

О. С. ЄРЕМЕНКО, М. О. ЄВДОКИМЕНКО, Б. СЛЕЙМАН

УДОСКОНАЛЕНА МОДЕЛЬ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ З РЕАЛІЗАЦІЄЮ СХЕМИ ЗАХИСТУ ШЛЯХУ ТА ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ

Предметом дослідження в статті є процеси швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності. **Мета** роботи – вдосконалення моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності, яка може бути використана для програмно-конфігурованих мереж. У статті вирішуються наступні **завдання**: вдосконалення та дослідження математичної моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності. Використовуються такі **методи**: теорія графів, теорія масового обслуговування та методи математичного програмування. Отримано наступні **результати**: вдосконалено та досліджено математичну модель швидкої перемаршрутизації, яка завдяки введенню додаткових умов дозволяє реалізувати схему захисту шляху $1:n$ та пропускну здатність у програмно-конфігурованих мережах. **Висновки**: В рамках запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності було вирішено завдання розрахунку множини основних і резервних шляхів, що не перетинаються, яке зводилося до розв'язання оптимізаційної задачі цілочисельного лінійного програмування. Перевагою вдосконаленої моделі є можливість реалізації схем захисту $1:1, 1:2, \dots, 1:n$ без введення додаткової множини керуючих (маршрутних) змінних, що сприяє зменшенню розмірності оптимізаційної задачі, що розв'язується, та обчислювальної складності її практичної реалізації. Критерій оптимальності маршрутних рішень сприяє формуванню основних і резервних шляхів, що не перетинаються, з максимально високою пропускною здатністю. У цьому випадку шлях з найвищою пропускною здатністю буде відповідати основному шляху, тоді як решта шляхів будуть використовуватися як резервні в порядку зменшення їх пропускної здатності. Загальна кількість обчислених шляхів, що не перетинаються, залежить від обраної схеми надмірності.

Ключові слова: програмно-конфігурована мережа; швидка перемаршрутизація; захист шляху; пропускна здатність.

Вступ

Як відомо, останні декілька років популярність програмно-конфігурованих мереж (Software-Defined Networks, SDN) стрімко зростає. Це обумовлено багатьма перевагами SDN у порівнянні з традиційними телекомунікаційними мережами (ТКМ), особливо з точки зору гнучкості управління для оптимізації мережі та процесів, які в ній протікають [1-4]. Однак, однією з основних проблем як у ТКМ, так і в SDN досі залишаються питання щодо забезпечення відмовостійкості мережі. Виходячи з того, що в SDN здійснюється розподіл площини даних і площини управління, у разі відмови того чи іншого елемента мережі (каналу, вузла, сегмента або цілого шляху) SDN контролер повинен вжити певних заходів для швидкого відновлення передачі уражених потоків пакетів [5-7]. При цьому, кількість і тип таких відмов, а також необхідність реконфігурації та перемаршрутизації потоків пакетів збільшує навантаження на контролери мережі, що так само може призвести до перевантаження самого контролера. З огляду на те, що постійна реконфігурація мережі є досить складним і тривалим завданням, найбільш ефективним є використання механізмів швидкої перемаршрутизації (Fast ReRoute, FRR). Загалом існуючі механізми швидкої перемаршрутизації для мереж IP/MPLS можна перенести на SDN, але в цьому випадку слід враховувати обмеження маршрутних таблиць OpenFlow-комутаторів і складність реалізації FRR [5, 6].

Під час швидкої перемаршрутизації реалізація основних схем захисту мережних елементів від збоїв є ключовою технологічною проблемою при розгортанні

як корпоративних, так і глобальних SDN різних типів [7]. Додатково мультисервісність сучасних мереж вимагає впровадження не лише схем захисту їх топологічних елементів – каналу, вузла, шляху, але й захисту рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS) у мережі в цілому [6, 8]. Для цього основним кроком забезпечення QoS є захист пропускної здатності [9–13] з подальшою перспективою захисту інших показників QoS, таких як середня міжкінцева затримка та прийнятний рівень втрат пакетів [8-10].

Слід зазначити, що рішення, пов'язані з FRR, можуть підтримувати наступні схеми резервування залежно від вимог до відмовостійкості [11, 12]:

- схема $1+1$, в якій потік даних передається як основним, так і резервним маршрутами;
- схема $1:1$, коли для кожного основного маршруту створюється резервний маршрут, яким дані будуть передані у разі відмови основного шляху;
- схема $n:1$, в якій створюється один резервний шлях для n основних шляхів (facility backup);
- схема $1:n$, в якій n резервних шляхів створюються для одного основного маршруту;
- схема $n:m$, яка є найпоширенішим випадком, коли підтримуються m резервних для n основних маршрутів.

Треба також зауважити, що досить часто під час реалізації FRR виникає задача розрахунку множини шляхів, що не перетинаються [11, 12, 14–18]. Така постановка задачі відповідає вимогам підвищення відмовостійкості маршрутних рішень, особливо коли потрібен захист шляхів та їх пропускної здатності. Отже, науково-практичне завдання розробки та дослідження моделі Fast ReRoute з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності, яка може бути

використана як в MPLS, так і в SDN, є актуальним. Крім того, запропонована модель повинна забезпечувати масштабованість отриманих рішень і низьку обчислювальну складність її подальшої протокольної реалізації.

Аналіз існуючих рішень щодо швидкої перемаршрутизації

Аналіз існуючих рішень показав актуальність розробки підходів щодо швидкої перемаршрутизації в напрямку впровадження в SDN [9–13, 19–26]. Загалом сучасні підходи до використання механізмів швидкої перемаршрутизації в SDN при реалізації різних схем захисту елементів мережі, таких як класичні (канал, вузол тощо) і особливі схеми для цього типу мереж, можна розділити на евристичні, графові та поточкові [7, 9–12, 14–18, 26]. Наразі найпоширенішими методами щодо реалізації стратегії FRR є евристичні підходи, а серед схем підвищення відмовостійкості все ще переважає забезпечення локального захисту (каналу, вузла чи контролера). Однак відомо, що найбільш перспективними є поточкові підходи, які, як правило, базуються на оптимізаційній постановці задач маршрутизації, які спрямовані на ефективне використання доступних мережних ресурсів [9–13, 18, 26].

Одним з недоліків існуючих рішень використання швидкої перемаршрутизації у програмно-конфігурованих мережах є те, що реалізація схеми захисту шляху зі схемою надмірності $1:n$, як правило, призводить до збільшення в n разів розмірності оптимізаційної задачі при обчисленні маршрутів [7, 9, 10, 18]. А якщо запропоновано рішення для багатошляхової FRR, то це часто призводить до необхідності формулювання та вирішення нелінійної задачі оптимізації. Ці фактори дуже критично впливають на обчислювальну складність і масштабованість протокольних рішень маршрутизації, які повинні бути централізовано оброблені контролером SDN.

Таким чином, для розробленої моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності, яка може бути основою для перспективних протоколів при впровадженні відмовостійких SDN і гібридних SDN (Hybrid SDN), сформульовано наступні вимоги

- врахування поточної природи трафіка;
- реалізація як класичних схем захисту елементів мережі (канал, вузол, шлях), так і здійснення захисту пропускної здатності мережі;
- лінійність оптимізаційної задачі і масштабоване збільшення її розмірності.

Модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності

Модель, що представлена в [11] та пропонується для подальшої модифікації, буде використана для обчислення множини основних і резервних маршрутів, що не перетинаються, в умовах реалізації

швидкої перемаршрутизації з орієнтацією на максимальну пропускну здатність шляху.

В межах модифікованої моделі мережна структура описується графом $G = (R, E)$, в якому $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$ – множина вершин, що представляють маршрутизатори мережі, а $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина дуг, що представляють канали зв'язку. Нехай кожен k -й потік пакетів для передачі в мережі асоціюється з низкою функціональних параметрів: s_k – вузол-відправник; d_k – вузол-отримувач; K – множина потоків у мережі ($k \in K$). Крім того, значення $\phi_{i,j}^k$ відповідає пропускній здатності каналу $E_{i,j} \in E$, доступній для k -го потоку. Також позначимо Bw^k як вимоги щодо пропускної здатності для k -го потоку.

В результаті розв'язання задачі обчислення множини основних і резервних шляхів, що не перетинаються, необхідно розрахувати множину змінних $a_{i,j}^k$, кожна з яких визначає належність каналу $E_{i,j} \in E$ до множини обчислених шляхів, що не перетинаються, при передачі k -го потоку. Кількість керуючих змінних $a_{i,j}^k$ відповідає добутку $|K| \cdot |E|$.

Маршрутні змінні $a_{i,j}^k$ мають наступні обмеження:

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

Також для вузлів відправника та отримувача повинні виконуватися наступні умови [11]:

$$\sum_{j: E_{i,j} \in E} a_{i,j}^k = M^k; k \in K, R_i = s_k; \quad (2)$$

$$\sum_{j: E_{j,i} \in E} a_{j,i}^k = M^k; k \in K, R_i = d_k, \quad (3)$$

де M^k – ціле число, що характеризує кількість основних і резервних шляхів ($M^k > 1$), що не перетинаються та використовується під час реалізації швидкої перемаршрутизації залежно від обраного типу схеми резервування. При цьому M^k визначається як:

$$M^k = n + 1, \quad (4)$$

де n – кількість резервних шляхів, що відносяться до основного шляху відповідно до схеми резервування ($1:1, 1:2, \dots, 1:n$), яку необхідно реалізувати.

Водночас для транзитних вузлів у мережі ($R_i \neq s_k, d_k$) встановлені наступні обмеження [11]:

$$\begin{cases} \sum_{j: E_{i,j} \in E} a_{i,j}^k \leq 1, & k \in K; \\ \sum_{j: E_{j,i} \in E} a_{j,i}^k \leq 1, & k \in K; \\ \sum_{j: E_{i,j} \in E} a_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} a_{j,i}^k = 0, & k \in K. \end{cases} \quad (5)$$

Нехай величина β є нижнім граничним значенням для пропускної здатності каналів, що входять до результуючого рішення FRR. Воно визначає пропускну здатність найменш продуктивного розрахованого маршруту. Тоді слід виконати наступну умову (за аналогією з [11, 18]):

$$a_{i,j}^k \varphi_{i,j} + W(1 - a_{i,j}^k) \geq \beta, \quad (6)$$

де W – ваговий коефіцієнт, який відповідає значенню пропускної здатності найбільш продуктивного каналу. Тоді умову захисту пропускної здатності мережі можна сформулювати таким чином:

$$\beta \geq Bw^k. \quad (7)$$

Як перший критерій оптимальності рішень задачі FRR було обрано максимум функції:

$$J_1 = \beta. \quad (8)$$

Другий критерій оптимальності маршрутних рішень пов'язаний з максимізацією модифікованої по відношенню до (8) цільової функції:

$$J_2 = c_\beta \beta - c_w \sum_{E_{i,j} \in E} w_{i,j} a_{i,j}^k, \quad (9)$$

де вагові коефіцієнти c_β та c_w визначають важливість кожного з доданків, які входять до виразу (9).

У першому випадку (8) забезпечується максимізація нижнього граничного значення пропускної здатності кожного з множини розрахованих шляхів – основного та резервних. Якщо обмежитись використанням критерію (8), то найменш продуктивний шлях матиме пропускну здатність, яка дорівнює значенню β . З іншого боку, використання критерію (8) не завжди сприяє отриманню рішення, коли множини розрахованих шляхів утворюють найбільш продуктивні канали зв'язку. Це обумовлено тим, що пропускну здатність маршруту визначає включений до нього канал з найменшою пропускну здатністю.

Тому новизною вдосконаленої моделі є використання другого члена в критерії (9), який вводиться за аналогією до метрик протоколів маршрутизації OSPF та EIGRP для включення в розраховані маршрути каналів з високою пропускну здатністю. Тому пропонується використовувати в цільовій функції (9) вагові коефіцієнти $w_{i,j} = 10/\varphi_{i,j}$. Таким чином, завдання обчислення множини найбільш продуктивних основного та резервних шляхів для реалізації швидкої перемаршрутизації зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування (Mixed Integer Linear Programming, MILP) з критерієм (9) за наявності лінійних обмежень (1)–(7), оскільки змінні маршрутизації є булевими, а змінна β – дійсне число. Введені умови (1)–(5) відповідають за реалізацію схеми захисту шляху, а умови (6), (7) – пропускної здатності мережі. Для реалізації обчислення

запропонованої моделі в реальному часі сформульована задача MILP повинна розв'язуватися евристичними методами, наприклад, з використанням алгоритмів оптимізації мурашиної колонії, імітації відпалу, мереж Хопфілда тощо [27–29]. Експериментально встановлено, що вагові коефіцієнти у виразі (9) повинні відповідати такій умові: $c_\beta \gg c_w$.

В результаті розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі отримується множина маршрутів, що не перетинаються. З цієї множини маршрут з максимальною пропускну здатністю буде відповідати основному шляху, тоді як решта маршрутів будуть використовуватися як резервні шляхи у порядку зменшення їх пропускної здатності. Кожен з розрахованих маршрутів буде мати необхідну пропускну здатність завдяки забезпеченню виконання умови (7). У загальному випадку сумарна кількість обчислених шляхів залежить від обраної схеми резервування (1:1, 1:2, ..., 1:n).

Дослідження та порівняльний аналіз отриманих маршрутних рішень

У процесі дослідження проводилось порівняння маршрутних рішень, які отримувались за допомогою моделі (1)–(7) при використанні критеріїв оптимальності (8) та (9) для різних структур мережі та схем резервування – 1:2 і 1:3. Для прикладу, результати дослідження будуть продемонстровані на структурі мережі, яка наведена на рис. 1. У розривах каналів зв'язку вказані їхні пропускі здатності (1/c).

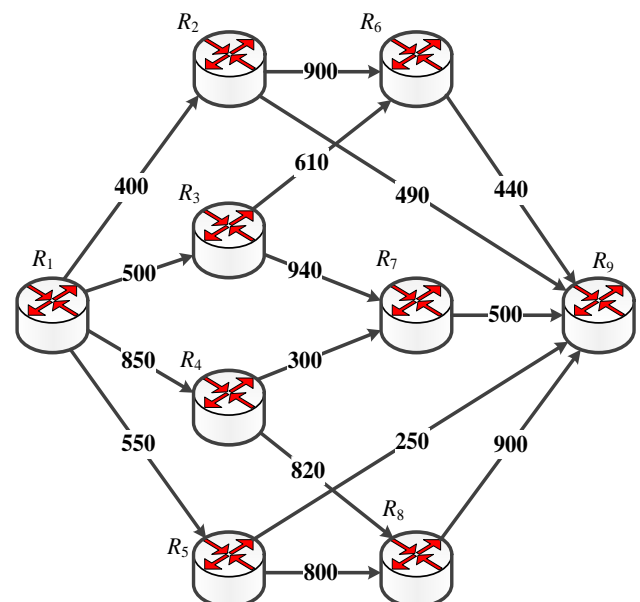


Рис. 1. Вихідна структура мережі

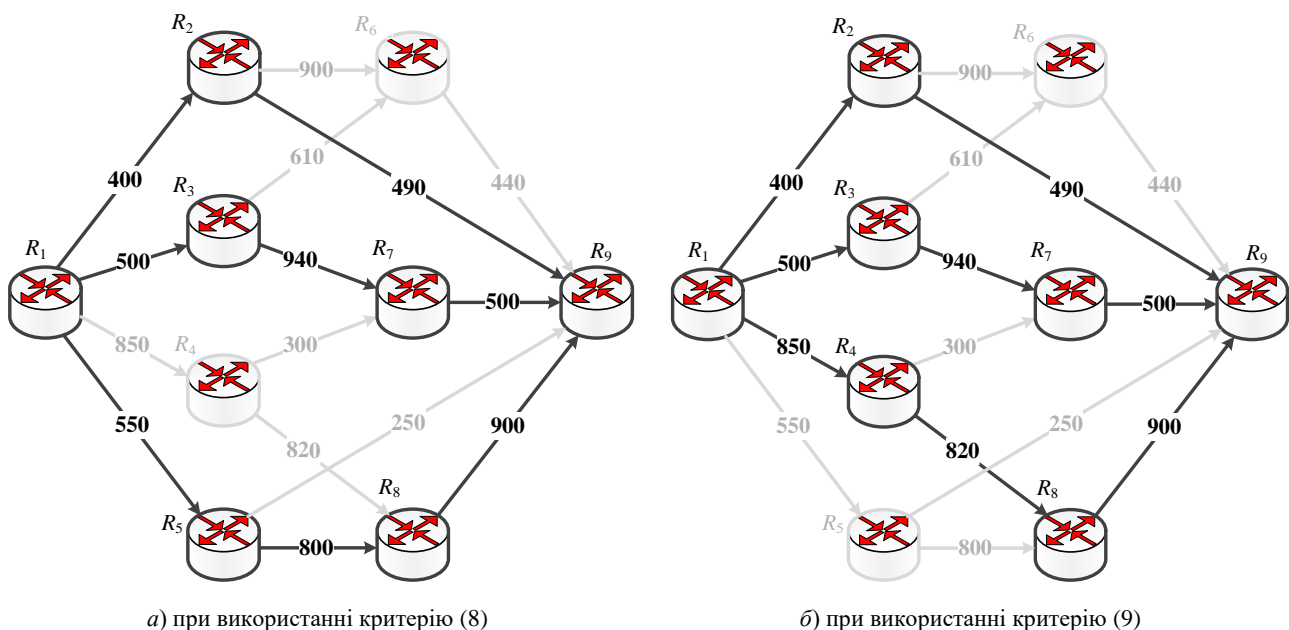
В загальному випадку між першим і дев'ятим маршрутизаторами може бути встановлено вісім маршрутів, які можуть перетинатись за вузлами та/або за каналами. Характеристики цих шляхів наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики шляхів між першим і дев'ятим маршрутизаторами для структури мережі, представлені на рис. 1

Номер шляху	Позначення шляху	Множина каналів, що утворюють шлях	Пропускна здатність шляху, 1/с
1	L_1	$\{E_{1,2}, E_{2,6}, E_{6,9}\}$	400
2	L_2	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400
3	L_3	$\{E_{1,3}, E_{3,6}, E_{6,9}\}$	440
4	L_4	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500
5	L_5	$\{E_{1,4}, E_{4,7}, E_{7,9}\}$	300
6	L_6	$\{E_{1,4}, E_{4,8}, E_{8,9}\}$	820
7	L_7	$\{E_{1,5}, E_{5,9}\}$	250
8	L_8	$\{E_{1,5}, E_{5,8}, E_{8,9}\}$	550

Нехай у першому випадку необхідно реалізувати схему резервування 1:2 при передачі пакетів з інтенсивністю $r=390$ 1/с від першого маршрутизатора до дев'ятого. Таким чином, вимоги щодо величини пропускної здатності мережі, яка захищається в процесі швидкої перемаршрутизації, визначається на рівні $B_w = 390$ 1/с. Використання розрахункової моделі (1)-(7) з критерієм оптимальності (8) визначило для реалізації схеми резервування 1:2 три шляхи, які не перетинаються: L_2 , L_4 та L_8 (рис. 2 а). Кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг $\beta=400$ 1/с, тобто умови (6) і (7) виконувались і реалізувалась швидка перемаршрутизація із захистом пропускної здатності мережі. При цьому маршрут L_8 доцільно обрати основним, L_4 – першим резервним, а L_2 – другим резервним шляхом.

резервним шляхом відповідно до зростання їх пропускних здатностей. Використання розрахункової моделі (1)–(7), але вже з критерієм оптимальності (9) визначило для реалізації схеми резервування 1:2 також три шляхи, які не перетинаються: L_2 , L_4 та L_6 (рис. 2 б). Як і в попередньому випадку кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг $\beta=400$ 1/с. При цьому маршрут L_6 доцільно обрати основним, L_4 – першим резервним, а L_2 – другим резервним шляхом. Варто зауважити, що використання критерію оптимальності маршрутичних рішень (9) дозволило обрати основним шляхом значно продуктивніший маршрут L_6 з пропускну здатністю 820 1/с замість L_8 (550 1/с).

**Рис. 2.** Множина шляхів, що не перетинаються, для швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми 1:2

В табл. 2 представлено результати розрахунку шляхів, що не перетинаються, при використанні моделі (1)–(7) та критеріїв оптимальності (8) і (9) для реалізації схеми резервування 1:2. При цьому для кожного з маршрутів вказано середню міжкінцеву затримку пакетів, якщо ним буде протікати потік пакетів з інтенсивністю $\lambda=390$ 1/с. Як показано в табл. 2, використання критерію оптимальності (9) дозволяє забезпечити розрахунок основного та множини резервних шляхів не тільки із заданою пропускною здатністю, але й покращити ще один

ключовий показник якості обслуговування – середню міжкінцеву затримку пакетів. Цей показник у межах проведеного дослідження розраховувався як сума середніх затримок пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів та в каналах зв'язку, що створювали той чи інший маршрут. При цьому робота кожного з інтерфейсів, для прикладу, моделювалась системою масового обслуговування М/М/1, що не впливало на загальність отриманих результатів розрахунків. Так для основного маршруту вдалось знизити середню міжкінцеву затримку пакетів майже на 40%.

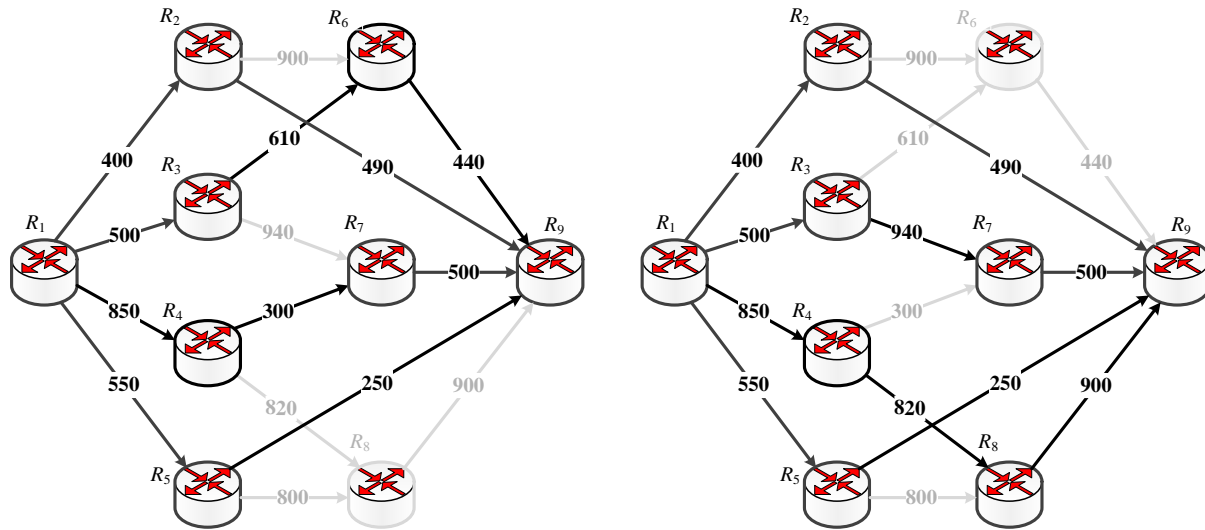
Таблиця 2. Результати розрахунку шляхів, що не перетинаються, при використанні моделі (1)–(7) і критеріїв оптимальності (8) і (9) для реалізації схеми резервування 1:2

Розраховані шляхи	Тип шляху	Канали зв'язку, що створюють шлях	Пропускна здатність шляху, 1/с	Середня затримка пакетів вздовж шляху, мс
з використанням критерію оптимальності (8)				
L_8	основний	$\{E_{1,5}, E_{5,8}, E_{8,9}\}$	550	10,6
L_4	перший резервний	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500	20
L_2	другий резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	110
з використанням критерію оптимальності (9)				
L_6	основний	$\{E_{1,4}, E_{4,8}, E_{8,9}\}$	820	6,5
L_4	перший резервний	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500	20
L_2	другий резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	110

Нехай у другому випадку необхідно було реалізувати схему резервування 1:3 при передачі потоку пакетів з інтенсивністю 240 1/с від першого маршрутизатора до дев'ятого. Таким чином, вимоги щодо величини пропускної здатності мережі, яка захищається в процесі швидкої перемаршрутизації, визначалась вже на рівні $B_w = 240$ 1/с. У цьому випадку застосування моделі (1)–(7) з критерієм оптимальності (8) визначило чотири шляхи, що не перетинались: L_2 , L_3 , L_5 та L_7 (рис. 3 а). Кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг $\beta = 250$ 1/с, тобто виконувались умови (6), (7) та реалізувалась швидка перемаршрутизація із захистом пропускної здатності мережі. Виходячи з даних про пропускну здатності цих шляхів, маршрут L_3 доцільно обрати основним, L_2 – першим резервним, L_5 – другим резервним, а L_7 – третім резервним шляхом. Використання критерію оптимальності (9) визначило для реалізації схеми резервування 1:3 також чотири маршрути, що не перетинались: L_2 , L_4 ,

L_6 та L_7 (рис. 3 б). Як і в попередньому випадку, кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг $\beta = 250$ 1/с. При цьому маршрут L_6 доцільно обрати основним, а L_4 – першим, L_2 – другим та L_7 – третім резервними шляхами.

Варто зазначити, що для реалізації схеми резервування 1:3 використання критерію оптимальності маршрутичних рішень (9) дозволило обрати не тільки основний, але й перший та другий резервні маршрути, які мали більшу пропускну здатність (табл. 1), аніж у випадку використання критерію (8). Ця перевага також позначилась і на відповідних значеннях середніх міжкінцевих затримок пакетів, які передавались як за основним, так і за більшістю резервних шляхів (табл. 3). Так для основного маршруту вдалось знизити середню міжкінцеву затримку пакетів майже на 57,4%, для першого резервного – на 11,7%, а для другого резервного – на 53,6%.



а) при використанні критерію (8)

б) при використанні критерію (9)

Рис. 3. Множина шляхів, що не перетинаються, для швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми 1:3**Таблиця 3.** Результати розрахунку шляхів, що не перетинаються, при використанні моделі (1)-(7) і критеріїв оптимальності (8) і (9) для реалізації схеми резервування 1:3

Розраховані шляхи	Тип шляху	Канали зв'язку, що створюють шлях	Пропускна здатність шляху, 1/с	Середня затримка пакетів вздовж шляху, мс
з використанням критерію оптимальності (8)				
L_3	основний	$\{E_{1,3}, E_{3,6}, E_{6,9}\}$	440	11,5
L_2	перший резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	10,3
L_5	другий резервний	$\{E_{1,4}, E_{4,7}, E_{7,9}\}$	300	22,2
L_7	третій резервний	$\{E_{1,5}, E_{5,9}\}$	250	103,2
з використанням критерію оптимальності (9)				
L_6	основний	$\{E_{1,4}, E_{4,8}, E_{8,9}\}$	820	4,9
L_4	перший резервний	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500	9,1
L_2	другий резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	10,3
L_7	третій резервний	$\{E_{1,5}, E_{5,9}\}$	250	103,2

Висновки

У роботі запропоновано вдосконалення потокової моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху 1:n та його пропускної здатності. Дана математична модель представлена умовами (1)-(7) і (9), що дозволило звести рішення технологічної задачі швидкої перемаршрутизації до розв'язання оптимізаційної задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування з модифікованим критерієм оптимальності (9) за наявності лінійних обмежень (1)-(7), оскільки маршрутні змінні (1) – булеві, а нижня

границя пропускної здатності основного та множини резервних маршрутів (7) – дійсне число.

До переваг запропонованої моделі варто віднести те, що реалізація схеми захисту шляху 1:n не призводить до пропорційного збільшення розмірності оптимізаційної задачі у порівнянні з рішеннями, що описані в роботах [7, 9, 10, 18]. Модифікація використаного критерію оптимальності (9) направлена на те, щоб множина розрахованих шляхів (основного та резервних) містила маршрути, які не тільки відповідали вимогам щодо пропускної здатності (7), але й включали в себе найбільш продуктивні канали зв'язку, що позитивно впливало на рівень якості обслуговування, наприклад, за показником середньої

міжкінцевої затримки пакетів (табл. 2 та табл. 3). Оскільки всі розраховані шляхи мали пропускну здатність не гіршу за заданий поріг (7), то шлях, який забезпечував найменше значення середньої міжкінцевої затримки пакетів, обирався основним. Решта маршрутів використовувались як резервні відповідно до схеми захисту 1:n у порядку зростання середньої міжкінцевої затримки пакетів, які передавались вздовж цих шляхів.

Лінійність запропонованої потокової моделі (1)-(7), (9) та зменшення кількості маршрутних змінних (1), які підлягали розрахунку, сприяло зниженню складності її обчислювальної реалізації при практичному використанні як частини програмного

забезпечення маршрутизаторів або SDN-контролерів, на які покладаються функції щодо організації швидкої перемаршрутизації в мережі.

Перспектива подальших досліджень в цій області, перш за все, стосується підтримки багатошляхових стратегій маршрутизації, а також реалізації схем захисту не тільки такого важливого показника якості обслуговування, як пропускну здатність, але й інших QoS-показників – середньої затримки, джитеру, ймовірності втрат пакетів, а також значень показників якості сприйняття (QoE) та мережної безпеки, що особливо актуально при передачі мультимедійного трафіка та конфіденційних даних.

References

- White, R., Banks, E. (2018), *Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks*, 1st ed., Addison-Wesley Professional, 832 p.
- Blokdyk, G. (2018), *SD-WAN A Complete Guide*, Edition Paperback, 300 p.
- Abd Elazim, N. M., Sobh, M. A., Bahaa-Eldin, A. M. (2018), "Software Defined Networking: Attacks and Countermeasures", in *Proc. 2018 13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, P. 555–567. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCES.2018.8639429>
- Prajapati, A., Sakadasariya, A., Patel, J. (2018), "Software defined network: Future of networking", in *Proc. 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, P. 1351–1354. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399028>
- Kim, T., Nguyen-Duc, T. (2018), "OQR: On-demand QoS Routing without Traffic Engineering in Software Defined Networks", in *Proc. 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, P. 362–365. DOI: <https://doi.org/10.1109/NETSOFT.2018.8460088>
- Linkov, I. (2019), *Cyber Resilience of Systems and Networks (Risk, Systems and Decisions)*, 1st ed. Kindle Edition, 475 p.
- Rak, J. (2015), *Resilient Routing in Communication Networks*. 1st edition, Springer, 179 p.
- Lemeshko, A. V., Evseeva, O. Yu., Garkusha, S. V. (2014), "Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greater Number of Indices", *Telecommunications and RadioEngineering*, Vol. 73, Issue 15, P. 1339–1360. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30>
- Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Shapovalova, A., Hailan, A.M., Mersni, A. (2019), "Cyber Resilience Approach Based on Traffic Engineering Fast ReRoute with Policing", in *Proc. 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, P. 117–122. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924294>
- Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O. (2019), "Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 127–134. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.127>
- Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Sleiman, B. (2019), "Enhanced Solution of the Disjoint Paths Set Calculation for Secure QoS Routing", in *Proc. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, P. 1–4.
- Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Sleiman, B., Hailan, A.M., Mersni, A. (2019), "Computation Method of Disjoint Paths under Maximum Bandwidth Criterion", in *Proc. 3rd IEEE International Conference Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, P. 161–164. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2019.8847756>
- Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Naors, Y. A. A. (2018), "Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, Issue 2 (95), P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>
- Chang, Z., Zhao, G., Sun, Y. (2013), "A Calculation Method for The Reliability of a Complex k-out-of-n System," in *Proc. 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, P. 204–207.
- Shi, Y. (2010), "Calculation of Network System Reliability Based on Improved Disjointed Minimal Path Set," in *Proc. 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, P. 1–4.
- Guo, L. (2016), "Efficient approximation algorithms for computing k disjoint constrained shortest paths", *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol. 32, Issue 1, P. 144–158.
- Yu, Z., Ni, M., Wang, Z., Huang, H. (2011), "Heuristic algorithm for K-disjoint QoS routing problem. Computational Sciences and Optimization (CSO)", In *Proc. of the Fourth International Joint Conference*, P. 353–356. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSO.2011.145>
- Cruz, P., Gomes, T., Medhi, D. (2014), "A Heuristic for Widest Edge-disjoint Path Pair Lexicographic Optimization," in *Proc. 2014 6th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM)*, P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1109/RNDM.2014.7014925>
- Guck, J. W., Bemtjen, A. Van, Reisslein, M., Kellerer, W. (2018), "Unicast QoS Routing Algorithms for SDN: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 20, No. 1, P. 388–415. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2749760>
- Karakus, M., Duresi, A. (2019), "Quality of Service (QoS) in Software Defined Networking (SDN): A survey", *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 80, P. 200–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.12.019>

21. Yang, Y., Xu, M., Li, Q. (2018), "Fast Rerouting Against Multi-Link Failures Without Topology Constraint", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 26, No. 1, P. 384–397. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2780852>
22. Strelkovskaya, I., Solovskaya, I., Grygoryeva, T., Paskalenko, S. (2016), "The solution to the problem of the QoS characteristics definition for self-similar traffic serviced by the W/M/1 QS," in *Proc. 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, P. 40-42. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2016.7905330>
23. Hasan, H., Cosmas, J., Zaharis, Z., Lazaridis, P., Khwandah, S. (2016), "Development of FRR mechanism by adopting SDN notion", in *Proc. 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOFTCOM.2016.7772133>
24. Lee, K., Kim, M., Kim, H., Chwa, H. S., Lee, J., Shin, I. (2019), "Fault-Resilient Real-Time Communication Using Software-Defined Networking", in *Proc. 2019 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, P. 204-215. DOI: <https://doi.org/10.1109/RTAS.2019.00025>
25. Chen, Y., Zhao, Z. (2018), "Research on Network Performance Optimization and Application of Wireless Intelligent Routing", in *proc. 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI)*, P. 489-492. DOI: <https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690466>
26. Tipper, D. (2014), "Resilient network design: challenges and future directions. Telecommunication Systems", No. 56 (1), P. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11235-013-9815-x>
27. Mu, C., Zhang, J., Liu, Y. (2019), "Multi-objective ant colony optimization algorithm based on decomposition for community detection in complex networks", *Soft Comput.*, P. 12683–12709 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03820-y>
28. Chen, C., Xu, C., Xu, C., Liu, D., Tian, L. (2018), "Trajectory Data Compression Using Hopfield Neural Network", in *Proc. 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, P. 186–190. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCI46756.2018.00043>
29. Andrade, B. A. R., Ferreira, N. R. (2018), "Simulated annealing and tabu search applied on network reconfiguration in distribution systems", in *Proc. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395757>

Надійшла (Received) 29.02.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єременко Олександра Сергіївна – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: oleksandra.yeremenko.ua@ieee.org; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3721-8188>.

Єременко Олександра Сергеевна – доктор технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Yeremenko Oleksandra – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Євдокименко Марина Олександрівна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: maryna.yevdokymenko@ieee.org; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7391-3068>.

Євдокименко Марина Александровна – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Yevdokymenko Maryna – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Слейман Батуль – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірантка кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: sleimanbatoul@hotmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8359-1752>.

Слейман Батуль – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирантка кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Sleiman Batoul – Kharkiv National University of Radio Electronics, Graduate Student of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МОДЕЛЬ БЫСТРОЙ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦИИ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ПУТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ

Предметом исследования в статье являются процессы быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы защиты пути и пропускной способности. **Цель** работы – усовершенствование модели быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы защиты пути и пропускной способности, которая может быть использована для программно-конфигурируемых сетей. В статье решаются следующие **задачи**: усовершенствование и исследование математической модели быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы защиты пути и пропускной способности. Используются следующие **методы**: теория графов, теория массового обслуживания и методы математического программирования. Получены следующие **результаты**: усовершенствована и исследована математическая модель быстрой перемаршрутизации, которая благодаря введению дополнительных условий позволяет реализовать схему защиты пути 1:n и пропускной способности в программно-конфигурируемых сетях. **Выводы**: В рамках предложенной модели быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы

защиты пути и пропускной способности была решена задача расчета множества основных и резервных непересекающихся путей, которая сводилась к решению оптимизационной задачи целочисленного линейного программирования. Преимуществом усовершенствованной модели является возможность реализации схем защиты 1:1, 1:2, ..., 1:n без введения дополнительного множества управляющих (маршрутных) переменных, что способствует уменьшению размерности решаемой оптимизационной задачи и вычислительной сложности ее практической реализации. Критерий оптимальности маршрутных решений способствует формированию основных и резервных непересекающихся путей с максимальной пропускной способностью. В этом случае путь с наивысшей пропускной способностью будет соответствовать основному пути, тогда как остальные пути будут использоваться как резервные, в порядке уменьшения их пропускной способности. Общее количество рассчитанных непересекающихся путей зависит от выбранной схемы резервирования.

Ключевые слова: программно-конфигурируемая сеть; быстрая перемаршрутизация; защита пути; пропускная способность.

ADVANCED PERFORMANCE-BASED FAST REROUTING MODEL WITH PATH PROTECTION AND ITS BANDWIDTH IN SOFTWARE-DEFINED NETWORK

The **subject** matter of the article is the fast rerouting processes with the implementation of the protection scheme of the path and its bandwidth. The **goal** of the work is to improve the performance-based Fast ReRoute model with the protection scheme of the path and its bandwidth, which can be used for Software-Defined Networks. The following **tasks** are solved in the article: improvement and research of the Fast ReRoute model with the protection scheme of the path and its bandwidth. The following **methods** are used: graph theory, queuing theory, and mathematical programming methods. The following **results** were obtained: Fast ReRoute model was improved and investigated. That allows implementing the 1:n protection scheme of the path and its bandwidth in Software-Defined Networks. **Conclusions:** Within the framework of the proposed Fast ReRoute model with the schemes of the path protection and its bandwidth, the problem of calculating the set of primary and backup disjoint paths was solved. The proposed mathematical model, using the introduction of additional conditions, allowed us to reduce the solution of the technological problem of fast rerouting to the solution of the optimization problem of mixed integer linear programming. The advantage of the improved model is the possibility of implementing protection schemes 1:1, 1:2, ..., 1:n without introducing an additional set of control (routing) variables. This helps to reduce the dimension of the optimization problem to be solved and the computational complexity of its implementation. The optimality criterion of routing solutions contributes to the formation of primary and backup disjoint paths with the maximum bandwidth. In this case, the path with the highest bandwidth will correspond to the primary path, while the remaining paths will be used as a backup, in order to reduce their bandwidth. The total number of calculated disjoint paths depends on the selected redundancy scheme.

Keywords: Software-Defined Network; Fast ReRouting; path protection; bandwidth.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Єременко О. С., Євдокименко М. О., Слейман Б. Удосконалена модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності в програмно-конфігурованих мережах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 163–171. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.163>.

Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Sleiman, B. (2020), "Advanced performance-based Fast ReRouting model with path protection and its bandwidth in Software-Defined Network", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 163–171. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.163>.