

УДК 621.391

# ВІДМОВОСТІЙКА БАГАТОАДРЕСНА МАРШРУТИЗАЦІЯ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАХИСТОМ ШЛЯХУ ТА ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ



О.В. ЛЕМЕШКО, О.С. ЄРЕМЕНКО, М.О. ЄВДОКИМЕНКО

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Abstract** – The article presents and investigates a flow-based mathematical model of fault-tolerant multicast routing. Under the proposed mathematical model, the technical task of fault-tolerant multicast routing was reduced to the Boolean programming optimization problem. The mathematical model was based on linear optimality criterion and constraints represented by the conditions of single-path routing, flow conservation, multicast connectivity, and prevention of overload and looping. The routing variables that guided the multicast routing process were Boolean. The optimal primary and backup paths are calculated by implementing path and bandwidth protection schemes within the model for each multicast flow. The restrictions on routing variables introduced into the model were responsible for protecting the route and bandwidth. The optimality criterion in determining the optimal and backup multicast paths at the level of routing metrics considered the network topology and links bandwidth. The additive nature of the criterion focused on finding paths that included a minimum number of communication links. According to the selected routing metric, a feature of the model is to ensure priority in assigning the primary route of the path that had a shorter "length" than the backup path. The analysis of the obtained solutions confirmed their operability under the specified protection scheme's implementation and their optimality according to variants of the used routing metrics. The proposed mathematical model can be used to develop the fault-tolerant multicast routing protocols of multimedia flows.

**Анотація** – У роботі представлено та досліджено потокову математичну модель відмовостійкої маршрутизації багатоадресних потоків. За допомогою запропонованої математичної моделі технологічна задача відмовостійкої багатоадресної маршрутизації була зведена до оптимізаційної задачі булевого програмування. Основу математичної моделі склали лінійні критерії оптимальності та обмеження, які були представлені умовами реалізації одношляхової маршрутизації, збереження потоку, зв'язності багатоадресних маршрутів, запобігання перевантаження та створення циклів. Маршрутні змінні, за допомогою яких керувався процес багатоадресної маршрутизації, носили булевий характер. У межах моделі для кожного з багатоадресних потоків розраховуються оптимальні основний і резервний шляхи із реалізацією схем захисту шляху та пропускної здатності. За захист маршруту та пропускної здатності відповідали введені в модель умови-обмеження, які накладались на маршрутні змінні. Критерій оптимальності при визначенні оптимального та резервного багатоадресних шляхів на рівні маршрутних метрик враховував топологію мережі та пропускну здатність каналів зв'язку. Адитивний характер критерію орієнтував на пошук шляхів, які включали мінімальну кількість каналів зв'язку. Особливістю моделі є забезпечення пріоритетності у призначенні основним маршрутом того шляху, який мав меншу «довжину», аніж резервний шлях, відповідно до обраної маршрутної метрики. Проведений у роботі аналіз отриманих рішень підтвердив їх працездатність з точки зору реалізації зазначених схем захисту, а також їх оптимальність відповідно до варіантів використаних маршрутних метрик. Запропонована математична модель може бути застосована під час розробки протоколів відмовостійкої багатоадресної маршрутизації мультимедійних потоків.

## Вступ

Характерною рисою сучасних інфокомунікаційних мереж (ІКМ) є зростання частки мультимедійних потоків у загальному об'ємі мережного трафіка. Перш за все мова йде про голосовий і відеотрафік, який передається під час надання послуг IP-телефонії, відеотелефонії, цифрового телебачення, комп'ютерних ігор тощо. Все частіше для надання перелічених послуг з метою більш ефективного використання доступного мережного ресурсу використовується багатоадресна маршрутизація потоків пакетів. Крім того, багатоадресна передача пакетів використовується і при обміні слу-

жбовою інформацією про стан ІКМ між маршрутизаторами для формування маршрутних таблиць. Це, перш за все, стосується другої версії протоколу RIP (Routing Information Protocol), протоколів EIGRP (Enhanced Internal Gateway Routing Protocol) та OSPF (Open Shortest Path First) [1-7].

Особлива чутливість мультимедійного та службового трафіка до рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS) призвела до необхідності реалізації стратегій відмовостійкої маршрутизації. Саме відмовостійка маршрутизація дозволяє в умовах перевантажень, виходу з ладу та (або) компрометації мережного обладнання забезпечувати надійну та своєчасну передачу потоків пакетів. Відомо, що залежно від стану ІКМ під час швидкої перемаршрутизації, як підкласу рішень щодо відмовостійкої маршрутизації, можуть підтримуватись схеми захисту каналу, вузла, маршруту та пропускної здатності [8-13]. Із перерахованих рішень саме схема захисту маршруту забезпечує найбільш високий рівень відмовостійкості ІКМ, хоча і ґрунтується на використанні (резервуванні) більшого об'єму мережного ресурсу, перш за все, пропускної здатності каналів зв'язку та мережі загалом. Тому одночасно з підтримкою схеми захисту маршруту варто забезпечити також захист пропускної здатності ІКМ.

Варто зазначити, що ефективність роботи протоколів відмовостійкої маршрутизації на пряму залежить від типу математичних моделей і методів, які покладено в їх основу. Використані математичні моделі мають адекватно описувати процес відмовостійкої маршрутизації та реалізовані схеми захисту, а обчислювальний метод має забезпечити пошук оптимальних рішень у реальному масштабі часу. Отже актуальною представляється науково-прикладна задача щодо розробки математичної моделі відмовостійкої багатоадресної маршрутизації із реалізацією схем захисту шляху та пропускної здатності.

## **I. Потокова модель відмовостійкої багатоадресної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі**

На рівні топологічного опису ІКМ її структура буде представлена за допомогою орієнтованого графу  $G = (R, E)$ , в якому множина вершин  $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$  моделює маршрутизатори мережі, а множина дуг  $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  описує канали зв'язку (рис. 1). Пропускна здатність каналу  $E_{i,j} \in E$ , яка вимірюється в пакетах за секунду (пак/с), буде позначена через  $\phi_{i,j}$ .

Допустимо, що в мережі циркулює множина багатоадресних потоків  $K$ . Тоді для кожного  $k$ -го багатоадресного потоку є відомими такі вихідні дані:  $\lambda^k$  – середня пакетна інтенсивність (швидкість передачі пакетів), яка вимірюється в пак/с;  $s_k$  – це маршрутизатор джерело пакетів  $k$ -го потоку, а множина маршрутизаторів-отримувачів пакетів цього ж потоку позначається як

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

де  $m_k$  – загальна їх кількість.

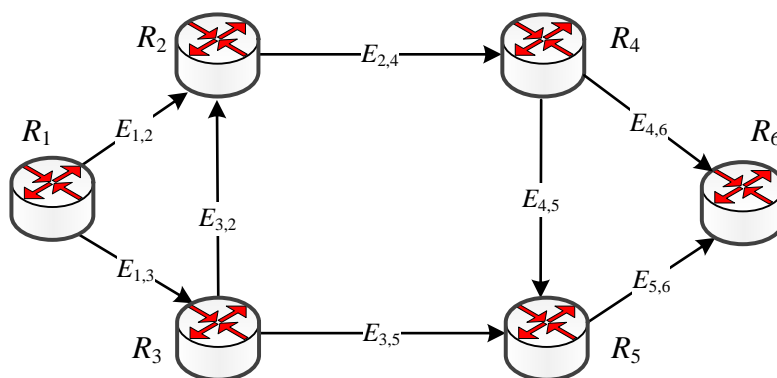


Рис. 1. Приклад структури інфокомунікаційної мережі

У результаті розв'язання задачі відмовостійкої багатоадресної маршрутизації необхідно визначити основний і резервний багатоадресні шляхи, які б не перетинались та мали необхідну пропускну здатність. Багатоадресні шляхи перетинаються, якщо вони містять спільні мережні елементи – маршрутизатори та (або) канали зв'язку. Пропускна здатність багатоадресного маршруту традиційно визначається пропускну здатністю найменш продуктивного каналу зв'язку, який входить до цього шляху.

Таким чином, для визначення основного та резервного маршрутів для кожного з багатоадресних потоків треба розрахувати керуючі (маршрутні) змінні двох типів –  $x_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k$ , кожна з яких характеризує долю  $k$ -го багатоадресного потоку, який протікає у каналі  $E_{i,j} \in E$ , що належить основному або резервному шляху відповідно. Згідно з фізичним змістом введених маршрутних змінних на них накладається множина обмежень. З метою реалізації одношляхової стратегії багатоадресної маршрутизації керуючі змінні мають бути булевими [4, 9, 14, 15]:

$$x_{i,j}^k \in \{0;1\} \text{ та } \bar{x}_{i,j}^k \in \{0;1\}. \quad (2)$$

Для забезпечення реалізації схеми захисту пропускну здатності шляху треба виконувати такі умови:

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

число яких відповідає кількості каналів зв'язку в ІКМ.

З метою виконання умов збереження потоку на маршрутні змінні (2) також накладаються обмеження виду [4, 9, 14, 15]:

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

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

Обмеження (4) вводиться для маршрутизатора-джерела  $k$ -го багатоадресного потоку пакетів, а його виконання гарантує, що всі пакети без втрат будуть передаватися на один або більше сусідніх (суміжних) маршрутизаторів ІКМ. Виконання умови (5) гарантує, що пакети  $k$ -го багатоадресного потоку з використанням основного або резервного шляхів будуть передані до кожного з маршрутизаторів-отримувачів.

Для забезпечення зв'язності багатоадресних шляхів маршрутні змінні (2) також мають відповідати таким умовам:

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

які вводяться для кожного транзитного маршрутизатора  $R_j \in R$ . Виконання умов (6) відповідає за те, щоб пакети на будь-якому вихідному інтерфейсі ( $E_{j,p} \in E$ ) транзитного маршрутизатора  $R_j \in R$  могли з'явитись лише за умови їх попередньої появи хоча б на одному із вхідних інтерфейсів ( $E_{i,j} \in E$ ) цього ж маршрутизатора.

З метою запобігання створенню петель у розрахованих багатоадресних шляхах, що, як відомо, негативно впливає на ефективність використання мережного ресурсу та на рівень QoS, у модель вводяться додаткові обмеження (за кількістю незалежних контурів у графі  $G$ ) [4, 9, 14]

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

де  $E_{\pi}^q$  – це множина дуг, які утворюють  $q$ -й незалежний (базисний) контур ( $\pi$ );  $|E_{\pi}^q|$  – потужність множини  $E_{\pi}^q$ . Таким чином, під час передачі пакетів петля буде відсутньою, якщо кількість задіяних у розрахованому багатоадресному (основному або резервному) шляху каналів зв'язку з контуру  $E_{\pi}^q$  є меншою за загальну кількість каналів, що створюють цей контур.

## II. Умови захисту шляху та пропускну здатності в інфокомунікаційній мережі. Критерій оптимальності маршрутних рішень

Грунтуючись на математичній моделі (1)-(7) з метою реалізації схеми захисту маршруту за аналогією з результатами, отриманими в роботі [4, 13], необхідно виконати такі лінійні умови:

– у разі запобігання перетину основного та резервного багатоадресних маршрутів за каналами

$$\sum_{E_{i,j} \in E} (x_{i,j}^k + \bar{x}_{i,j}^k) \leq 1, \quad (8)$$

– у разі запобігання перетину основного та резервного багатоадресних маршрутів за маршрутизаторами та каналами зв'язку

$$\sum_{R_j \in R_i^*} \sum_{R_p \in R_i^*} (x_{j,i}^k + \bar{x}_{p,i}^k) \leq 1, \quad \forall R_i \in R \setminus \{s_k \cup d_k^*\}, \quad (9)$$

де через  $R_i^* = \{R_j : E_{j,i} \neq 0; j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  позначено підмножину маршрутизаторів, які є суміжними для вершини  $R_i$ .

Умови (8) можуть використовуватись у випадку високої надійності маршрутизаторів, коли основною причиною відмов в обслуговуванні в ІКМ є вихід з ладу (перевантаження, компрометація тощо) саме каналів зв'язку. В іншому випадку доцільно використовувати умови (9).

Для забезпечення пошуку оптимальних значень маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k$  задачу відмовостійкої багатоадресної маршрутизації необхідно сформулювати в оптимізаційній формі. Тоді, ґрунтуючись на результатах, отриманих у роботах [4, 9, 14, 15], як критерій оптимальності маршрутних рішень доцільно обрати мінімум лінійної форми:

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k, \quad (10)$$

де  $c_{i,j}^k$  та  $\bar{c}_{i,j}^k$  – це метрики каналів зв'язку у разі їх використання основним або резервним багатоадресними шляхами відповідно. У загальному випадку подібні метрики можуть вибірково або інтегрально характеризувати основні функціональні параметри каналів зв'язку, наприклад, їх пропускну здатність, надійність, завантаженість, безпеку тощо. У випадку, коли  $c_{i,j}^k = \bar{c}_{i,j}^k = 1$ , основний і резервний шляхи будуть містити мінімально допустиму кількість каналів зв'язку, як це реалізовано, наприклад, у протоколі маршрутизації RIP. Коли ж  $c_{i,j}^k = \bar{c}_{i,j}^k = 10^8 / \varphi_{i,j}$ , до складу основних і резервних шляхів будуть включатись канали з врахуванням їх пропускну здатності, як це підтримується у протоколі OSPF.

З іншого боку для того, щоб множина основних багатоадресних маршрутів не була менш ефективною за множину резервних шляхів, варто забезпечити виконання такої умови [4, 9, 14, 15]:

$$\sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k \leq \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k. \quad (11)$$

Таким чином, у межах запропонованої математичної моделі (1)-(11) технологічна задача відмовостійкої багатоадресної маршрутизації була сформульована як оптимізаційна задача класу цілочисельного (булевого) програмування. Шукані маршрутні змінні є булевими (2), критерієм оптимальності маршрутних рішень обрано мінімум лінійної цільової функції (10), а обмеженнями, які накладаються на маршрутні змінні, виступають також лінійні умови (2)-(9), (11). Лінійність цільової функції та введених обмежень позитивно впливає на обчислювальну складність отримання шуканих маршрутних рішень, представлених змінними  $x_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k$ .

### III. Аналіз рішень задачі відмовостійкої багатоадресної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі із захистом шляху та пропускної здатності

Аналіз рішень задачі відмовостійкої багатоадресної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі із захистом шляху та пропускної здатності з використанням моделі (1)-(11) буде продемонстрована на прикладі мережної структури, наведеної на рис. 1. Досліджувана мережа складалась з шести маршрутизаторів та восьми каналів зв'язку, пропускна здатність (пак/с) яких наведена у табл. 1. Інтенсивність одного багатоадресного потоку дорівнювала 250 пак/с. Джерелом пакетів виступав маршрутизатор  $R_1$ , а маршрутизаторами-отримувачами –  $R_2$ ,  $R_5$  та  $R_6$ .

Таблиця 1. Пропускні здатності каналів зв'язку ІКМ

Канал зв'язку	$E_{1,2}$	$E_{1,3}$	$E_{3,2}$	$E_{2,4}$	$E_{3,5}$	$E_{4,5}$	$E_{4,6}$	$E_{5,6}$
Пропускна здатність, пак/с	500	800	400	300	300	350	250	300

У процесі розв'язання задачі багатоадресної маршрутизації відповідно до наведених вихідних даних були отримані два варіанти рішень (рис. 2 та рис. 3), які залежно від використаної маршрутної метрики, визначали основний і резервний шляхи, що не перетинались, з виконанням умов (9). На рис. 2 та рис. 3 у розривах каналів вказано дріб: у чисельнику пакетна швидкість, а у знаменнику – пропускна здатність.

Так, наприклад, у разі використання маршрутної метрики, яка визначалась числом переприйомів ( $c_{i,j}^k = \bar{c}_{i,j}^k = 1$ ), основний і резервний багатоадресні шляхи містили чотири канали кожний. Тому, якщо основним обирався шлях, наведений на рис. 2, то резервним був багатоадресний шлях, представлений на рис. 3, і навпаки.

Якщо ж за аналогією з протоколом OSPF метрика каналів враховувала їх пропускну здатність ( $c_{i,j}^k = \bar{c}_{i,j}^k = 10^8 / \varphi_{i,j}$ ), то основним обирався шлях, зображений на рис. 3, оскільки він містив канали з більш високою пропускну здатністю. Тоді резервним ставав багатоадресний шлях, наведений на рис. 2.

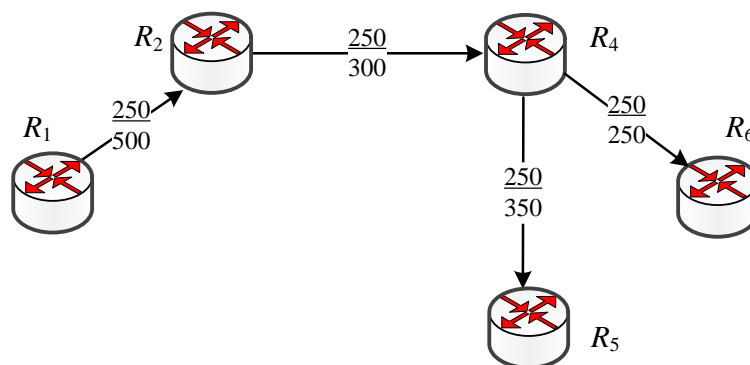


Рис. 2. Перший варіант рішення задачі багатоадресної маршрутизації

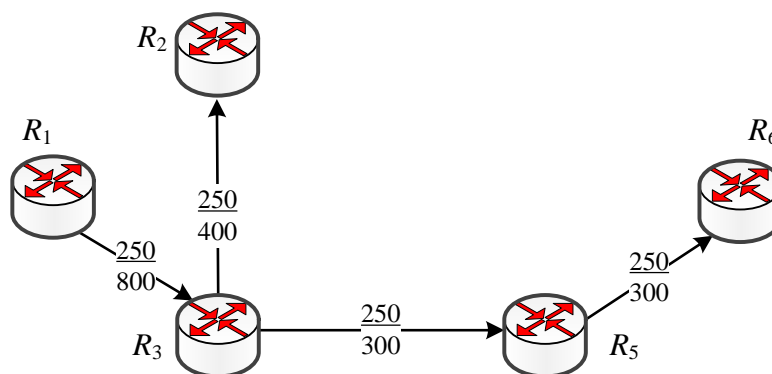


Рис. 3. Другий варіант рішення задачі багатоадресної маршрутизації

## Висновки

Таким чином, у роботі представлено потокову математичну модель відмовостійкої маршрутизації багатоадресних потоків (1)-(11). Модель зводить розв'язання технологічної задачі відмовостійкої маршрутизації до рішення оптимізаційної задачі *integer linear programming*, оскільки цільова функція (10) та множина обмежень (2)-(9), (11) є лінійними, а маршрутні змінні є булевими (2).

Завдяки введенню в модель умов (8) і (9) забезпечувалась реалізація схеми захисту шляху, а введення умов (3) для основних і резервних багатоадресних шляхів дозволило забезпечити захист також такого важливого показника QoS, як пропускна здатність мережі. Критерій оптимальності (10) при виборі оптимального та резервного багатоадресних шляхів на рівні маршрутних метрик враховував характеристики каналів зв'язку, наприклад, їх пропускну здатність. Адитивний характер цільової функції (10) орієнтував на пошук шляхів, які включали мінімальну кількість каналів зв'язку. Введення та виконання умов (11) забезпечувало пріоритетність у призначенні основним маршрутом того шляху, який мав меншу «довжину», аніж резервний шлях, відповідно до обраної маршрутної метрики.

Проведений у роботі аналіз отриманих рішень підтвердив їх працездатність з точки зору реалізації схем захисту маршруту та пропускну здатності мережі, а також їх оптимальність відповідно до варіантів використаних маршрутних метрик. Запропонована математична модель (1)-(11) може бути застосована як основа для

алгоритмічно-програмного забезпечення під час розробки протоколів відмовостійкої багатоадресної маршрутизації, перш за все, мультимедійних потоків.

Запропоноване рішення (1)-(11) з метою підвищення масштабованості ІКМ може бути адаптоване під реалізацію ієрархічної багатоадресної маршрутизації, як, наприклад, це виконано у роботах [16-19]. Для забезпечення захисту у процесі відмовостійкої багатоадресної маршрутизації рівня якості обслуговування не тільки за пропускнуою здатністю, але й за іншими QoS-показниками, запропонована модель (1)-(11) може отримати своє тензорне узагальнення, як, наприклад, у роботах [20, 21].

### Список літератури

1. Rosenberg, E. (2012), A Primer of Multicast Routing, Springer Briefs in Computer Science, Springer New York, NY, 117 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1873-3>
2. Loveless, J. (2016), IP Multicast, Volume I: Cisco IP Multicast Networking (Networking Technology), 1st Edition, Cisco press, 384 p.
3. Medhi, D., Ramasamy, K. (2018), Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures (The Morgan Kaufmann Series in Networking) 2nd Edition, Cambridge, MA, USA: Elsevier Inc., 1018 p.
4. Лемешко, О. В., Єременко, О. С., Невзорова, О. С. (2020), Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість, Харків: ХНУРЕ, 308 с.
5. Xu, Z., Liang, W., Huang, M., Jia, M., Guo, S., Galis, A. (2019), "Efficient NFV-Enabled Multicasting in SDNs," IEEE Transactions on Communications, No. 67(3), P. 2052-2070. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2881438>
6. Islam, S., Muslim, N., Atwood, J. W. (2018), "A Survey on Multicasting in Software-Defined Networking", IEEE Communications Surveys & Tutorials, No. 20(1), P. 355-387. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2776213>
7. S. Kotachi, T. Sato, R. Shinkuma and E. Oki, "Multicast Routing Model to Minimize Number of Flow Entries in Software-Defined Network", Proceedings of the 2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), Matsue, Japan, 18-20 September, P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.23919/APNOMS.2019.8893074>
8. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O., Hailan, A. M., Segeč, P., Papán, J. (2019), "Design of the Fast ReRoute QoS Protection Scheme for Bandwidth and Probability of Packet Loss in Software-Defined WAN", Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Polyana, Ukraine, 26 February - 02 March, P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CADSM.2019.8779321>
9. Lemeshko, O., Romanyuk, A., Kozlova, H. (2013), "Design schemes for MPLS Fast ReRoute," Proceedings of the 2013 12th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 19-23 February, P. 202-203.
10. Alyanbaawi, A., Gupta, B., Rahimi, S., Rahimi, N., Sinha, K. "An efficient approach for load-shared and fault-tolerant multicore shared tree multicasting", Proceedings of the 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24-26 July 2017, P. 937-943. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2017.8104898>



11. *Karanam, V., Maheswari, B. U., Sudarshan, T. S. B.* (2017), "Overlay based fault tolerant peer to peer multicasting for emergency data communication in VANETS", Proceedings of the 2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), Bengaluru, India, 17-19 August, P. 510-513. DOI: <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon.2017.8358425>
12. *Zhao, H., Xue, Y.* (2016), "RSD Fault Block Model for Highly Efficient Fault-Tolerant Manhattan Routing Algorithms in 2D Mesh", The Computer Journal, No. 59(10), P. 1511-1526. DOI: <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxw040>
13. *Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M.* (2018), "Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection", Proceedings of the 2018 XIIIth International Scientific and Technical Conference Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 11-14 September, P. 135-138. DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526707>
14. *Lemeshko, O. V., Arous, K. M.* (2013), "The flow-based model of multicast routing", Proceedings of the 2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Ukraine, 08-14 September, P. 523-524.
15. *Lemeshko, O., Kinan, A., Wahhab, M. A. J. A.* (2015), "Multicast fast reroute schemes for multiflow case", Proceedings of the International Conference on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, Ukraine, 24-27 February, P. 422-424. DOI: <https://doi.org/10.1109/CADSM.2015.7230892>
16. *Lemeshko, O., Yeremenko, O., Hailan, A. M.* (2017), "Two-level method of fast ReRouting in software-defined networks", Proceedings of the 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkov, Ukraine, 10-13 October, P. 376-379. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246420>
17. *Ramalho, M.* (2000), "Intra- and inter-domain multicast routing protocols: A survey and taxonomy", IEEE Communications Surveys & Tutorials, No. 3(1), P. 2-25. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2000.5340719>
18. *Kucharzak, M., Walkowiak, K.* (2010), "A mixed integer formulation for multicast flow assignment in multilayer networks", Proceedings of the 2010 Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications, Malaga, Spain, 15-17 December, P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/IB2COM.2010.5723619>
19. *Sheu, J., Chen, Y.* (2017), "A scalable and bandwidth-efficient multicast algorithm based on segment routing in software-defined networking", Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 21-25 May, P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997197>
20. *Lemeshko, A. V.* (2007), "Probabilistic-Temporal Model of QoS-Routing with Precomputation of Routes under the Terms of Non-Ideal Reliability of Telecommunication Network", Telecommunications and Radio Engineering, No. 66(13), P. 1151-1166. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v66.i13.20>
21. *Lemeshko, O., Drobot, O.* (2006), "A Mathematical Model of Multipath QoS-based Routing in Multiservice Networks", Proceedings of the 2006 International Conference - Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, Lviv, Ukraine, 17 December, P. 72-74. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2006.4404448>