаються за каналами (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація шляхів у багатошляховій маршрутизації

Як приклад розглянемо структуру ТКМ, зображену на рис. 2, яка містить вісім вузлів та п'ятнадцять каналів зв'язку між ними. Нехай вузлами відправником та отримувачем будуть вузли перший та восьмий. На рис. 2, наприклад, шляхи, що проходять через вузли 1→2→8, 1→3→6→8 і 1→4→5→7→8, не перетинаються, якщо вузли 1 і 8 – це відправник та отримувач пакетів відповідно. Тоді вузли 2 ÷ 7 є транзитними, тобто вони здійснюють лише переприймання пакетів потоку, який передається. На рис. 3 для тієї самої структури та пари вузлів відправник-отримувач представлені приклади шляхів, що перетинаються за вузлами, при цьому шляхи 1→2→8 і 1→3→2→6→8 мають вузловий перетин (вузол 2), а шляхи 1→3→2→6→8 і 1→4→3→5→6→7→8 допускають подвійний вузловий перетин (вузли 3 і 6).

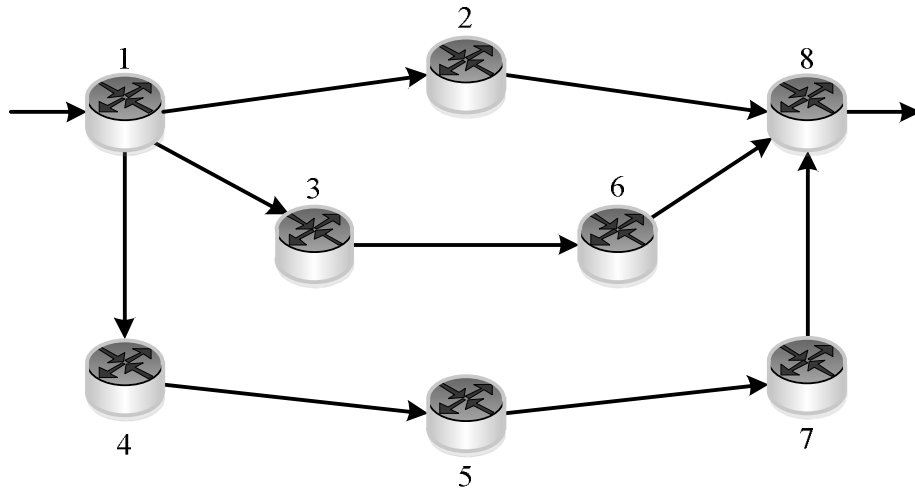


Рис. 2. Приклади шляхів, що не перетинаються

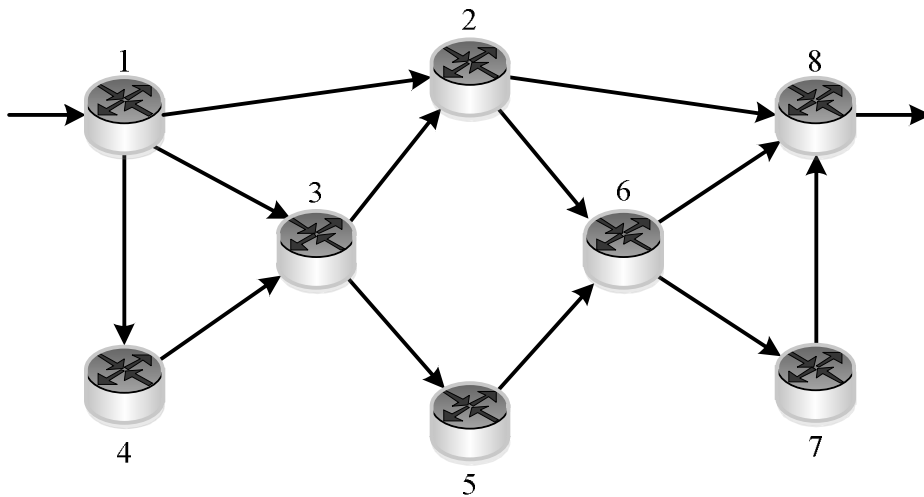


Рис. 3. Приклади шляхів, що перетинаються за вузлами

Модель багатопотокової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами

Під час розроблення потокової моделі багатопотокової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, як основа використана модель, запропонована в [2]. При цьому до її переваг можна зарахувати такі:

- врахування особливостей як структури мережі, параметрів каналів зв'язку, так і характеристик трафіку, що передається;
- підтримка мультитотоковості, тобто модель описує порядок маршрутизації не одного, а одночасно декількох потоків з урахуванням їх взаємного впливу;
- контроль за можливим перевантаженням елементів мережі за рахунок виконання умов збереження потоку у вузлах мережі й умов запобігання перевантаженню каналів зв'язку.

У межах базової моделі структура мережі описується за допомогою зваженого орієнтованого графу $G = (V, E)$, де V – множина вузлів (маршрутизаторів), а 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 D_k – вузол-відправник і вузол-отримувач k -го потоку відповідно, а r_k – інтенсивність k -го потоку з множини K . Керуючою змінною виступає величина

$x_{i,j}^k$, яка характеризує частку k -го потоку, що передається за каналом зв'язку $(i,j) \in E$. Відповідно до фізики задачі багатошляхової маршрутизації на змінні накладаються такі обмеження:

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

Розв'язуючи маршрутну задачу, необхідно забезпечити виконання умов збереження потоку в кожному з вузлів та у всій мережі:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 1, i = S_k - \text{для вузла-відправника}; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 0, i \neq S_k, D_k - \text{для транзитних вузлів}; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = -1, i = D_k - \text{для вузла-отримувача}. \end{cases} \quad (2)$$

Також повинні виконуватися умови запобігання перевантаженню каналів зв'язку, а саме

$$\sum_{k \in K} r_k \cdot x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, \quad (i,j) \in E. \quad (3)$$

Розглянемо випадок, коли в мережі необхідно реалізувати багатошляхову маршрутизацію за шляхами, що перетинаються за вузлами. В межах цієї моделі необхідно, щоб виконувалося таке припущення (гіпотеза): у кожному транзитному вузлі кількість вхідних інтерфейсів, які використовуються, повинна дорівнювати кількості вихідних задіяних інтерфейсів. Відповідно до наведеної гіпотези в позначеннях базової моделі (1)-(3) для всіх вхідних та вихідних інтерфейсів i -го транзитного вузла, які використовуються, повинні виконуватися такі умови:

$$\sum_{l:(l,i) \in E} \lceil x_{l,i}^k \rceil = \sum_{m:(i,m) \in E} \lceil x_{i,m}^k \rceil, \quad (4)$$

де $\lceil \cdot \rceil$ – операція округлювання числа до найближчого більшого цілого; $\sum_{l:(l,i) \in E} \lceil x_{l,i}^k \rceil$ – кількість вхідних

інтерфейсів i -го вузла, за якими частки k -го потоку надходять до цього вузла; $\sum_{m:(i,m) \in E} \lceil x_{i,m}^k \rceil$ –

кількість вихідних інтерфейсів i -го вузла, за якими частки k -го потоку виходять з цього вузла.

Виконання нелінійних обмежень (4) гарантує, що потоки, які проходять через i -й транзитний вузол, надходять від тієї ж кількості суміжних вузлів, як і передаються до інших суміжних вузлів. Так відбувається формування множини шляхів, що перетинаються, у яких загальними є не тільки пара вузлів відправник та отримувач, а також і транзитні вузли.

Як приклад під час розв'язання маршрутної задачі мінімізується цільова функція такого вигляду:

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j} \cdot x_{i,j}^k, \quad (5)$$

де $f_{i,j}$ – метрика каналу зв'язку між i -м та j -м вузлами ТКМ. Зважаючи на нелінійність умов (5), оптимізаційна задача, пов'язана з мінімізацією виразу (5), належатиме до класу задач нелінійного програмування.

У роботі [15] запропоновано поточкову модель багатошляхової маршрутизації за шляхами, що не перетинаються, з можливістю регулювання кількості використовуваних маршрутів, як це зроблено, наприклад, в роботах [7, 10], яка може бути застосована і для випадку шляхів, що перетинаються за вузлами.

Щоб забезпечити регулювання кількості використовуваних шляхів, що перетинаються за вузлами, під час реалізації багатошляхової маршрутизації k -го потоку позначимо через M_{UB}^k верхнє граничне значення (Upper Bound) кількості шляхів, що перетинаються, яке визначається ступенем вершин, що моделюють вузли відправника і отримувача, тобто кількістю інцидентних цих вершинам дуг (каналів зв'язку):

$$M_{UB}^k = \min(d(S_k), d(D_k)), \quad (6)$$

де $d(S_k)$ та $d(D_k)$ – ступені вершин (вузлів) відправника та отримувача k -го потоку відповідно.

Фактично використовувану кількість M^k шляхів, що не перетинаються, під час маршрутизації k -го потоку, застосовуючи модель (1)–(5), за аналогією з виразом (6) можна розрахувати так:

$$M^k = \sum_{j:(j,i) \in E} [x_{i,j}^k] \quad \text{або} \quad M^k = \sum_{n:(n,m) \in E} [x_{n,m}^k] \quad \text{при} \quad i = S_k, m = D_k, \quad (7)$$

де $\sum_{j:(j,i) \in E} [x_{i,j}^k]$ – кількість вихідних інтерфейсів, за якими k -й потік виходить з вузла-відправника;

$\sum_{n:(n,m) \in E} [x_{n,m}^k]$ – кількість вхідних інтерфейсів, за якими k -й потік надходить до вузла-отримувача.

Величина M^k може бути і оцінюваним параметром, і регульованою величиною, тобто за її допомогою можна задавати мінімальну, максимальну або визначати задану кількість використовуваних шляхів, що перетинаються за вузлами, у багатошляховій маршрутизації. Межі зміни цієї величини визначаються за допомогою нерівності

$$1 \leq M^k \leq M_{UB}^k. \quad (8)$$

Приклад роботи моделі багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами

Нехай необхідно розв'язати задачу багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, для передачі мультимітокового трафіку. В ході розв'язання задачі з використанням запропонованої потокової моделі як ТКМ використовувалася мережа з восьми вузлів і п'ятнадцяти каналів зв'язку, яка показана на рис. 4. Парою вузлів відправник-отримувач виступали перший і восьмий вузли відповідно. В розривах каналів зв'язку вказана їх пропускна здатність, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с) (рис. 4).

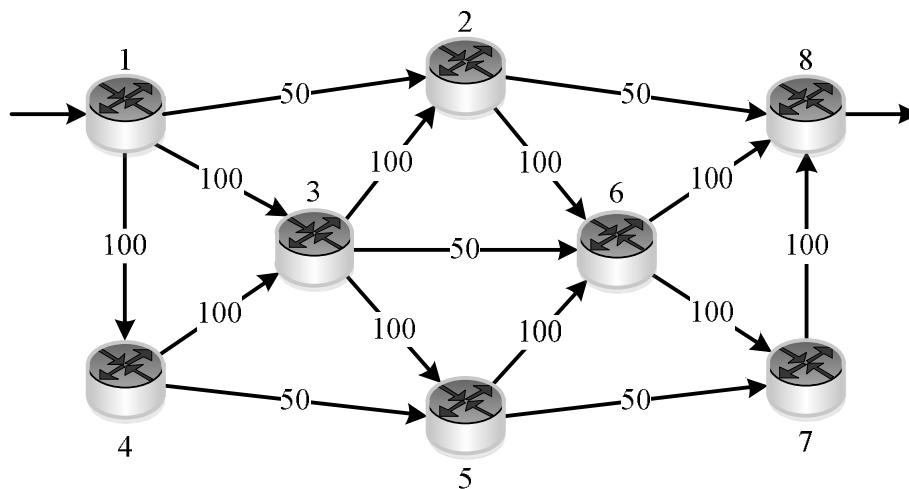


Рис. 4. Структура досліджуваної ТКМ

Для наочності розглянемо приклад, коли в ході багатошляхової маршрутизації мінімізується кількість переприймань на вузлах, тобто $f_{i,j}=1$. Тоді максимальна продуктивність напрямку зв'язку між 1 та 8 вузлами ТКМ у разі реалізації багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, становитиме 250 1/с (рис. 5). На рис. 5 в розриві того чи іншого каналу зв'язку показана інтенсивність потоку, який рухається за ним. Не задіяні в ході маршрутизації канали показані штриховою лінією.

Бачимо, що у разі передачі потоку інтенсивністю 250 1/с отримана множина маршрутів міститиме такі три ($M^k=3$) шляхи: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 8$, $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ і $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$, що перетинаються за вузлами. При цьому у шляхів $1 \rightarrow 2 \rightarrow 8$ і $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ вузол 2 є спільним, а шляхи $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ і $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ в цьому випадку мають два спільні вузли, а саме транзитні вузли 3 і 6. За шляхом $1 \rightarrow 2 \rightarrow 8$ передається потік інтенсивністю 50 1/с, а за шляхами $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ і $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ – потоки інтенсивністю по 100 1/с.

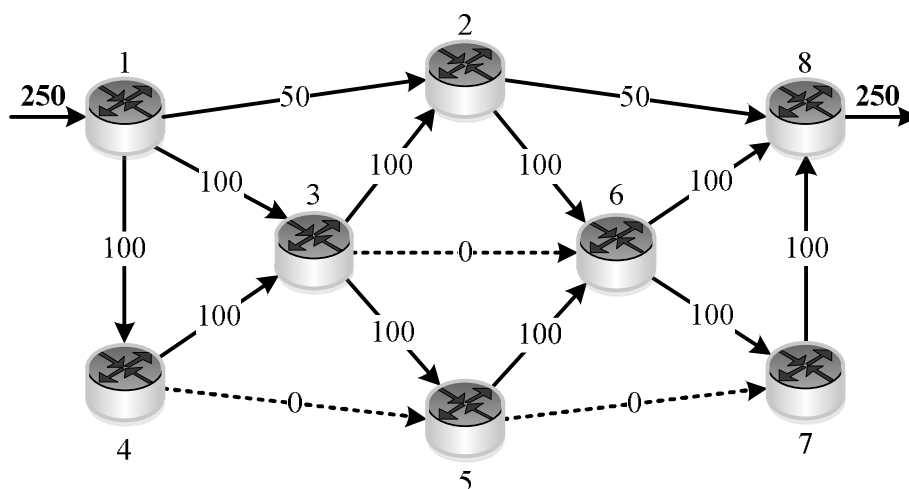


Рис. 5. Результат розрахунку множини шляхів з використанням умов (4) маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, у разі обслуговуванні потоку інтенсивністю 250 1/с

Для прикладу, в разі використання множини маршрутів, що не перетинаються (рис. 2), продуктивність напрямку зв'язку між вузлами 1 та 8 за умови пропускних здатностей каналів зв'язку, вказаних на рис. 4, становитиме лише 150 1/с. Отже, перехід до задіяння шляхів, що перетинаються за вузлами, в розглянутому прикладі приводить до зростання продуктивності вибраного напрямку зв'язку приблизно в 1,7 разу.

Висновки

У роботі запропоновано розв'язання актуальної наукової та практичної задачі, пов'язаної з розроблення потокової моделі багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, в телекомунікаційній мережі. Запропонована модель є подальшим розвитком відомої моделі багатошляхової маршрутизації [2] за рахунок введення в її структуру нелінійних обмежень (4) та (7). Це дало змогу отримати порядок багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, в ході розв'язання задачі нелінійного програмування з цільовою функцією (5), лінійними обмеженнями (1)–(3) і нелінійними умовами (4) та (7). Використання умови (4) дозволяє забезпечити розрахунок множини маршрутів, що перетинаються за вузлами.

Серед переваг використання запропонованої моделі багатошляхової маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузлами, можна виділити такий пошук компромісу для забезпечення відмовостійкості та безпеки, з одного боку, та якості обслуговування, з іншого, що

призводить до того, що в деяких випадках вимоги щодо перетинання шляхів можна знизити, і використовувати шляхи, які перетинаються за вузлами. Це актуально в умовах, коли місцем відмов та/або компрометації є саме канали зв'язку, а не вузли ТКМ. Крім того, експлуатаційна надійність вузлів транспортної мережі, що функціонують на базі сучасного комутаційного обладнання, може відповідати коефіцієнту готовності 0,99999. Отже, за тих самих показників безпеки та відмовостійкості вдається підвищити продуктивність ТКМ та показники якості обслуговування загалом.

1. Vegesna S. *IP Quality of Service* // Cisco press, 2001. – 368 p.
2. 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.
3. Вишне夫斯基 В. М. *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
4. Поповский В. В., Лемешко А. В., Мельникова Л. И., Андрушко Д. В. *Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях* // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2005. – Т.4, вып.4. – С. 372–382.
5. Лемешко А. В. *Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки* [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // *Проблемы телекоммуникаций*. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.
6. Lee C.K.-L. *A Multipath Ad Hoc Routing Approach to Combat Wireless Link Insecurity* / C. K.-L. Lee, X.-H. Lin, and Y.-K. Kwok // *Proc. ICC*. – 2003. – Vol. 1. – P. 448–452.
7. Lou W. *SPREAD: Enhancing Data Confidentiality in Mobile Ad Hoc Networks* / W. Lou, W. Liu, Y. Fang // *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE*. – 2004. – Vol. 4. – P. 2404–2413.
8. Lou W. *SPREAD: Improving Network Security by Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks* / W. Lou, W. Liu, Y. Zhang, Y. Fang // *Wireless Networks*. – 2009. – Vol. 15, Issue 3. – P. 279–294.
9. Лемешко А. В. *Модель безопасной маршрутизации с оптимальной балансировкой числа фрагментов передаваемого сообщения по непересекающимся маршрутам* / А. В. Лемешко, А. С. Еременко // *Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи (ЭМС-2015): сб. науч. трудов Первой междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 27 мая 2015 г.* – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – С. 96–99.
10. Alouneh S. *A Multiple LSPs Approach to Secure Data in MPLS Networks* / S. Alouneh, A. En-Nouaary, A. Agarwal // *Journal of Networks*. – 2007. – Vol. 2, Issue 4. – P. 51–58.
11. Lemeshko O. V. *Fault-Tolerant Unicast, Multicast and Broadcast Routing Flow-based Models* / O. V. Lemeshko, A. M. Arous, O. S. Yeremenko // *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET), India*. – 2015. – Vol-3: Issue-4A. – P. 343–350.
12. Alouneh S. *A Novel Path Protection Scheme for MPLS Networks using Multi-path Routing* / S. Alouneh, A. Agarwal, A. En-Nouaary // *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*. – 2009. – Vol. 53, Issue 9. – P. 1530 – 1545.
13. Kloth A.K. *Advanced Router Architectures* // CRC Press, 2005. – 240 p.
14. Natarajan M. *Graph Theory Algorithms for Mobile Ad Hoc Networks* / M. Natarajan // *Informatica – An International Journal of Computing and Informatics*. – 2012. – Vol. 36. – P. 185 – 200.
15. Еременко А. С. *Потоковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в телекоммуникационной сети* [Электронный ресурс] / А. С. Еременко // *Проблемы телекоммуникаций*. – 2015. – № 1 (16). – С. 85–93. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_yeremenko_disjoint.pdf.
16. Suurballe J.W. *A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths* / J.W. Suurballe, R.E. Tarjan // *Networks*. – 1984. – Vol. 14, Issue 2. – P. 325–336.