

УДК 621.391

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАДІЙНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ



[О.С. ЄРЕМЕНКО](#), [М.В. СОЛОМ'ЯНИЙ](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки



[С.С. ШЕСТОПАЛОВ](#)

Charge Amps AB



[М.А. ПЕРСІКОВ](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Abstract** – The article is devoted to a relevant scientific and applied problem related to improving potential solutions to increase network resilience by means of reliable routing. The study of several routing models is presented, taking into account different types of metrics, in particular, the metric based on the availability indicator. The technological task of routing is formulated in an optimization form. Attention is focused on the flow-based model of reliable routing, and its effectiveness is proved through modeling and comparative analysis with existing approaches. Also, single-path and multipath routing strategies were analyzed in terms of their effectiveness in increasing the level of network resilience. It is demonstrated that the multipath approach to reliable routing is necessary at high loads and contributes to an increase in the overall multipath availability. At the same time, the implementation of a single-path routing strategy at high loads leads to routing solutions with a low availability indicator and limited use of the available network resource – bandwidth. The numerical research results have confirmed the effectiveness of the proposed multipath routing solution with the availability metric and allowed the formulation of general recommendations related to the implementation of reliable routing in practice. Thus, it is proposed to use a multipath routing strategy to balance the load in the network, together with consideration of availability metrics in calculating multipath for the data flow transmission. Further improvement of the reliable routing model is envisaged, considering the Quality of Service indicators when calculating reliable and productive multipath.

**Анотація** – Стаття присвячена актуальній науково-прикладній задачі, пов'язаній з удосконаленням потенційних рішень щодо підвищення рівня стійкості мереж засобами надійної маршрутизації. Представлено дослідження низки моделей маршрутизації з урахуванням різних типів метрик, зокрема метрики на основі показника надійності. Технологічне завдання маршрутизації сформульовано в оптимізаційній формі. Зосереджено увагу на потоковій моделі надійної маршрутизації, в ході моделювання та порівняльного аналізу з існуючими підходами доведено її ефективність. Також аналізу підлягали стратегії одношляхової та багатошляхової маршрутизації з погляду їх ефективності в процесі підвищення рівня стійкості мережі. Продемонстровано, що багатошляховий підхід під час надійної маршрутизації є необхідним при високих навантаженнях та сприяє підвищенню загального коефіцієнта готовності мультишляху. Водночас реалізація одношляхової стратегії маршрутизації при високих навантаженнях призводить до маршрутних рішень з низьким коефіцієнтом готовності та обмеженості використання наявного мережного ресурсу – пропускної здатності. Результати проведеного дослідження підтвердили ефективність використання запропонованого рішення щодо багатошляхової маршрутизації з метрикою надійності та дозволили сформулювати загальні рекомендації, пов'язані з реалізацією на практиці надійної маршрутизації. Отже, пропонується використання стратегії багатошляхової маршрутизації з метою балансування навантаження в мережі спільно з урахуванням показників надійності в процесі обчислення мультишляхів для передачі потоків даних. Передбачається подальше удосконалення моделі надійної маршрутизації з урахуванням показників якості обслуговування під час обчислення стійких і продуктивних мультишляхів.

## Вступ

Надійна маршрутизація в сучасних мережах стає все більш важливою через зростаючі вимоги до так званих безшовних комунікацій, низької затримки та високої доступності [1, 2]. Традиційні методи маршрутизації, такі як статична маршрутизація та

протоколи динамічної маршрутизації (наприклад, RIP, OSPF, BGP), були основою мереж протягом десятиліть, зосереджуючись на пошуку найкоротшого або найбільш ефективного в межах обраної метрики шляху для передачі пакетів [1, 3]. Однак традиційні методи часто не справляються зі змінами в мережі в реальному часі, такими як раптові збої в роботі каналів зв'язку або мережного обладнання, сплесків навантаження, які можуть призвести до втрати пакетів, збільшення затримок або навіть до повного виходу з ладу мережі [4, 5].

З іншого боку надійна маршрутизація спрямована на забезпечення безперервного та оптимального передавання потоків даних навіть за несприятливих умов. Вона включає в себе такі передові механізми, як багатошляхова маршрутизація, обчислення шляху в реальному часі та резервування мережних ресурсів для швидкої адаптації до збоїв у мережі [1, 6]. На відміну від традиційної, надійна маршрутизація має враховувати не тільки довжину маршруту чи його продуктивність, але й показники надійності [7 – 10], що робить її більш придатною для сучасних динамічних мережних середовищ. Так, наприклад, у програмно-конфігурованих мережах (Software-Defined Networking, SDN) надійність процесів маршрутизації ще більше підвищується завдяки централізованому управлінню, що дозволяє приймати більш точні та адаптивні рішення щодо маршрутизації, які можна коригувати, таким чином значно підвищуючи загальну надійність та продуктивність мережі [1, 2, 11].

Отже, забезпечення міжкінцевої якості обслуговування (Quality of Service, QoS) та надійності стають ключовими завданнями у процесі розробки та впровадження рішень маршрутизації в комунікаційних мережах [1, 2, 5]. З урахуванням постійного зростання обсягів передачі даних, різноманітності сервісів і високих QoS-вимог удосконалення технологій маршрутизації стає необхідністю для забезпечення оптимальної продуктивності та задоволення потреб користувачів. Однією з ключових технологій є також відмовостійка маршрутизація, яка використовує різноманітні моделі та методи для мінімізації впливу відмов на мережений трафік, забезпечуючи надійність і безперервність зв'язку [4, 12, 13].

Водночас аналіз існуючих рішень у сфері QoS і відмовостійкої маршрутизації загалом дав змогу виділити перелік ключових вимог, яким мають відповідати подібні рішення [1 – 6, 13]. Основна увага зосереджена на математичних моделях і методах, на яких вони базуються з урахуванням потокового характеру трафіку, що є визначальною особливістю більшості мультимедійних послуг. Також оптимізаційна постановка задачі орієнтована на ефективне використання наявних мережних ресурсів, а висока масштабованість рішень маршрутизації є необхідною. Розширення можливостей існуючих підходів стосовно підтримки балансування навантаження, пов'язаного з реалізацією багатошляхових стратегій маршрутизації, безперечно представляється актуальним. При цьому обчислювальна складність рішень маршрутизації повинна бути прийнятною.

Отже, стаття присвячена актуальній науково-прикладній задачі, пов'язаній з удосконаленням потенційних рішень щодо підвищення рівня стійкості мереж засобами

надійної маршрутизації. В роботі досліджено низку моделей маршрутизації з урахуванням різних типів метрик, зокрема метрики на основі показника надійності – коефіцієнта готовності каналів зв'язку комунікаційної мережі. Було сформульовано в оптимізаційній формі потокову модель надійної маршрутизації та доведено її ефективність.

## I. Опис базової потокової моделі маршрутизації для одношляхової та багатошляхової стратегій

Розглянемо та проаналізуємо базову потокову модель маршрутизації в мережі з фокусом на застосуванні для забезпечення мережної надійності та високої доступності маршрутів [1, 14]. В перспективі досліджувана модель може служити алгоритмічно-програмною основою протоколів маршрутизації, наприклад, у програмно-конфігурованих архітектурах. Увагу зосереджено на оптимізаційних моделях, які дозволяють отримувати найкращі маршрутні рішення за обраною метрикою, а також спроможних реалізовувати задану функціональність щодо надійності.

Постановка задачі маршрутизації містить наступні параметри:

- кількість мережних каналів ( $n$ );
- кількість мережних вузлів ( $m$ );
- вузол-відправник потоку пакетів ( $s$ );
- вузол-отримувач потоку пакетів ( $d$ );
- пропускні здатності каналів ( $c_{i,j}$ ) у пакетах за секунду (пак/с);
- інтенсивність потоку, що передається, ( $r_{i,j}$ ) у пакетах за секунду (пак/с);
- вектор метрик каналів зв'язку ( $\vec{f}$ );
- коефіцієнти готовності каналів ( $A_{i,j}$ ).

Таким чином, в ході розв'язання маршрутної задачі необхідно визначити оптимальний шлях від відправника до отримувача, який є найкращим у межах обраної метрики.

Кількість каналів у мережі, позначена як  $n$ , визначає розмірність вектора  $\vec{x}$ . Водночас кожна координата  $x_{i,j}$  вказує на частку потоку, яка проходить через канал зв'язку  $(i,j)$ , тобто між  $i$ -м та  $j$ -м вузлами. Розмірність вектора метрик  $\vec{f}$  також співпадає з числом каналів у мережі  $n$ , де  $f_{i,j}$  представляє метрику каналу між  $i$ -м та  $j$ -м вузлами. Для впровадження одношляхової маршрутизації на координати вектора  $\vec{x}$ , накладаються обмеження виду [1, 14]:

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \text{ при } i, j = \overline{1, m}, i \neq j, \quad (1)$$

де  $x_{i,j}$  – можуть приймати два значення, а саме 1, якщо потік протікає каналом  $(i,j)$ , та 0 – в інших випадках.

Змінні (1) у булевому контексті гарантують відсутність розгалуження потоку різними шляхами мережі, тобто всі пакети даного потоку будуть передаватися лише одним маршрутом. Водночас кожному каналу зв'язку буде призначатися власна метрика, позначена як  $f_{i,j}$ .

Для багатошляхової стратегії маршрутизації мають виконуватися наступні обмеження [1, 14]:

$$0 \leq x_{i,j} \leq 1 \text{ при } i, j = \overline{1, m}, i \neq j. \quad (2)$$

Під час розв'язання маршрутної задачі важливо гарантувати, що потік залишається неперервним в кожному вузлі та в мережі загалом [1]:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j)} x_{i,j} - \sum_{j:(j,i)} x_{j,i} = 1, i = s; \\ \sum_{j:(i,j)} x_{i,j} - \sum_{j:(j,i)} x_{j,i} = 0, i \neq s, d; \\ \sum_{j:(i,j)} x_{i,j} - \sum_{j:(j,i)} x_{j,i} = -1, i = d. \end{cases} \quad (3)$$

Вирішення завдань маршрутизації у сучасних мережних протоколах зазвичай зводиться до розв'язання проблеми знаходження найкоротшого маршруту в мережі, що описує структуру комунікаційної мережі. Зі свого боку, це завдання пошуку найкоротшого маршруту може бути формалізовано як задача математичного програмування, і для її розв'язання буде використано інструмент GEKKO Optimization Suite у вихідному коді програми, написаною мовою Python.

Окрім умов забезпечення збереження потоку (3) також необхідно врахувати умови запобігання перевантаження каналів мережі [14]:

$$r \cdot x_{i,j} \leq c_{i,j}, (i, j = \overline{1, n}, i \neq j), \quad (4)$$

де  $c_{i,j}$  – пропускна здатність каналу зв'язку між  $i$ -м та  $j$ -м вузлами.

Наступні пояснення буде викладено у векторно-матричному вигляді таким чином, як буде проводитись розв'язання оптимізаційної задачі. Згідно з виразами (1) або (2), під час вирішення завдань оптимізації необхідно здійснювати мінімізацію цільової функції, яка виражена у лінійній формі, спільно з умовами рівняннями та нерівностями [14]:

$$\min_{\vec{x}} \vec{f}^t \vec{x}, \quad (5)$$

$$A\vec{x} \leq \vec{b}; \quad (6)$$

$$Aeq\vec{x} = \vec{beq}, \vec{lb} \leq \vec{x} \leq \vec{ub}, \quad (7)$$

де  $\vec{f}, \vec{x}, \vec{b}, \vec{beq}, \vec{lb}, \vec{ub}$  – вектори,  $A$  та  $Aeq$  – матриці відповідної розмірності.

## II. Аналіз вихідних даних до моделювання процесів маршрутизації з різнотипними метриками

Нехай фрагмент мережі має топологію, що представлена на рис. 1. Цей фрагмент буде надалі використано під час моделювання засобами Python NumPy, а також при

виконанні порівняльного аналізу різних моделей маршрутизації для демонстрації особливостей моделі надійної маршрутизації.

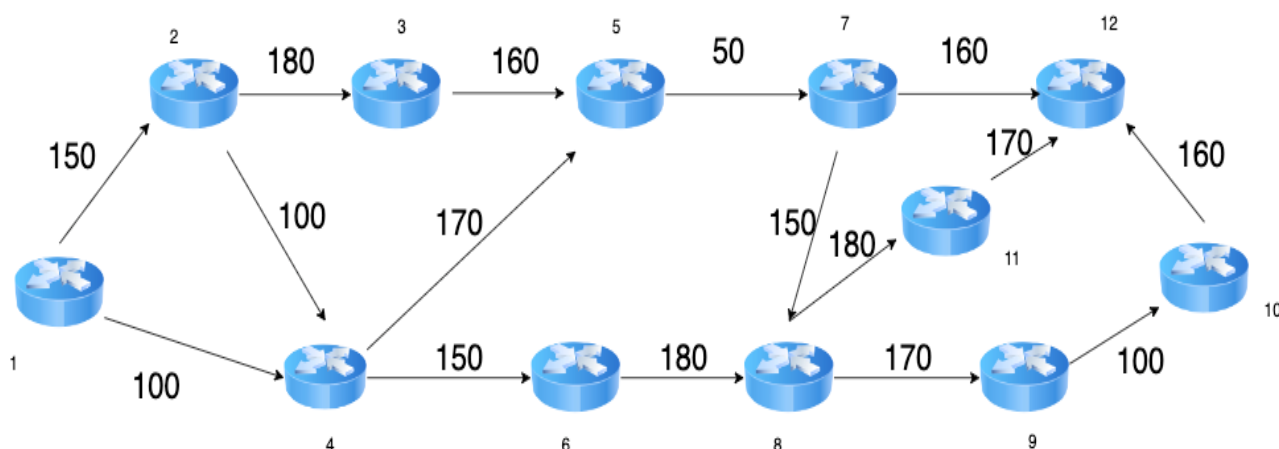


Рис. 1. Структура мережі та пропускні здатності каналів зв'язку

Зазначаючи структуру мережі та пропускні здатності каналів на рис. 1, встановлюємо, що загалом мережа містить дванадцять вузлів ( $m = 12$ ), а кількість каналів зв'язку складає шістнадцять ( $n = 16$ ). Важливо відмітити, що вузол 1 виступає як вузол-відправник пакетів, а вузол 12 є вузлом-отримувачем. Ці дані є вихідними для подальшого дослідження, дозволяючи враховувати особливості передачі потоку пакетів від відправника до отримувача. Зі свого боку табл. 1 містить вихідні дані, які будуть використовуватися для моделювання фрагмента мережі (рис. 1).

Таблиця 1. Вихідні дані для дослідження фрагмента мережі

№	Канал	Пропускна здатність, пак/с	Коефіцієнт готовності
1	(1,2)	150	0,95
2	(1,4)	100	0,99
3	(2,3)	180	0,9
4	(2,4)	100	0,96
5	(3,5)	160	0,98
6	(4,5)	170	0,97
7	(4,6)	150	0,95
8	(5,7)	50	0,99
9	(6,8)	180	0,9
10	(7,8)	150	0,96
11	(7,12)	160	0,98
12	(8,9)	170	0,97
13	(8,11)	180	0,9
14	(9,10)	100	0,96
15	(10,12)	160	0,98
16	(11,12)	170	0,97

Вектор маршрутних змінних  $\vec{x}$ , який відповідає векторно-матричному представленню моделі, описаної у виразах (5)-(7), матиме вигляд:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_{1,2} \\ x_{1,4} \\ x_{2,3} \\ x_{2,4} \\ x_{3,5} \\ x_{4,5} \\ x_{4,6} \\ x_{5,7} \\ x_{6,8} \\ x_{7,8} \\ x_{7,12} \\ x_{8,9} \\ x_{8,11} \\ x_{9,10} \\ x_{10,12} \\ x_{11,12} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для аналізу в роботі розглядаються три варіанти векторів маршрутних метрик  $\vec{f}$ . У випадку використання метрики, аналогічної протоколу Routing Information Protocol (RIP), вектор  $\vec{f}$  буде представлений, як показано у виразі (9):

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} f_{1,2} \\ f_{1,4} \\ f_{2,3} \\ f_{2,4} \\ f_{3,5} \\ f_{4,5} \\ f_{4,6} \\ f_{5,7} \\ f_{6,8} \\ f_{7,8} \\ f_{7,12} \\ f_{8,9} \\ f_{8,11} \\ f_{9,10} \\ f_{10,12} \\ f_{11,12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Якщо використовується метрика, що формується по аналогії з протоколом Open Shortest Path First (OSPF), тоді вектор маршрутних метрик  $\vec{f}$  буде виглядати, як показано у виразі (10):

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} f_{1,2} \\ f_{1,4} \\ f_{2,3} \\ f_{2,4} \\ f_{3,5} \\ f_{4,5} \\ f_{4,6} \\ f_{5,7} \\ f_{6,8} \\ f_{7,8} \\ f_{7,12} \\ f_{8,9} \\ f_{8,11} \\ f_{9,10} \\ f_{10,12} \\ f_{11,12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^8/150 \\ 10^8/100 \\ 10^8/180 \\ 10^8/100 \\ 10^8/160 \\ 10^8/170 \\ 10^8/150 \\ 10^8/100 \\ 10^8/180 \\ 10^8/150 \\ 10^8/160 \\ 10^8/170 \\ 10^8/180 \\ 10^8/100 \\ 10^8/160 \\ 10^8/170 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

При впровадженні концепції надійної маршрутизації характеристики вектора маршрутних метрик  $\vec{f}$  формуються відповідно до коефіцієнтів готовності каналів зв'язку мережі таким чином, як показано у виразі (11):

$$f_{i,j} = -\lg A_{i,j}, \quad i, j = \overline{1, m}, \quad i \neq j. \quad (11)$$

Введемо формальні визначення умов, які забезпечують збереження потоку на вузлах мережі:

$$\begin{cases} x_{1,2} + x_{1,4} = 1; \\ -x_{1,2} + x_{2,3} + x_{2,4} = 0; \\ -x_{2,3} + x_{3,5} = 0; \\ -x_{1,4} - x_{2,4} + x_{4,5} + x_{4,6} = 0; \\ -x_{3,5} - x_{4,5} + x_{5,7} = 0; \\ -x_{4,6} + x_{6,8} = 0; \\ -x_{5,7} + x_{7,8} + x_{7,12} = 0; \\ -x_{6,8} - x_{7,8} + x_{8,9} + x_{8,11} = 0; \\ -x_{8,9} + x_{9,10} = 0; \\ -x_{9,10} + x_{10,12} = 0; \\ -x_{8,11} + x_{11,12} = 0; \\ -x_{7,12} - x_{10,12} - x_{11,12} = -1. \end{cases} \quad (12)$$

Отже, відповідно до системи рівнянь (12) отримаємо матрицю  $A_{eq}$  та вектор-стовпчик  $\vec{b}_{eq}$ :

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}; b_{eq} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Граничні значення координат вектора  $\vec{x}$  мають такий вигляд:

$$\vec{lb} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ та } \vec{ub} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

### III. Дослідження та аналіз ефективності моделі надійної маршрутизації

Під час проведення дослідження та зміни вектора маршрутних метрик  $\vec{f}$  необхідно визначити оптимальні маршрути та провести відповідний аналіз. Кожний з розрахованих маршрутів буде досліджено щодо кількості каналів зв'язку, пропускну здатності та доступності.

Пропускна здатність маршруту визначає найменш продуктивний канал. Водночас визначення доступності маршрутів може бути виконано наступним чином. Якщо канали зв'язку в маршруті з'єднуються послідовно, то його надійність можна розрахувати як добуток коефіцієнтів готовності окремих каналів  $A_{i,j}$  ( $i, j = \overline{1, m}, i \neq j$ ) [6, 10]:

$$A_{\text{послід}} = \prod_{i,j=\overline{1,m}, i \neq j} A_{i,j}. \quad (15)$$

У разі паралельного з'єднання каналів у маршруті його доступність розраховується таким чином:

$$A_{\text{парал}} = 1 - \prod_{i,j=\overline{1,m}, i \neq j} (1 - A_{i,j}). \quad (16)$$



Водночас, якщо мають місце комбіновані маршрути, що містять як послідовно з'єднані канали, так і канали, що формують фрагменти з паралельним з'єднанням, формули (15) і (16) можуть використовуватись спільно відповідно до проведених еквівалентних перетворень, які дозволяють виконати розрахунки. Тобто складний маршрут розбивається на окремі фрагменти, доступність яких може бути обчислена за допомогою (15) і (16), що потім враховується у розрахунку доступності всього маршруту.

У межах першого розрахункового прикладу (рис. 2 – 4) інтенсивність потоку, який надходить до мережі буде дорівнювати 50 пак/с:

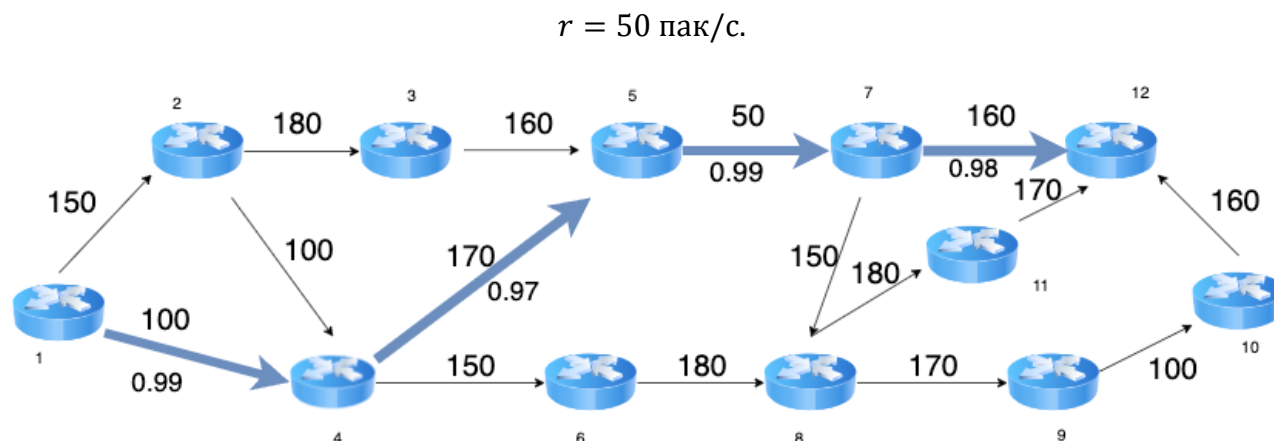


Рис. 2. Порядок одношляхової маршрутизації з метрикою по аналогії з протоколом RIP ( $r = 50$  пак/с)

З рис. 2 можна зробити висновок, що для одношляхової маршрутизації з використанням метрики по аналогії з протоколом RIP оптимальний шлях буде проходити через такі вузли, як  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 12$ . У цьому випадку в результаті розв'язання оптимізаційної задачі отримується найкоротший маршрут за кількістю хопів.

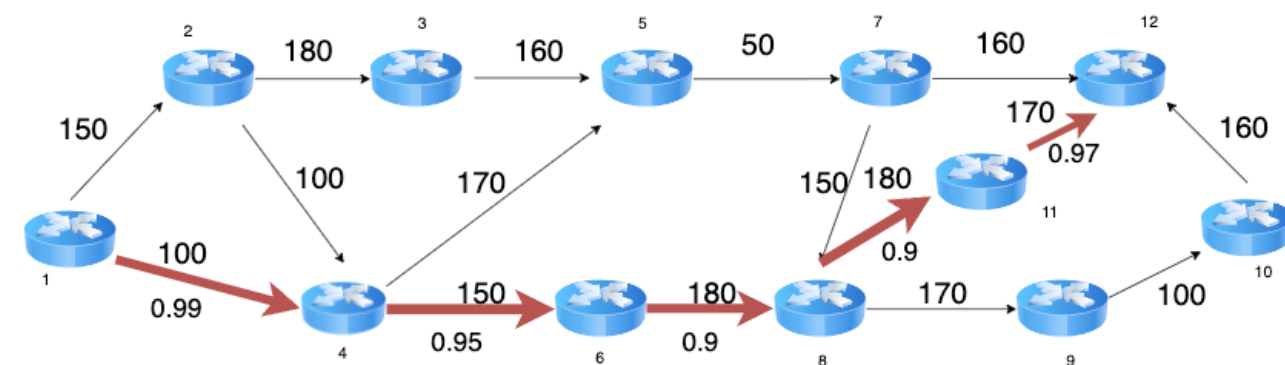


Рис. 3. Порядок одношляхової маршрутизації з метрикою по аналогії з протоколом OSPF ( $r = 50$  пак/с)

З рис. 3 видно, що для одношляхової маршрутизації з використанням метрики, аналогічної до OSPF, оптимальний шлях буде складатися з таких вузлів:  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow$

8 → 11 → 12. Таким чином, обирається найбільш продуктивний маршрут з погляду його пропускної здатності.

З рис. 4 виходить, що для одношляхової маршрутизації з використанням метрики надійності, коли обчислення маршруту пов'язано з коефіцієнтами готовності каналів мережі, оптимальний шлях буде складатися з наступних вузлів: 1 → 4 → 5 → 7 → 12. Очевидно, що отриманий маршрут співпав з тим, що відповідав метриці по аналогії з RIP, тобто ще є і найкоротшим.

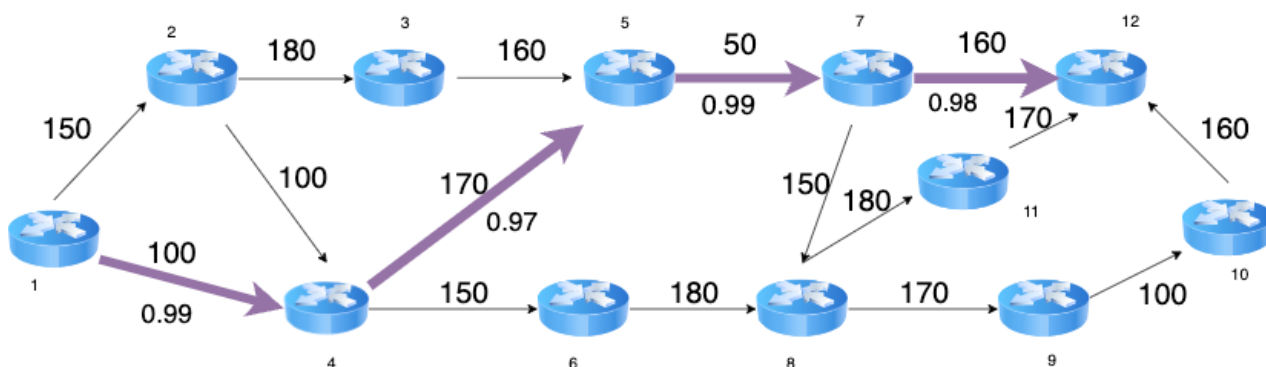


Рис. 4. Порядок одношляхової маршрутизації з метрикою надійності ( $r = 50$  пак/с)

Розрахуємо доступність обчисленого маршруту для одношляхової маршрутизації з використанням метрики по аналогії з протоколом RIP ( $A_{RIP}$ ) і з метрикою надійності ( $A_{AM}$ ) у даному випадку за допомогою формули (15), оскільки канали в маршруті мають послідовне з'єднання:

$$A_{RIP} = A_{AM} = A_{1,4} \cdot A_{4,5} \cdot A_{5,7} \cdot A_{7,12} = 0,932, \quad (17)$$

де  $A_{RIP}$  – доступність маршруту, обчисленого з використанням метрики RIP;  $A_{AM}$  – доступність маршруту, обчисленого з використанням метрики надійності (AM).

Розрахуємо доступність обчисленого маршруту для одношляхової маршрутизації з використанням метрики OSPF за допомогою формули (15):

$$A_{OSPF} = A_{1,4} \cdot A_{4,6} \cdot A_{6,8} \cdot A_{8,11} \cdot A_{11,12} = 0,739, \quad (18)$$

де  $A_{OSPF}$  – доступність маршруту, обчисленого з використанням метрики OSPF.

Виявлено, що навіть якщо використовувати багатошляхову стратегію маршрутизації для моделі з метрикою надійності, мультишлях формуватися не буде, оскільки інтенсивність потоку низька. Проте, продуктивність запропонованого для дослідження фрагмента мережі при одношляховій стратегії маршрутизації низька, 100 пак/с – це максимальна інтенсивність, з якою може передаватись потік з вузла 1 до вузла 12.

У табл. 2 показано рівень надійності маршрутів за двома різними метриками – RIP та OSPF. Кожен маршрут характеризується своїм коефіцієнтом готовності.

Таблиця 2. Порівняння надійності маршрутів з різними метриками при  $r = 50$  пак/с

Метрика	Маршрут	Коефіцієнт готовності маршруту
RIP, AM	1→4→5→7→12	0,932
OSPF	1→4→6→8→11→12	0,739

Згідно з даними, вказаними у табл. 2, застосування метрики надійності дозволило обчислити найкращий маршрут із загальним коефіцієнтом готовності на рівні 0,932. Але також він є й найкоротшим. Розрахунки свідчать про його надійність.

Маршрут, отриманий за метрикою OSPF, не зважаючи на більшу кількість проміжних вузлів, має значно менший коефіцієнт готовності, який становить 0,739. Водночас цей маршрут має вищу продуктивність, а саме 100 пак/с.

У межах другого розрахункового прикладу (рис. 5 – 8) інтенсивність потоку, який надходить до мережі буде дорівнювати 100 пак/с:

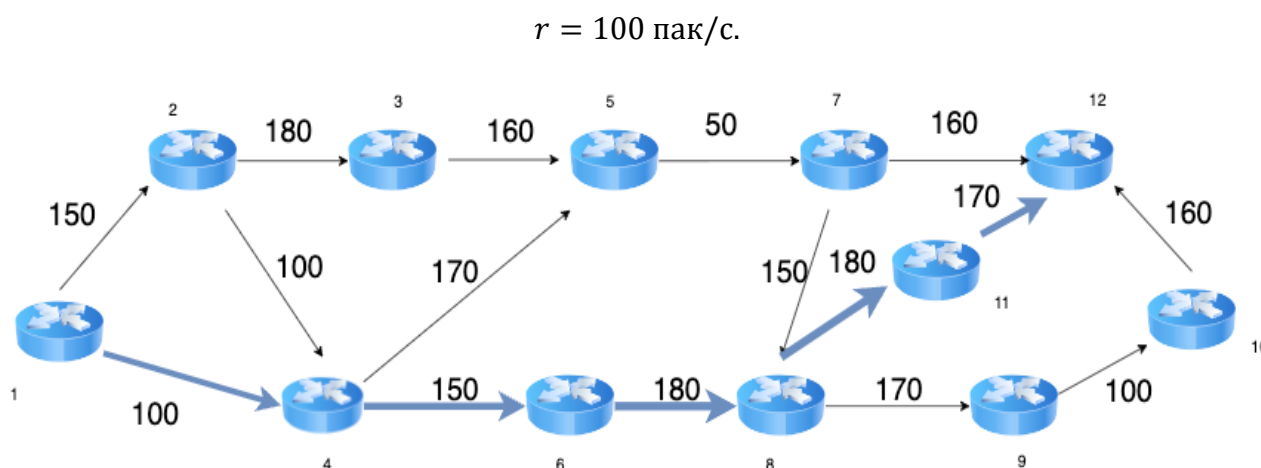


Рис. 5. Порядок одношляхової маршрутизації з метрикою по аналогії з протоколом RIP ( $r = 100$  пак/с)

З рис. 5 видно, що для одношляхової маршрутизації з використанням метрики по аналогії з протоколом RIP оптимальний шлях буде складатися з таких вузлів: 1 → 4 → 6 → 8 → 11 → 12. Водночас з рис. 6 слідує, що для одношляхової маршрутизації з використанням метрики OSPF оптимальний шлях буде складатися з саме таких вузлів: 1 → 4 → 6 → 8 → 11 → 12. Тоді як на рис. 7 показано, що для одношляхової маршрутизації з використанням метрики надійності оптимальний шлях буде складатися з таких вузлів, як 1 → 4 → 6 → 8 → 9 → 10 → 12.

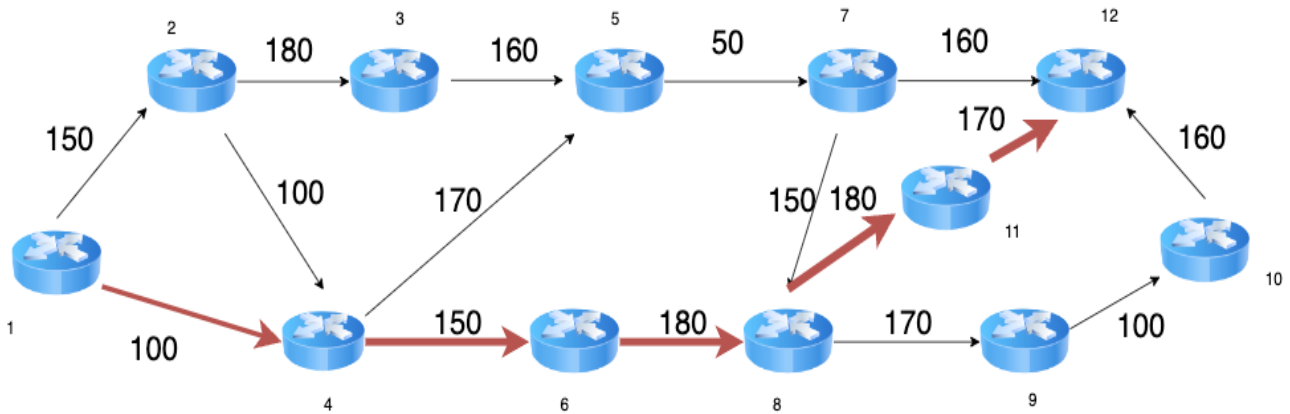


Рис. 6. Порядок одношляхової маршрутизації з метрикою по аналогії з протоколом OSPF ( $r = 100$  пак/с)

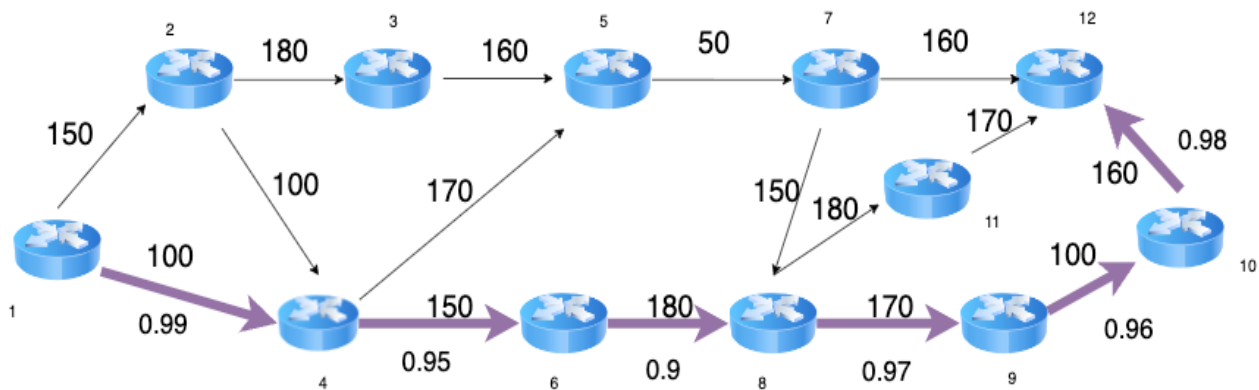


Рис. 7. Порядок одношляхової маршрутизації з метрикою надійності ( $r = 100$  пак/с)

Розрахуємо доступність для одношляхової стратегії маршрутизації з використанням метрики RIP за допомогою формули (15):

$$A_{RIP} = A_{1,4} \cdot A_{4,6} \cdot A_{6,8} \cdot A_{8,11} \cdot A_{11,12} = 0,739. \quad (19)$$

Аналогічно отримуємо доступність для одношляхової стратегії маршрутизації з використанням метрики OSPF також за формулою (15):

$$A_{OSPF} = A_{1,4} \cdot A_{4,6} \cdot A_{6,8} \cdot A_{8,11} \cdot A_{11,12} = 0,739. \quad (20)$$

Обчислення доступності для одношляхової стратегії маршрутизації з використанням метрики надійності виглядає таким чином за формулою (15):

$$A_{AM} = A_{1,4} \cdot A_{4,6} \cdot A_{6,8} \cdot A_{8,9} \cdot A_{9,10} \cdot A_{10,12} = 0,772. \quad (21)$$

Проаналізуємо, як зміниться рівень надійності отриманого рішення у разі використання багатошляхової стратегії маршрутизації. Бачимо, що в цьому випадку мультишлях буде формуватися з двох маршрутів:  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 12$  та  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 12$ , за якими потік розділяється порівну.

Оскільки мультишлях в цьому випадку є складним і містить у собі фрагменти каналів як з послідовним, так і з паралельним з'єднанням, то обчислення надійності всього мультишляху буде виконуватися комбінованим чином із застосуванням формул (15) та (16).

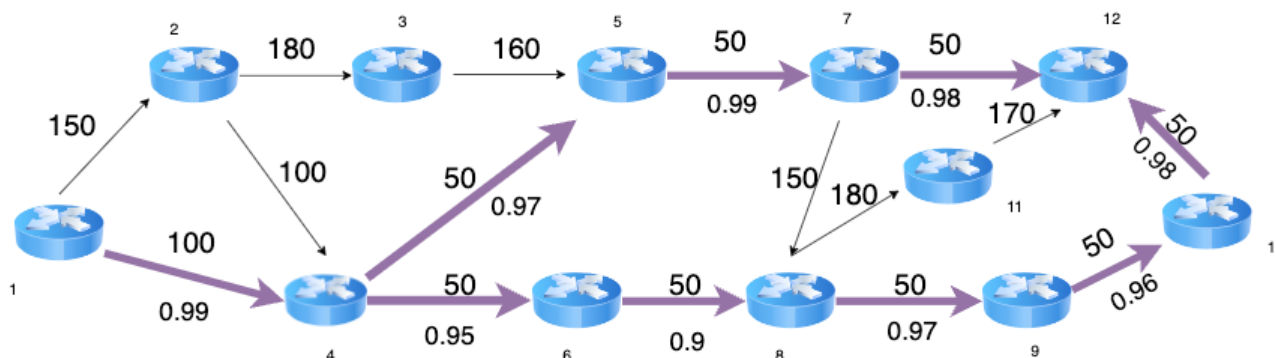


Рис. 8. Порядок багатошляхової маршрутизації з метрикою надійності ( $r = 100$  пак/с)

$$A_{\text{підсистема1}} = A_{1,4} = 0,99. \quad (22)$$

$$A_{\text{підсистема2}} = A_{4,5} \cdot A_{5,7} \cdot A_{7,12} = 0,941. \quad (23)$$

$$A_{\text{підсистема3}} = A_{4,6} \cdot A_{6,8} \cdot A_{8,9} \cdot A_{9,10} \cdot A_{10,12} = 0,78. \quad (24)$$

$$A_{\text{підсистема4}} = 1 - (1 - A_{\text{підсистема2}}) * (1 - A_{\text{підсистема3}}) = 0,987. \quad (25)$$

$$A_{\text{AM}} = A_{\text{підсистема1}} \cdot A_{\text{підсистема4}} = 0,977. \quad (26)$$

Результати розрахунків зведено в табл. 3, звідки виходить, що використання багатошляхової стратегії маршрутизації дозволяє отримати значно надійніше маршрутне рішення для тих самих вихідних даних.

Таблиця 3. Порівняння надійності маршрутів з різними метриками при  $r = 100$  пак/с

Метрика	Маршрут	Коефіцієнт готовності маршруту
RIP	1→4→6→8→11→12	0,739
OSPF	1→4→6→8→11→12	0,739
AM (одношляхова маршрутизація)	1→4→6→8→9→10→12	0,772
AM (багатошляхова маршрутизація)	1) 1→4→5→7→12 2) 1→4→6→8→9→10→12	0,977

Маршрути з метриками RIP та OSPF мають однакові коефіцієнти готовності на рівні 0,739 (вони співпадають). Це може свідчити про те, що за цими вихідними даними обидві метрики показують приблизно однаковий рівень продуктивності та надійності для даного напрямку зв'язку при інтенсивності 100 пак/с.



У межах четвертого розрахункового прикладу (рис. 10) інтенсивність потоку, який надходить до мережі, буде дорівнювати 200 пак/с:

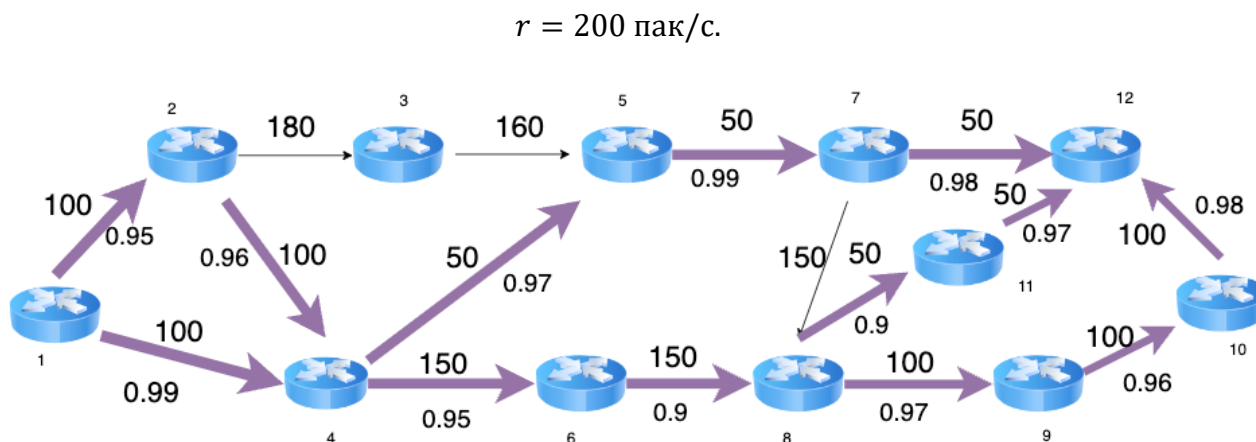


Рис. 10. Порядок багатошляхової маршрутизації з метрикою надійності ( $r = 200$  пак/с)

З рис. 10 видно, що існують три маршрути, що складають мультишлях, з різними інтенсивностями:

- для інтенсивності 100 пак/с шлях 1→4→6→8→9→10→12;
- для інтенсивності 50 пак/с шлях 1→2→4→5→7→12;
- для інтенсивності 50 пак/с шлях 1→2→4→6→8→11→12.

Розрахуємо доступність для мультишляху (рис. 10) з використанням метрик надійності за допомогою формул (15) і (16):

$$A_{\text{підсистема1}} = 1 - (1 - A_{1,4}) \cdot (1 - A_{1,2} \cdot A_{2,4}) = 0,999. \quad (30)$$

$$A_{\text{підсистема2}} = 1 - (1 - A_{4,5} \cdot A_{5,7} \cdot A_{7,12}) \cdot (1 - A_{4,6} \cdot A_{6,8} \times \\ \times (1 - (1 - A_{8,11} \cdot A_{11,12}) \cdot (1 - A_{8,9} \cdot A_{9,10} \cdot A_{10,12}))) = 0,991. \quad (31)$$

$$A_{\text{ДМ}} = A_{\text{підсистема1}} \cdot A_{\text{підсистема2}} = 0,99. \quad (32)$$

Загальна доступність мультишляху, що є добутком доступностей обох підсистем, становить 0,99, вказуючи на високий рівень доступності обраного багатошляхового підходу при інтенсивності 200 пак/с. Використання даного підходу для маршрутів з інтенсивністю 200 пак/с дозволяє забезпечити стабільну та надійну роботу мережної інфраструктури в умовах значного обсягу трафіку (максимального навантаження).

Також було проведено дослідження залежності кількості шляхів від інтенсивності потоку в процесі багатошляхової надійної маршрутизації. Динаміка процесу збільшення кількості шляхів показана на рис. 11.

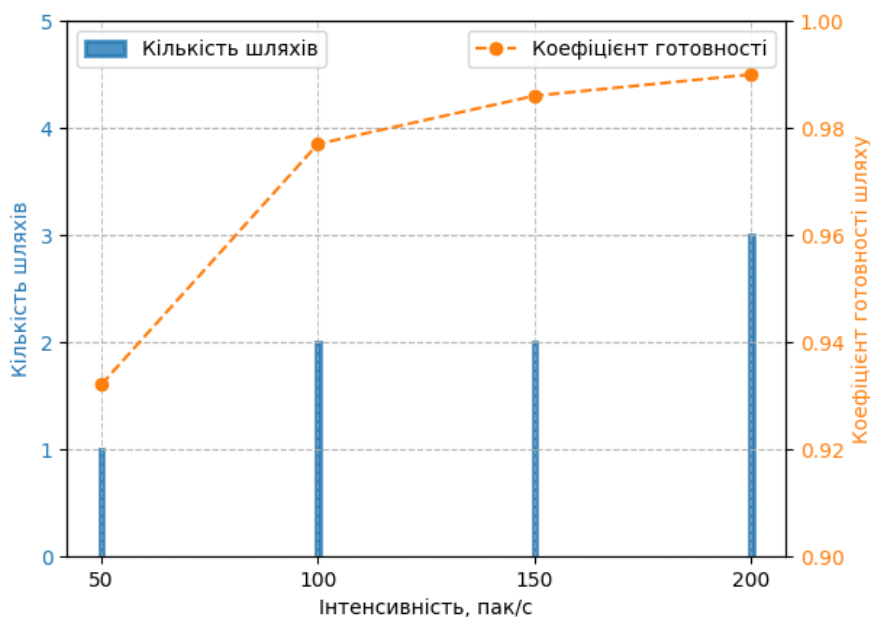


Рис. 11. Динаміка надійності маршрутного рішення в процесі використання багатошляхової надійної маршрутизації

З рис. 11 видно, що кількість шляхів збільшується разом із зростанням інтенсивності потоку. Це може бути визначено як стратегічна відповідь на високий обсяг трафіку, щоб забезпечити надійність та ефективність мережі. Багатошляхова надійна маршрутизація виявляється ефективним підходом при високих навантаженнях, дозволяючи розподілити трафік між різними шляхами та забезпечити стабільну роботу мережі навіть у випадках значного збільшення інтенсивності потоку. Цей підхід може бути особливо корисним для мереж з великою кількістю вузлів та високими вимогами щодо доступності, де забезпечення надійності та відсутність вузьких місць важливі для ефективного функціонування системи.

Отримані результати моделювання та відповідних розрахунків надійності маршрутних рішень для різних інтенсивностей та шляхів зведено у табл. 4 та проілюстровано на рис. 11. З табл. 4 видно, що при низькій інтенсивності потоку 50 пак/с використовується лише один маршрут, і його коефіцієнт готовності становить 0,932. Це може вказувати на те, що при невеликих навантаженнях єдиний маршрут може бути достатнім для гарантування надійності напрямку зв'язку.

Таблиця 4. Залежність кількості шляхів та коефіцієнтів готовності мультишляхів від інтенсивності потоку

Інтенсивність	Кількість шляхів	Коефіцієнт готовності
50	1	0,932
100	2	0,977
150	2	0,986
200	3	0,99



Зі збільшенням інтенсивності до 100 пак/с вже використовуються два маршрути, а загальний коефіцієнт готовності досягає 0,977. Це може вказувати на те, що при збільшенні навантаження стає важливим використання резервних мережних потужностей. З інтенсивністю 150 пак/с залишається два маршрути, проте коефіцієнт готовності зростає до 0,986, оскільки маршрути відрізняються від попереднього варіанту навантаження. Це підтверджує, що використання кількох маршрутів все ще забезпечує високу доступність при подальшому зростанні навантаження.

Проте, з інтенсивністю 200 пак/с вже використовуються три маршрути, і коефіцієнт готовності зростає до 0,99. Це свідчить про те, що багатошляховий підхід стає ще більш важливим при високих навантаженнях, забезпечуючи стабільність та надійність мережі. Зі зростанням інтенсивності потоку використання багатошляхової стратегії сприяє підвищенню загального коефіцієнта готовності мультишляху, що робить мережу більш стійкою та надійною у відповідь на високі обсяги трафіку.

## Висновки

Проведено моделювання та аналіз потокової моделі надійної маршрутизації. Обрано базову потокову модель для одношляхової та багатошляхової стратегій, а також проведено дослідження та аналіз ефективності моделі надійної маршрутизації. Отримані результати дозволили сформулювати висновки щодо покращення якості обслуговування та відмовостійкості в інфокомунікаційних мережах засобами надійної маршрутизації із застосуванням підходів, пов'язаних з високою доступністю.

Відповідно загальні рекомендації, пов'язані з реалізацією на практиці надійної маршрутизації, можна сформулювати наступним чином:

- використання стратегії багатошляхової маршрутизації з метою балансування навантаження в мережі;
- урахування показників надійності в процесі обчислення мультишляхів для передачі потоків даних;
- подальше удосконалення моделі надійної маршрутизації врахуванням показників якості обслуговування під час обчислення стійких і продуктивних мультишляхів.

В процесі дослідження доведено, що багатошляховий підхід під час надійної маршрутизації стає найбільш важливим при високих навантаженнях, забезпечуючи таким чином стабільність і надійність мережі. Використання багатошляхової стратегії сприяє підвищенню загального коефіцієнта готовності мультишляху, що робить мережу більш стійкою, у т.ч. до високих навантажень.

## Список літератури

1. Лемешко, О. В., Єременко, О. С., Невзорова, О. С. (2020), Потокові моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість, Харків: ХНУРЕ, 308 с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-282-1>

2. Лемешко, О.В., Єременко, О.С., Євдокименко, М.О., Шаповалова, А.С., Слейман, Б. (2022), Моделювання та оптимізація процесів безпечної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах, Харків: ХНУРЕ, 198 с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-378-1>
3. Medhi, D., Ramasamy, K. (2018), Network Routing (Algorithms, Protocols, and Architectures), 2nd edition, Elsevier Inc, 1018 p.
4. Rak, J. (2015), Resilient Routing in Communication Networks (Computer Communications and Networks), 1st edition, Springer, 194 p.
5. Rak, J. (2020), Guide to Disaster-Resilient Communication Networks, 1st edition, Springer, 813 p.
6. Voit, E. (2020), "Enterprise Network Availability: How to Calculate and Improve", Cisco. URL: <https://blogs.cisco.com/networking/enterprise-network-availability-how-to-calculate-and-improve>
7. Єременко, О. С., Лемешко, В. О., Куренко, В. О. (2023), "Дослідження показників надійності фрагменту локальної інфокомунікаційної мережі", Проблеми телекомунікацій, No. 2(33), С. 14–43. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2023.2.02>
8. ДСТУ 2506-94 (1995), Державний стандарт України. Засоби обчислювальної техніки. Відмовостійкість і живучість. Загальні технічні вимоги. Київ: Держстандарт, 4 с.
9. Коренівська, О. Л., Бенедицький, Б. В. (2020), Надійність, експлуатація та ремонт радіоелектронної та телекомунікаційної техніки. Житомир: Житомирська політехніка, 181 с.
10. Бобало, Ю. Я., Волочий, Б. Ю., Лозинський, О. Ю. та ін. (2013), Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 301 с.
11. Nedostup, D., Solomianyi, M., Mamon, R. (2023), "End-to-End Network Resilience, Security, and QoS in SD-WAN", Інформатика, Математика, Автоматика ІМА :: 2023: матеріали та програма Міжнародної наукової конференції молодих учених, м. Суми, 24-28 квітня 2023 р., Суми : СумДУ, С. 39.
12. MPLS Traffic Engineering Fast Reroute – Link Protection. Cisco Press. URL: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/iosxml/ios/mp\\_te\\_path\\_protect/configuration/xr-16-11/mp-te-path-protect-xr-16-11-book/mppls-traffic-engineering-fast-reroute-link-and-node-protection.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/iosxml/ios/mp_te_path_protect/configuration/xr-16-11/mp-te-path-protect-xr-16-11-book/mppls-traffic-engineering-fast-reroute-link-and-node-protection.html)
13. Єременко, О. С., Євдокименко, М. О. (2018), "Огляд теоретичних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах", Проблеми телекомунікацій, No. 1(22), С. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2018.1.02>
14. Лемешко, О. В., Невзорова, О. С., Єременко, О. С., Євсєєва, О. Ю. (2016), Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Управління та маршрутизація в ТКС» для студентів денної форми навчання спеціальності 6.050903 – Телекомунікації. Харків: ХНУРЕ, 64 с.