

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ З БАЛАНСУВАННЯМ НАВАНТАЖЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

ЛЕМЕШКО О.В., СРЕМЕНКО О.С.

Пропонується оптимізаційна модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах, новизна якої полягає в тому, що оптимізаційну задачу балансування навантаження в ході швидкої перемаршрутизації за умови захисту пропускної здатності каналів зв'язку представлено в лінійній формі. Таке рішення на практиці зменшує обчислювальну складність визначення маршрутних змінних, відповідальних за формування основного та резервного шляхів, і забезпечує збалансовану завантаженість каналів зв'язку мережі, яка відповідає вимогам концепції Traffic Engineering. Модель забезпечує реалізацію схем захисту каналів, вузлів і пропускної здатності для швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах. Аналіз запропонованої моделі підтверджує її адекватність та ефективність з точки зору отримання оптимальних рішень для забезпечення збалансованого завантаження каналів зв'язку мережі та реалізації необхідних схем захисту елементів мережі (каналу, вузла та пропускної здатності).

Ключові слова: маршрутизація; потокова модель; MPLS; трафік інжиніринг; швидка перемаршрутизація; основний шлях; резервний шлях; схеми захисту.

Key words: routing; flow-based model; MPLS; Traffic Engineering; Fast ReRoute; primary path; backup path; protection schemes.

1. Вступ

Сучасні телекомунікаційні мережі (ТКМ) є складними технічними системами, які функціонують в умовах постійного впливу різних внутрішніх і зовнішніх факторів, що, як правило, негативно позначаються на їх ефективності та рівні якості обслуговування (Quality of Service, QoS) в цілому. До основних з таких факторів належать відмови мережного обладнання, викликані низькою надійністю окремих пристроїв, їх неправильною експлуатацією або конфігуруванням, перевантаженням або компрометацією [1-4]. У зв'язку з цим як ніколи актуальною є задача, пов'язана з побудовою так званих відмовостійких мереж (resilient networks), здатних забезпечити високий рівень якості обслуговування в умовах ймовірних відмов мережного обладнання.

Питанням побудови та функціонування відмовостійких мереж присвячено багато наукових і прикладних розробок, що стосуються нарощування функціоналу та підвищення рівня адаптивності протоколів різних рівнів OSI [5-7]. Особливий інтерес викликають дослідження, спрямовані на підвищення відмовостійкості телекомунікаційних мереж засобами мережного рівня OSI і, зокрема, протоколами маршрутизації. Прикладами подібних рішень служать протоколи захисту шлюзу HSRP, VRRP, GLBP та CARP [8, 9], а також технологія швидкої перемаршрутизації (Fast ReRoute, FRR), що застосовується в IP/MPLS-мережах для захисту елементів транспортної

мережі – каналу, вузла, шляху та пропускної здатності мережі в цілому [10-14].

Перелічені протоколи забезпечують підвищення відмовостійкості мережі, припускаючи введення ресурсної надмірності, коли поряд з визначенням основного маршруту (OM) одночасно розраховується і резервний маршрут (PM) відповідно до реалізованої схеми захисту. У зв'язку з цим при вирішенні завдань FRR важливо забезпечити збалансоване використання доступного мережного, перш за все, каналного ресурсу, щоб захист елемента мережі не призвів до її перевантаження та істотного зниження рівня QoS. Проблематиці реалізації моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в мережах MPLS (MPLS Traffic Engineering Fast ReRoute, MPLS TE FRR) присвячено багато наукових публікацій [15-24].

Забезпечення узгодженого вирішення завдань швидкої перемаршрутизації та балансування навантаження зазвичай призводить до підвищення обчислювальної складності та зниження масштабованості протокольних рішень. Відомо, що ефективність протокольного рішення багато в чому визначається адекватністю та якістю покладеної в його основу математичної моделі розрахунку. Як показав проведений аналіз [24], порядок FRR і TE визначається в ході розв'язання оптимізаційних задач різного рівня складності. При цьому реалізація схеми захисту пропускної здатності мережі, як правило, призводить до нелінійного формулювання оптимізаційної задачі та відповідного зростання обчислювальної складності одержуваних рішень [8, 9, 12-14]. В роботах [25, 26] зроблено спробу отримати розв'язання задачі TE FRR із захистом пропускної здатності на основі впровадження дворівневої ієрархії розрахунків. Проте оптимізаційні задачі, які розв'язуються на різних ієрархічних рівнях, вдалося сформулювати в лінійній формі лише для випадку реалізації одношляхової стратегії маршрутизації, що ефективно в разі формування мережного трафіка великою кількістю низькошвидкісних потоків.

Тому актуальним є науково-практичне завдання, пов'язане з розробкою ефективної лінійної оптимізаційної моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах при захисті каналу, вузла та пропускної здатності з підтримкою саме багатошляхової стратегії маршрутизації.

2. Потокова модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ

Нехай структура ТКМ описується за допомогою графа

$G = (R, E)$, в якому $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$ – це множина маршрутизаторів мережі, а $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина каналів зв'язку (КЗ). Позначимо через

$R_i^* = \{R_j^* : E_{j,i} \neq 0; j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ підмножину маршрутизаторів, які є суміжними для маршрутизатора R_i , тоді як кількість каналів зв'язку в мережі визначимо через $n = |E|$, а кожному з них поставимо у відповідність його пропускну здатність $\phi_{i,j}$.

В рамках даної моделі з кожним k -м одноадресним потоком пов'язано ряд функціональних характеристик: S_k – маршрутизатор-відправник; D_k – маршрутизатор-одержувач; λ^k – середня інтенсивність пакетів k -го потоку, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с). Нехай K – множина потоків пакетів, які передаються в мережі, тоді $k \in K$.

Результатом розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ є розрахунок двох типів маршрутних змінних – $x_{i,j}^k$ та $\bar{x}_{i,j}^k$, кожна з яких характеризує частку інтенсивності k -го потоку в каналі зв'язку $E_{i,j} \in E$, що входить до основного або резервного шляху відповідно.

У випадку, коли в мережі використовується одношляхова маршрутизація, на маршрутні змінні двох типів накладаються обмеження виду

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

а для багатошляхової стратегії маршрутизації –

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

Для забезпечення зв'язності маршрутів, які розраховуються, вводяться умови збереження потоку окремо для маршрутних змінних основного шляху:

$$\begin{cases} \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 0; k \in K, R_i \neq S_k, D_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 1; k \in K, R_i = S_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = -1; k \in K, R_i = D_k; \end{cases} \quad (3)$$

і окремо для маршрутних змінних резервного шляху [12-14]:

$$\begin{cases} \sum_{j:E_{i,j} \in E} \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} \bar{x}_{j,i}^k = 0; k \in K, R_i \neq S_k, D_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} \bar{x}_{j,i}^k = 1; k \in K, R_i = S_k; \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} \bar{x}_{j,i}^k = -1; k \in K, R_i = D_k. \end{cases} \quad (4)$$

3. Умови захисту каналу, вузла та пропускну здатності при швидкій перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ

Як показав аналіз [7, 12-14], в ході швидкої перемаршрутизації можуть підтримуватися кілька основних схем захисту елементів мережі: вузла, каналу, шляху та його пропускну здатності. У роботах [12, 13] отримано умови в аналітичному вигляді для підтримки зазначених схем захисту як складових відповідних математичних моделей.

В роботі [13] пропонується при реалізації схеми захисту каналу $E_{i,j} \in E$ на маршрутні змінні $\bar{x}_{i,j}^k$, що відповідають за визначення резервного шляху, накласти додаткові обмеження, аналогічні (1). При цьому в разі реалізації одношляхової стратегії маршрутизації має місце таке обмеження:

$$\bar{x}_{i,j}^k \in \{0; \delta_{i,j}^k\}, \quad (5)$$

тоді як при багатошляховій маршрутизації

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \quad (6)$$

де

$$\delta_{i,j}^k = \begin{cases} 0, \text{ при захисті каналу зв'язку } E_{i,j}; \\ 1, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (7)$$

Виконання умов (5)-(7) гарантує, що канал $E_{i,j} \in E$, який захищається, не буде використовуватися резервним маршрутом при одношляховій маршрутизації. Умови (5)-(7) носять лінійний характер на відміну від нелінійних рішень, запропонованих в роботі [7], що сприяє зниженню обчислювальної складності отримання кінцевих протокольних рішень.

При реалізації схеми захисту вузла $R_i \in R$ умови (5)-(7) узагальнюються на випадок захисту множини каналів зв'язку, інцидентних вузлу, що захищається [12, 13]. Тоді в разі використання одношляхової стратегії вводиться система умов:

$$\bar{x}_{i,j}^k \in \{0; \delta_{i,j}^k\} \text{ при } R_j \in R_i^*, j = \overline{1, m}, \quad (8)$$

а для багатошляхового випадку –

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k \text{ при } R_j \in R_i^*, j = \overline{1, m}, \quad (9)$$

де вибір значень $\delta_{i,j}^k$ підпорядковується умові (7).

Таким чином, виконання вимог умов (8) та (9) гарантує захист вузла $R_i \in R$, забороняючи використання резервним маршрутом всіх каналів, які виходять з даного вузла. Оскільки захисту підлягають лише транзитні маршрутизатори, то заборона на використання вихідних каналів відповідно до умов (4) запобігає включенню до резервного шляху і вхідних каналів для даного вузла R_i , що в результаті сприяє захисту вузла в цілому. Варто зазначити, що умови захисту заздалегідь визначених вузлів і

каналів мережі, як правило, є лінійними, а їх врахування критично не позначається на складності обчислення маршрутних змінних $x_{i,j}^k$ та $\bar{x}_{i,j}^k$, що відповідають за формування множини основних і резервних маршрутів.

Умови захисту пропускної здатності мережі, які представляються через умови запобігання перевантаження каналів зв'язку в ході реалізації швидкої перемаршрутизації, коли деякі потоки можуть перемикатися на резервні маршрути, мають вигляд:

$$\sum_{k \in K} \lambda^k \cdot \max[x_{i,j}^k, \bar{x}_{i,j}^k] \leq \phi_{i,j}, E_{i,j} \in E. \quad (10)$$

Умови (10), представлені в [9], запропоновано використовувати в такому вигляді:

$$\frac{1}{2} \sum_{k \in K} \lambda^k [x_{i,j}^k + \bar{x}_{i,j}^k + |x_{i,j}^k - \bar{x}_{i,j}^k|] \leq \phi_{i,j}, E_{i,j} \in E. \quad (11)$$

Проте умови захисту пропускної здатності мережі (10) та (11) є нелінійними, що негативно позначається на обчислювальній складності відповідних протокольних рішень. У роботі [25, 26] завдяки введенню дворівневої ієрархії розрахунків відповідно до принципу прогнозування взаємодій теорії ієрархічних багаторівневих систем вдалось ці умови отримати в лінійній формі, але тільки для випадку реалізації одношляхової маршрутизації. Тому в даній роботі для забезпечення лінійного вигляду умов захисту пропускної здатності мережі при реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації пропонується ввести такі модифіковані умови запобігання перевантаження з метою забезпечення балансування навантаження в мережі:

$$\sum_{k \in K} \lambda^k \cdot u_{i,j}^k \leq \alpha \cdot \phi_{i,j}, E_{i,j} \in E \quad (12)$$

при

$$x_{i,j}^k \leq u_{i,j}^k \text{ та } \bar{x}_{i,j}^k \leq u_{i,j}^k, \quad (13)$$

де $u_{i,j}^k$ також є керуючими змінними

$$0 \leq u_{i,j}^k \leq 1 \quad (14)$$

і являють собою верхній поріг (ВП) значень маршрутних змінних основних і резервних шляхів, тоді як α представляє собою додаткову керуючу змінну, яка чисельно визначає верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі та відповідає таким умовам [17-19]:

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (15)$$

Критерієм оптимальності рішень задач MPLS TE FRR за аналогією з результатами, отриманими в роботах [17-19], буде мінімум порогу α , введеного в (12), тобто

$$\min_{x, \bar{x}, \alpha} \alpha. \quad (16)$$

Таким чином, рішення вихідної технологічної задачі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах із захистом каналу, вузла та пропускної здатності було зведено до

розв'язання оптимізаційної задачі лінійного програмування з критерієм (16) при наявності обмежень (1)-(6), (8), (9), (12)-(15).

4. Дослідження запропонованої моделі

Аналіз запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ проведено на множині мережних конфігурацій для різного числа потоків та їх характеристик. Особливості роботи моделі TE FRR продемонструємо на розрахунковому прикладі. При цьому структура досліджуваної мережі показана на рис. 1, а в розривах каналів зв'язку мережі вказана їх пропускна здатність.

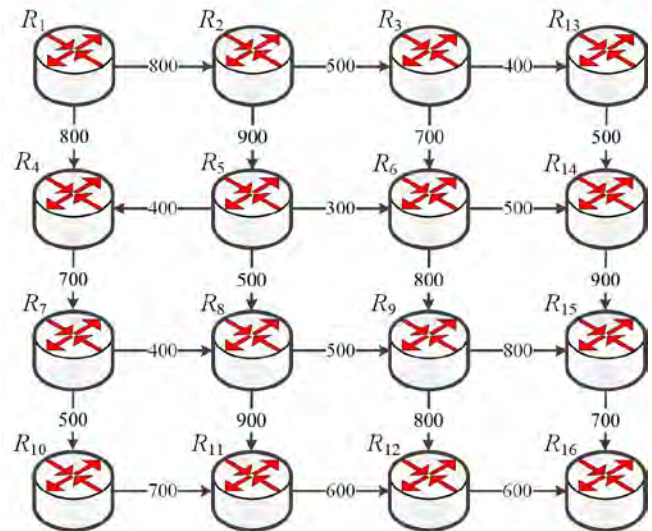


Рис. 1. Структура досліджуваної мережі

Нехай в мережі необхідно забезпечити розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації двох потоків. При цьому пакети першого потоку передавались від вузла R_1 до вузла R_{16} . Пакети другого потоку – від R_5 до R_{12} . Припустимо, що інтенсивність цих потоків змінювалась в таких межах: $\lambda^1 = 10 \div 400$ 1/с та $\lambda^2 = 10 \div 400$ 1/с. Розглянемо, як веде себе верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі (15) залежно від реалізованої схеми захисту каналу, вузла та пропускної здатності. В табл. 1 показані мінімальні та максимальні значення виграшу щодо значень критерію (16) при реалізації багатошляхової маршрутизації у порівнянні з використанням одношляхової маршрутизації при захисті кожного з каналів зв'язку мережі окремо. Таким чином, при захисті каналів зв'язку використання моделі (1)-(16) дозволяє покращити критерій (16) в середньому від 37,12 до 59,41%. Для наочності на рис. 2 показано залежність верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку від значень інтенсивностей потоків, якщо реалізується, наприклад, схема захисту каналу $E_{8,11}$ при багатошляховій (рис. 2, а) або одношляховій маршрутизації (рис. 2, б).

Таблиця 1

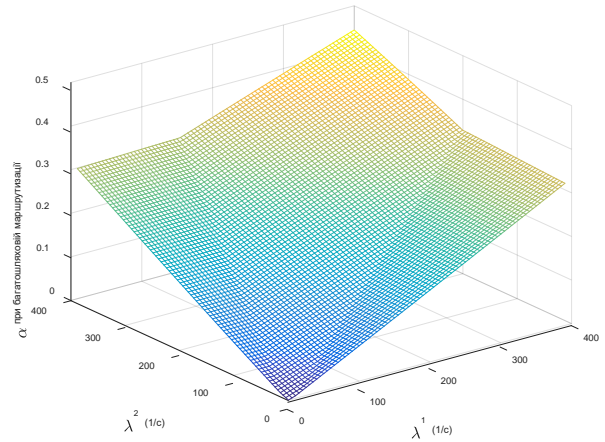
Канал зв'язку, що захищається	Виграш, %	
	min	max
$E_{1,2}$	28,57	58,33
$E_{2,3}$	28,57	61,54
$E_{1,4}$	37,5	58,33
$E_{2,5}$	47,37	58,33
$E_{3,6}$	44,44	61,54
$E_{5,4}$	37,5	61,54
$E_{5,6}$	37,5	61,54
$E_{4,7}$	23,08	37,05
$E_{5,8}$	40,17	61,54
$E_{6,9}$	44,44	61,54
$E_{7,8}$	44,44	61,54
$E_{8,9}$	28,57	61,54
$E_{7,10}$	41,18	58,33
$E_{8,11}$	44,44	61,54
$E_{9,12}$	16,67	60,55
$E_{10,11}$	41,18	58,33
$E_{11,12}$	23,08	58,33
$E_{3,13}$	47,37	61,54
$E_{13,14}$	47,37	61,54
$E_{6,14}$	47,37	61,54
$E_{14,15}$	47,37	61,54
$E_{9,15}$	47,37	61,54
$E_{15,16}$	16,67	58,33
$E_{12,16}$	28,57	58,33

Як показано на рис. 3, реалізація багатошляхової маршрутизації при TE FRR і захисті каналу $E_{8,11}$ дозволяє покращити значення критерію (16) від 44,44 до 61,54% у порівнянні з використанням одношляхової маршрутизації.

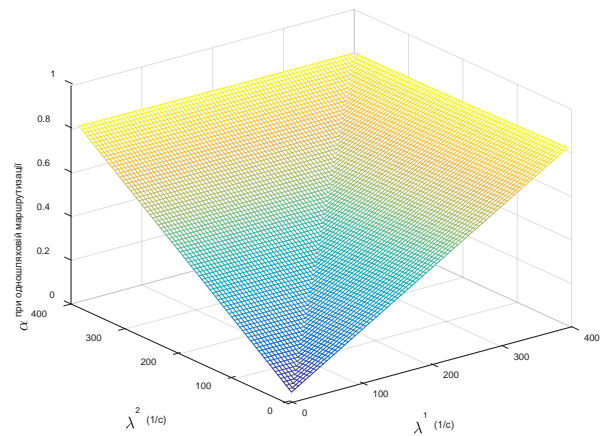
Більш докладно розглянемо випадок використання запропонованої моделі TE FRR при передачі пакетів двох потоків з інтенсивностями $\lambda^1 = 400$ 1/с та $\lambda^2 = 300$ 1/с (табл. 1). При цьому завантаженість для кожного каналу зв'язку $E_{i,j} \in E$ визначалася як

$$\alpha_{i,j} = \frac{\sum_{k \in K} u_{i,j}^k \lambda^k}{\varphi_{i,j}}. \quad (17)$$

У табл. 2 також показано порядок багатошляхової маршрутизації та балансування двох потоків за каналами зв'язку мережі з використанням запропонованої моделі TE FRR (1)-(16). При цьому α (15) є максимальним значенням серед множини коефіцієнтів $\alpha_{i,j}$ (17). Відповідно до отриманих результатів розрахунку (табл. 2), реалізація одношляхової маршрутизації при захисті каналу $E_{8,11}$ забезпечила значення $\alpha = 0.8$, тоді як використання багатошляхової маршрутизації – $\alpha = 0.39$, що на 51,25% краще, ніж при одношляховій стратегії.



а



б

Рис. 2. Залежність верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку мережі від значень інтенсивностей потоків, якщо реалізується схема захисту каналу $E_{8,11}$: а – при багатошляховій маршрутизації; б – при одношляховій маршрутизації

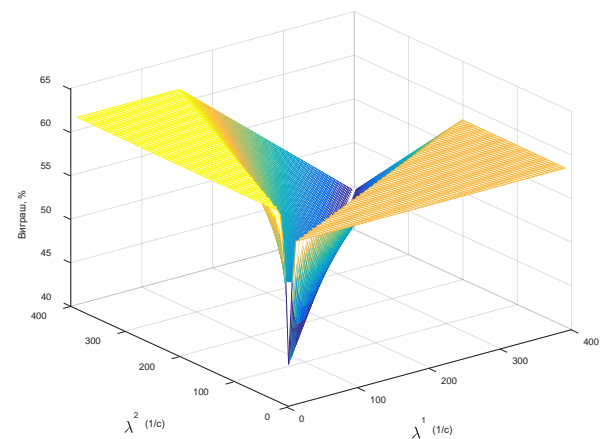


Рис. 3. Виграш за критерієм (16) від реалізації багатошляхової маршрутизації у порівнянні з використанням одношляхової маршрутизації (захист каналу $E_{8,11}$)

Таблиця 2

КЗ	Багатошляхова маршрутизація						$\alpha_{i,j}$	Одношляхова маршрутизація						$\alpha_{i,j}$
	Перший потік			Другий потік				Перший потік			Другий потік			
	ОМ	РМ	ВП	ОМ	РМ	ВП		ОМ	РМ	ВП	ОМ	РМ	ВП	
$E_{1,2}$	257,50	256,93	267,91	0	0	0	0,37	400	400	400	0	0	0	0,50
$E_{2,3}$	188,42	194,44	194,44	0	0	0	0,39	0	0	0	0	0	0	0
$E_{1,4}$	142,50	143,07	192,67	0	0	0	0,35	0	0	0	0	0	0	0
$E_{2,5}$	69,08	62,49	142,64	0	0	0	0,32	400	400	400	0	0	0	0,44
$E_{3,6}$	133,28	138,09	171,75	0	0	0	0,36	0	0	0	0	0	0	0
$E_{5,4}$	8,62	9,08	32,03	83,38	92,69	106,81	0,35	0	0	0	300	300	300	0,75
$E_{5,6}$	19,99	23,58	23,57	89,15	93,09	93,09	0,39	0	0	0	0	0	0	0
$E_{4,7}$	151,12	152,15	163,14	83,38	92,69	99,06	0,37	0	0	0	300	300	300	0,43
$E_{5,8}$	40,47	29,83	50,14	127,47	114,22	134,53	0,37	400	400	400	0	0	0	0,80
$E_{6,9}$	95,78	102,81	153,04	89,15	93,09	146,44	0,37	0	0	0	0	0	0	0
$E_{7,8}$	68,42	43,88	82,50	32,66	6,52	52,99	0,34	0	0	0	0	0	0	0
$E_{8,9}$	69,45	73,71	73,71	114,23	120,74	120,74	0,39	400	400	400	0	0	0	0,80
$E_{7,10}$	82,70	108,27	108,27	50,72	86,17	86,17	0,39	0	0	0	300	300	300	0,60
$E_{8,11}$	39,44	0	137,71	45,90	0	137,98	0,31	0	0	0	0	0	0	0
$E_{9,12}$	49,00	60,85	76,63	203,38	213,83	222,45	0,37	400	400	400	0	0	0	0,50
$E_{10,11}$	82,70	108,27	140,51	50,72	86,17	111,48	0,36	0	0	0	300	300	300	0,43
$E_{11,12}$	122,14	108,27	126,88	96,62	86,17	100,64	0,382	0	0	0	300	300	300	0,50
$E_{3,13}$	55,14	56,35	78,87	0	0	0	0,34	0	0	0	0	0	0	0
$E_{13,14}$	55,14	56,35	89,92	0	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0
$E_{6,14}$	57,49	58,86	90,32	0	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0
$E_{14,15}$	112,63	115,21	168,42	0	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0
$E_{9,15}$	116,23	115,67	175,17	0	0	0	0,34	0	0	0	0	0	0	0
$E_{15,16}$	228,86	230,88	240,10	0	0	0	0,37	0	0	0	0	0	0	0
$E_{12,16}$	171,14	169,12	183,21	0	0	0	0,37	400	400	400	0	0	0	0,67

В табл. 3 показані мінімальні та максимальні значення виграшу щодо значень критерію (16) при реалізації багатошляхової маршрутизації у порівнянні з використанням одношляхової маршрутизації при захисті кожного з вузлів мережі окремо. Таким чином, використання моделі (1)-(16) при захисті вузлів мережі дозволяє покращити критерій (16) в середньому від 31,5 до 56,3 %.

Таблиця 3

Вузол, що захищається	Виграш, %	
	min	max
R_2	28,57	58,33
R_3	28,57	61,54
R_4	23,08	37,5
R_6	33,33	61,54
R_7	23,08	37,5
R_8	30,97	60,55
R_9	16,67	60,55
R_{10}	41,18	58,33
R_{11}	41,18	58,33
R_{13}	47,37	61,54
R_{14}	47,37	61,54
R_{15}	16,67	58,33

На рис. 4, наприклад, показано, що реалізація багатошляхової маршрутизації при захисті вузла R_9 дозволяє від 16,67 до 60,55% покращити значення критерію (16) у порівнянні з одношляховою маршрутизацією.

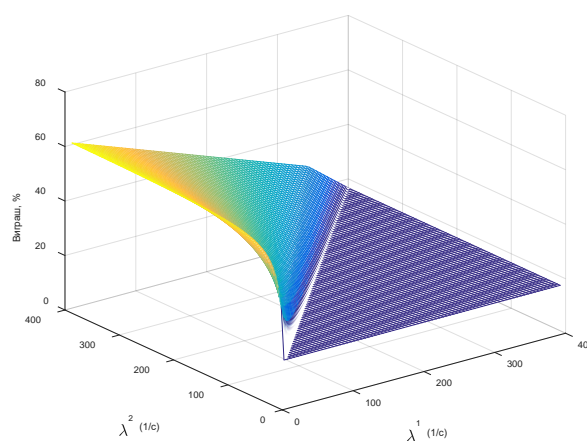


Рис. 4. Виграш за критерієм (16) від реалізації багатошляхової маршрутизації у порівнянні з використанням одношляхової маршрутизації (захист вузла R_9)

5. Висновки

Запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах, представлену виразами (1)-(9) і (12)-(16). Новизною запропонованої моделі є те, що узгоджене рішення задач по ТЕ та FRR із захистом каналу, вузла та пропускної здатності забезпечується в ході рішення задачі лінійної оптимізації. Як критерій оптимальності виступав мінімум верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку мережі (15), (16) потоками, що протікають як за основними, так і за резервними маршрутами. Перехід від нелінійних умов захисту пропускної здатності (10), (11) до лінійного аналогу (12) досягнуто шляхом деякого розширення числа змінних, що розраховуються, (13) і (14), які визначають верхній поріг для маршрутних змінних основного та резервного шляхів. Подібний підхід орієнтує на зниження обчислювальної складності при розрахунку маршрутних змінних, відповідальних за формування основного та резервного шляхів, і забезпечує збалансовану завантаженість каналів зв'язку мережі відповідно до вимог концепції Traffic Engineering.

Результати проведеного аналізу запропонованої моделі на ряді числових прикладів підтвердили її адекватність і можливість отримання оптимальних рішень задачі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах при реалізації різних схем захисту елементів мережі (каналу, вузла) та пропускної здатності. В роботі показано, що виграш від реалізації багатопотокової стратегії маршрутизації при ТЕ FRR дозволив знизити верхній поріг завантаженості каналів зв'язку в середньому від 37,12 до 59,41% при захисті каналу та від 31,5 до 56,3% при захисті вузла, що позитивно позначається і на рівні якості обслуговування в мережі в цілому.

Литература: 1. *White, R.* Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks. 1st Edition. / R. White, E. Banks. Addison-Wesley Professional, 2018. 832 p. 2. *White, R.* Navigating Network Complexity: Next-generation routing with SDN, service virtualization, and service chaining. / R. White, J.E. Tantsura. Addison-Wesley Professional, 2015. 320 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. *Stallings, W.* Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. / W. Stallings. Addison-Wesley Professional, 2015. 544 p. 5. *Alashaikh, A.* Exploring the logical layer to support differentiated resilience classes in multilayer networks / A. Alashaikh, D. Tipper, T. Gomes // Annals of Telecommunications. 2017. P. 1-17. 6. *Rak, J.* Information-driven network resilience: Research challenges and perspectives / J. Rak, D. Papadimitriou, H. Niedermayer, P. Romero // Optical Switching and Networking. January 2017. Vol. 23, part 2. P. 156-178. 7. *Lemeshko, O.* Effective solution for scalability and productivity improvement in fault-tolerant routing / O. Lemeshko, K. Arous, N. Tariki // IEEE 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2015. P.

76-78. 8. *Lemeshko, O.V.* Fault-Tolerance Improvement for Core and Edge of IP Network / O.V. Lemeshko, O.S. Yeremenko, N. Tariki, A.M. Hailan // IEEE 2016 XIth International Scientific and Technical Conference "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT), 2016. P. 161-164. 9. *Lemeshko, O.* Solution for the Default Gateway Protection within Fault-Tolerant Routing in an IP Network / O. Lemeshko, O. Yeremenko, N. Tariki // International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems. 2017. Volume 8, Number 1. P. 19-26. 10. *Papán, J.* The Survey of Current IPFRR Mechanisms / J. Papán, P. Segeč, P. Palúch, L. Mikuš, M. Moravčík // 2015 Federated Conference on Software Development and Object Technologies (SDOT 2015). Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. Vol. 511. P. 229-240. 11. *Nagy, M.* Optimization methods for improving IP-level fast protection for local shared risk groups with Loop-Free Alternates / M. Nagy, J. Tapolcai, G. Rétvári // Telecommunication Systems. May 2014. Vol. 56, Iss. 1. P. 103-119. 12. *Lemeshko, A.V.* Improvement of flow-oriented fast reroute model based on scalable protection solutions for telecommunication network elements / A.V. Lemeshko, O.S. Yeremenko, N. Tariki // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, Issue 6. P. 477-490. 13. *Yeremenko, O.S.* Fast ReRoute Scalable Solution with Protection Schemes of Network Elements / O.S. Yeremenko, O.V. Lemeshko, N. Tariki // 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON). 2017. P. 783-788. 14. *Yeremenko, O.* Research of Optimization model of Fault-Tolerant Routing with Bilinear Path Protection Criterion / O. Yeremenko, O. Lemeshko, N. Tariki, A.M. Hailan // 2017 IEEE 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT). 2017. P. 219-222. 15. *Lin, S.C.* Control traffic balancing in software defined networks / S.C. Lin, P. Wang, M. Luo // Computer Networks. September 2016. Vol. 106. P. 260-271. 16. *RFC 4090* Fast reroute extensions to RSVP-TE for LSP tunnels / P. Pan, G. Swallow, A. Atlas // Internet Engineering Task Force (IETF), May 2005. 38 p. 17. *Seok, Y.* Dynamic Constrained Traffic Engineering for Multicast Routing / Y. Seok, Y. Lee, Y. Choi, C. Kim // Information Networking: Wired Communications and Management. September 2002. Vol. 2343. P. 278-288. 18. *Wang, Y.* Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering / Y. Wang, Z. Wang // Eight International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.99EX370). 11-13 Oct. 1999. P. 582-588. 19. *Seok, Y.* Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks," / Y. Seok, Y. Lee, C. Kim, Y. Choi // in Proceedings Tenth International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.01EX495), 15-17 Oct. 2001, pp. 348-353. 20. *RFC 6805* The Application of the Path Computation Element Architecture to the Determination of a Sequence of Domains in MPLS and GMPLS / D. King, A. Farrel // Internet Engineering Task Force (IETF), November 2012. 33 p. 21. *Paolucci, F.* A survey on the path computation element (PCE) architecture / F. Paolucci, F. Cugini, A. Giorgetti, N. Sambo, P. Castoldi // IEEE Communications Surveys & Tutorials. Fourth Quarter 2013. Vol. 15, Iss. 4. P. 1819-1841. 22. *Mendiola, A.* A survey on the contributions of Software-Defined Networking to Traffic Engineering / A. Mendiola, J. Astorga, E. Jacob, M. Higuero // IEEE Communications Surveys & Tutorials. Second quarter 2017. Vol. 19, Iss. 2. P. 918-953. 23. *Prabhavat, S.* On load distribution over multipath networks / S. Prabhavat, H. Nishiyama, N. Ansari, N. Kato // IEEE Communications Surveys & Tutorials. Third Quarter 2012. Vol. 14, Iss. 3. P. 662-680. 24. *Wang, N.* An overview of routing optimization for internet traffic engineering / N. Wang, K. Ho, G. Pavlou, M. Howarth // IEEE Communications Surveys & Tutorials. First Quarter 2008. Vol. 10, Iss. 1. P. 36-56. 25. *Lemeshko, O.* Two-level Method of Fast ReRouting in Software-Defined Net-

works / O. Lemeshko, O. Yeremenko, A.M. Hailan // 2017 Fourth International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T). 2017. P. 376-379. 26. *Lemeshko, O.* Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks / O. Lemeshko, O. Yeremenko // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING. 2017. Vol. 68, Iss. 6. P. 444–454.

Транслітерований список літератури:

1. *White, R.* Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks. 1st Edition. / R. White, E. Banks. Addison-Wesley Professional, 2018. 832 p.
2. *White, R.* Navigating Network Complexity: Next-generation routing with SDN, service virtualization, and service chaining. / R. White, J.E. Tantsura. Addison-Wesley Professional, 2015. 320 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. *Stallings, W.* Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. / W. Stallings. Addison-Wesley Professional, 2015. 544 p.
5. *Alashaikh, A.* Exploring the logical layer to support differentiated resilience classes in multilayer networks / A. Alashaikh, D. Tipper, T. Gomes // Annals of Telecommunications. 2017. P. 1-17.
6. *Rak, J.* Information-driven network resilience: Research challenges and perspectives / J. Rak, D. Papadimitriou, H. Niedermayer, P. Romero // Optical Switching and Networking. January 2017. Vol. 23, part 2. P. 156-178.
7. *Lemeshko, O.* Effective solution for scalability and productivity improvement in fault-tolerant routing / O. Lemeshko, K. Arous, N. Tariki // IEEE 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2015. P. 76-78.
8. *Lemeshko, O.V.* Fault-Tolerance Improvement for Core and Edge of IP Network / O.V. Lemeshko, O.S. Yeremenko, N. Tariki, A.M. Hailan // IEEE 2016 XIth International Scientific and Technical Conference "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT), 2016. P. 161-164.
9. *Lemeshko, O.* Solution for the Default Gateway Protection with Fault-Tolerant Routing in an IP Network / O. Lemeshko, O. Yeremenko, N. Tariki // International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems. 2017. Volume 8, Number 1. P. 19-26.
10. *Papán, J.* The Survey of Current IPFRR Mechanisms / J. Papán, P. Segeč, P. Palúch, L. Mikuš, M. Moravčík // 2015 Federated Conference on Software Development and Object Technologies (SDOT 2015). Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. Vol. 511. P. 229-240.
11. *Nagy, M.* Optimization methods for improving IP-level fast protection for local shared risk groups with Loop-Free Alternates / M. Nagy, J. Tapolcai, G. Rétvári // Telecommunication Systems. May 2014. Vol. 56, Iss. 1. P. 103-119.
12. *Lemeshko, A.V.* Improvement of flow-oriented fast reroute model based on scalable protection solutions for telecommunication network elements / A.V. Lemeshko, O.S. Yeremenko, N. Tariki // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, Issue 6. P. 477-490. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i6.30

13. *Yeremenko, O.S.* Fast ReRoute Scalable Solution with Protection Schemes of Network Elements / O.S. Yeremenko, O.V. Lemeshko, N. Tariki // 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON). 2017. P. 783-788.

14. *Yeremenko, O.* Research of Optimization model of Fault-Tolerant Routing with Bilinear Path Protection Criterion / O. Yeremenko, O. Lemeshko, N. Tariki, A.M. Hailan // 2017 IEEE 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT). 2017. P. 219–222.

15. *Lin, S.C.* Control traffic balancing in software defined networks / S.C. Lin, P. Wang, M. Luo // Computer Networks. September 2016. Vol. 106. P. 260-271.

16. *RFC 4090* Fast reroute extensions to RSVP-TE for LSP tunnels / P. Pan, G. Swallow, A. Atlas // Internet Engineering Task Force (IETF), May 2005. 38 p.

17. *Seok, Y.* Dynamic Constrained Traffic Engineering for Multicast Routing / Y. Seok, Y. Lee, Y. Choi, C. Kim // Information Networking: Wired Communications and Management. September 2002. Vol. 2343. P. 278-288.

18. *Wang, Y.* Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering / Y. Wang, Z. Wang // Eight International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.99EX370). 11-13 Oct. 1999. P. 582-588.

19. *Seok, Y.* Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks," / Y. Seok, Y. Lee, C. Kim, Y. Choi // in Proceedings Tenth International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No.01EX495), 15-17 Oct. 2001, pp. 348-353.

20. *RFC 6805* The Application of the Path Computation Element Architecture to the Determination of a Sequence of Domains in MPLS and GMPLS / D. King, A. Farrel // Internet Engineering Task Force (IETF), November 2012. 33 p.

21. *Paolucci, F.* A survey on the path computation element (PCE) architecture / F. Paolucci, F. Cugini, A. Giorgetti, N. Sambo, P. Castoldi // IEEE Communications Surveys & Tutorials. Fourth Quarter 2013. Vol. 15, Iss. 4. P. 1819-1841.

22. *Mendiola, A.* A survey on the contributions of Software-Defined Networking to Traffic Engineering / A. Mendiola, J. Astorga, E. Jacob, M. Higuero // IEEE Communications Surveys & Tutorials. Second quarter 2017. Vol. 19, Iss. 2. P. 918-953.

23. *Prabhavat, S.* On load distribution over multipath networks / S. Prabhavat, H. Nishiyama, N. Ansari, N. Kato // IEEE Communications Surveys & Tutorials. Third Quarter 2012. Vol. 14, Iss. 3. P. 662-680.

24. *Wang, N.* An overview of routing optimization for internet traffic engineering / N. Wang, K. Ho, G. Pavlou, M. Howarth // IEEE Communications Surveys & Tutorials. First Quarter 2008. Vol. 10, Iss. 1. P. 36-56.

25. *Lemeshko, O.* Two-level Method of Fast ReRouting in Software-Defined Networks / O. Lemeshko, O. Yeremenko, A.M. Hailan // 2017 Fourth International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T). 2017. P. 376-379.

26. *Lemeshko, O.* Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks / O. Lemeshko, O. Yeremenko // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING. 2017. Vol. 68, Iss. 6. P. 444–454.

Надійшла до редколегії 11.12.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Безрук В.М.

Лемешко Олександр Віталійович, д-р техн. наук, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії ХНУРЕ. Наукові інтереси: управління трафіком, оптимізація в телекомунікаціях, маршрутизація, трафік інжиніринг, QoS, QoE, ієрархічна маршрутизація, відмовостійка маршрутизація. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14, тел. +380577021320, e-mail: oleksandr.lemeshko.ua@ieee.org.

Єременко Олександра Сергіївна, канд. техн. наук., доцент, с.н.с., докторант кафедри інфокомунікаційної інженерії ХНУРЕ. Наукові інтереси: NGN, Future Internet, якість обслуговування, управління трафіком, відмовостійка маршрутизація, мережна безпека. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14, тел. +380577021320, e-mail: oleksandra.yeremenko.ua@ieee.org.

Oleksandr Lemeshko, Dr.Sc., Professor, Professor of the Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Research interests: Traffic Management, Optimization in Telecommunications, Routing, Traffic Engineering, QoS, QoE, Hierarchical Routing, Fault-Tolerant Routing. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021320, e-mail: oleksandr.lemeshko.ua@ieee.org.

Oleksandra Yeremenko, Cand.Sc., Associate Professor, Senior Researcher, Doctoral Candidate of the Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Research interests: NGN, Future Internet, Quality of Service, Traffic Management, Fault-Tolerant Routing, Network Security. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021320, e-mail:oleksandra.yeremenko.ua@ieee.org.