

УДК 621.391

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОТОКОЛУ МАРШРУТИЗАЦІЇ EIGRP ЩОДО ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ТА БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ



[С.В. ГАРКУША](#)

Полтавський університет економіки і торгівлі



[Р.С. СИТНІКОВ](#), [В.А. ЛОШАКОВ](#), [А.А. АКУЛИНЧЕВ](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Abstract – The article presents an experimental study of the proprietary EIGRP protocol in the GNS3 environment to analyze its properties regarding support for multipath, fault-tolerant routing strategies, and the impact of these solutions on load balancing across primary routes with different metrics. The experiments were conducted on a network topology for several sets of initial data regarding interface/route metrics and variance coefficient values, which influenced the selection of optimal paths, the set of primary and backup routes for ensuring the fault tolerance of the information and communication network (ICN), as well as the load balancing between them both under normal operating conditions and in the event of network equipment failures. The results of the experimental study confirmed the fast convergence and adaptation to network state changes caused by variations in route metrics and ICN topology due to component failures. The adaptation decisions were accompanied by a revision of the optimal paths, changes in the set of primary and backup routes, and adjustments in load balancing between the primary routes to improve the quality of service. It was demonstrated that the EIGRP protocol balances load by automatically recalculating the ratio of share counter values for each primary path in the routing table, which is inversely proportional to the metric ratios of optimal and non-optimal routes. This is done to equalize the load across routes with different metrics, level packet delays across different paths, and minimize packet jitter caused by multipath routing. Monitoring of routing and topology tables enables real-time tracking of changes to the set of optimal and non-optimal, primary and backup paths, along with their characteristics and statuses. The loop-prevention mechanism in EIGRP also prevents the use of high-metric paths for load balancing.

Анотація – Стаття присвячена експериментальному дослідженню пропрієтарного протоколу EIGRP у середовищі GNS3 з метою аналізу його властивостей з погляду підтримки стратегій багатошляхової відмовостійкої маршрутизації та впливу цих рішень на порядок балансування навантаження за основними маршрутами, які мають різну метрику. Експерименти проведені на мережній топології для декількох варіантів вихідних даних щодо метрик інтерфейсів/маршрутів і значень коефіцієнту варіації (variance), які впливали на вибір оптимальних шляхів, множини основних та резервних маршрутів при забезпеченні відмовостійкості інфокомунікаційної мережі (ІКМ), а також на порядок балансування навантаження між ними, як у нормальних умовах експлуатації, так і за умов відмов мережного обладнання. Результати експериментального дослідження підтвердили швидку конвергенцію та адаптацію до зміни стану мережі, спричинених зміною метрик маршрутів і топології ІКМ через відмову її елементів. Рішення щодо адаптації супроводжувалися переглядом оптимальних шляхів, зміною множини основних і резервних маршрутів, а також порядку балансування навантаження між основними маршрутами з метою покращення рівня якості обслуговування. Продемонстровано, що протокол EIGRP балансує навантаження на підставі автоматичного перерахунку співвідношення між значеннями лічильників для кожного основного шляху з маршрутною таблицею, які об'єднані до співвідношення метрик оптимального і неоптимальних маршрутів. Це здійснюється з метою вирівнювання завантаженості маршрутів, які мають різну метрику, та повинно призвести до вирівнювання затримок пакетів, що передаються різними шляхами, та мінімізації значення джитеру пакетів, обумовленого реалізацією багатошляхової маршрутизації. Моніторинг таблиць маршрутизації та топології дозволяє відслідковувати у реальному часі зміни у множині оптимальних і неоптимальних, основних і резервних шляхів, а також їхніх характеристик і статусів. Механізм боротьби з петлями, який підтримується у EIGRP, також забороняє використання шляхів при балансуванні навантаження, які мають високі значення маршрутної метрики.

Вступ

Інформаційно-комунікаційні мережі (ІКМ) відповідно до принципів своєї побудови та функціонування традиційно відносять до найбільш складних систем, які були штучно створені людством. Це обумовлено, по-перше, аспектами територіальної розподіленості та масштабності, так як ІКМ окутують декілька разів всю нашу планету,

а окремі її елементи вже давно використовуються у ближньому та далекому космосі. Додатковим аспектом складності також виступає неоднорідність ІКМ з точки зору використання різноманітних мережних топологій, комунікаційних технологій та стеків протоколів управління процесами обміну інформацією [1-4].

До ключових та найбільш важливих властивостей ІКМ традиційно відносять такі (рис. 1):

- надійність;
- відмовостійкість;
- мультисервісність та якість обслуговування;
- безпека та кіберстійкість;
- масштабованість.

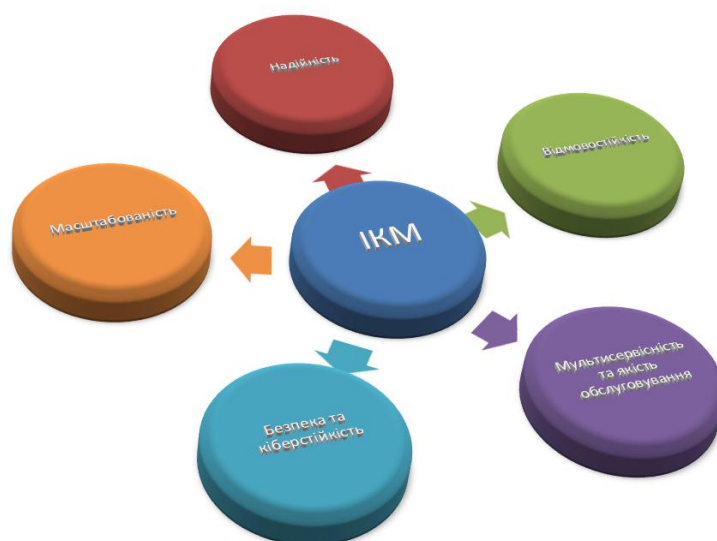


Рис. 1. Основні властивості ІКМ

Кожна з перелічених властивостей кількісно характеризується множиною показників, за допомогою яких можна чітко встановити відповідність ІКМ численним вимогам, які висуваються користувачами та операторами зв'язку. Показником надійності та відмовостійкості, наприклад, може виступати ймовірність безвідмовної роботи окремого пристрою, маршруту або мережі взагалі. У свою чергу, якість обслуговування (Quality of Service, QoS) може кількісно оцінюватися через показники мережної продуктивності (пропускна здатність, середня затримка пакетів та ймовірність їхніх втрат) та показники якості, яка сприймається (Quality of Experience, QoE) [3, 4].

Для досягнення цілей та виконання вимог, які висуваються до ІКМ, залучаються всі доступні ресурси, які формуються та розподіляються на кожному із рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем (Open System Interconnection, OSI). Мова йде, як правило, про частотно-часовий та просторовий ресурс, пропускну здатність каналів зв'язку/маршрутів, буферну ємність та обчислювальну потужність пристроїв тощо. З цією метою на кожному з рівнів OSI використовуються відповідні механізми та протоколи, які повинні оптимізувати процес розподілу доступного мережного ресурсу

для досягнення заданого рівня надійності/відмовостійкості, якості обслуговування та мережної безпеки [2]. Досить універсальним засобом формування та розподілу ресурсу ІКМ на мережному рівні OSI традиційно виступають протоколи маршрутизації [5, 6]. Саме на них покладені ключові задачі щодо формування (визначення, вибору, розрахунку) маршрутів та порядку балансування навантаження в ІКМ.

I. Порівняльний аналіз протоколів IP-маршрутизації

Серед протоколів маршрутизації, які використовуються в мережах IP (Internet Protocol), основними зараз є RIP (Routing Information Protocol) другої версії (RIPv2) для IPv4 або наступного покоління (next generation, ng) – RIPvng для IPv6, EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol), OSPF (Open Shortest Path First), інтегрована під IP-мережі версія IS-IS (Intermediate System to Intermediate System) та BGP (Border Gateway Protocol) [2, 5 – 7]. У табл. 1 представлено результати порівняльного аналізу перерахованих протоколів за їхніми ключовими характеристиками.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз основних протоколів IP-маршрутизації

Характеристика	Назва протоколу				
	RIPv2	EIGRP	OSPF	IS-IS	BGP
Розробник	IETF	Cisco	IETF	ISO	IETF
Клас протоколу	IGP	IGP	IGP	IGP	EGP
Тип протоколу	Дистанційно-векторний	Гібридний	Стану каналів	Стану каналів	Шлях-векторний
Алгоритм маршрутизації	Баллмана-Форда	DUAL	Дейкстри	Дейкстри	Баллмана-Форда
Оновлення маршрутних таблиць	Періодичне, 30 с	Тригерне (за вимогою)	Тригерне (за вимогою)	Тригерне (за вимогою)	Тригерне (за вимогою)
Тип метрики	Динамічна проста	Динамічна складна	Динамічна складна	Статична	Динамічна складна (на основі атрибутів)
Балансування навантаження	Підтримується	Підтримується	Підтримується	Підтримується	Підтримується
Підтримка резервних маршрутів	Ні	Так	Ні	Ні	Ні
Швидкість конвергенції	Низька	Висока	Висока	Висока	Низька (але стабільна)
Масштабованість	Низька	Висока	Висока	Висока	Дуже висока
Автентифікація	MD5	MD5	MD5, SHA	MD5	MD5, TCP-AO

З табл. 1 можна зробити такі висновки:

- більшість з перелічених протоколів мають статус міжнародних стандартів на рівні міжнародної організації зі стандартизації (International Organization for Standardization, ISO) або організації зі стандартизації в Інтернет (Internet Engineering

Task Force, IETF). Лише протокол EIGRP є пропрієтарним протоколом, розробленим корпорацією Cisco, специфікація якого вже з 2013 року є відкритою, а у 2016 році IETF опублікувало RFC 7868 «Cisco's Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP)» [8];

- на ринку протоколів внутрішнього шлюзу (Interior Gateway Protocol, IGP) присутні одночасно декілька рішень (RIPv2, EIGRP, OSPF, IS-IS), тоді як протоколом зовнішнього шлюзу (Exterior Gateway Protocol, EGP) на практиці виступає, як правило, протокол BGPv4. На обладнання різних виробників інколи допускається використання протоколів не за основною областю застосування. Наприклад, коли протокол EIGRP застосовується як рішення EGP, а протокол BGP застосовується як рішення IGP. Проте ці варіанти рішень не є пріоритетними і їм відповідають максимальні значення адміністративної відстані – 170 та 200 відповідно;

- перелічені протоколи відносяться до різних типів – стану каналів, дистанційно-векторної, шлях-векторної та гібридної маршрутизації, що визначає важливі аспекти збору та обробки інформації про стан мережі й формування маршрутних таблиць;

- традиційно протоколи дистанційно-векторної маршрутизації працюють на основі алгоритму пошуку найкоротших маршрутів Балмана-Форда, протоколи стану каналів – алгоритму Дейкстри, а гібридний протокол EIGRP використовує алгоритм дифузійного оновлення (Diffusing Update Algorithm, DUAL);

- це ж стосується принципів оновлення маршрутних таблиць: у дистанційно-векторних протоколах перерозрахунок маршрутів здійснюється періодично (наприклад, у RIP це 30 секунд), а у протоколах стану каналів – за вимогою, тобто коли відбудуться зміни, що впливають на метрики інтерфейсів маршрутизаторів та маршрутів взагалі;

- метрики інтерфейсів та маршрутів дані протоколи використовують дуже різноманітні. Від статичних, які не змінюються у часі (як у протоколі IS-IS), до динамічних. Від досить простих, коли метрикою виступає лише один мережний параметр або інтерфейсна характеристика, до складних (композитних), коли на значення метрики одночасно впливає множина показників;

- інтегральною характеристикою перелічених протоколів є підтримка балансування навантаження за множиною шляхів. Проте тільки EIGRP підтримує балансування навантаження за маршрутами з різною метрикою, тоді як інші протоколи можуть для цього використовувати лише маршрути, які мають однакову довжину;

- лише протокол EIGRP з метою підвищення відмовостійкості мережі підтримує механізм Feasible Successor, коли поруч з основним маршрутом розраховується та у разі потреби активується резервний маршрут у той час, коли маршрутизатор розраховує оновлений основний шлях. Інші протоколи використовують стандартні рішення щодо підвищення відмовостійкості на основі зменшення часу конвергенції мережі.

- переважна більшість протоколів забезпечують високу масштабованість маршрутних рішень, тобто можуть працювати у досить великих за кількістю маршрутизаторів мережах. Окремо слід зазначити, що протокол внутрішнього шлюзу OSPF реалізує ієрархічну маршрутизацію, коли автономна система, всередині якої він налаштований, розбивається на декілька областей з метою скорочення обсягів службового трафіка про стан мережі (областей) та зменшення часу конвергенції;

- всі проаналізовані протоколи підтримують MD5-автентифікацію для захисту від спуфінгу та забезпечення цілісності інформації маршрутизації.

Зважаючи на одержані результати порівняння протоколів IP-маршрутизації та отримані висновки, актуальною задачею є експериментальне дослідження властивостей балансування навантаження та відмовостійкості саме протоколу EIGRP, так як оптимізація його налаштувань містить багато цікавих нюансів, заснованих на використанні складної метрики, основних та резервних маршрутів різної довжини [9, 10].

II. Опис моделі експерименту

Дослідження властивостей протоколу маршрутизації EIGRP відбувалося на прикладі мережної топології, наведеної на рис. 2 та сконфігурованої у середовищі GNS3. До складу мережі входило шість маршрутизаторів (R1÷R6). Маршрутизатори R1 та R6 – це пристрої Cisco C7200, а R2÷R5 – це пристрої Cisco C2691. За допомогою даних маршрутизаторів між двома мережами доступу (МД1 та МД2), що умовно представлені на рис. 2 комп'ютерами PC1 та PC2, створено чотири шляхи (табл. 2). Будь-який з маршрутів починався на маршрутизаторі R1, а закінчувався у МД2. Поруч з кожним пристроєм наведено тип і номер задіяного інтерфейсу, а також налаштовані на ньому IP-адреса/маска.

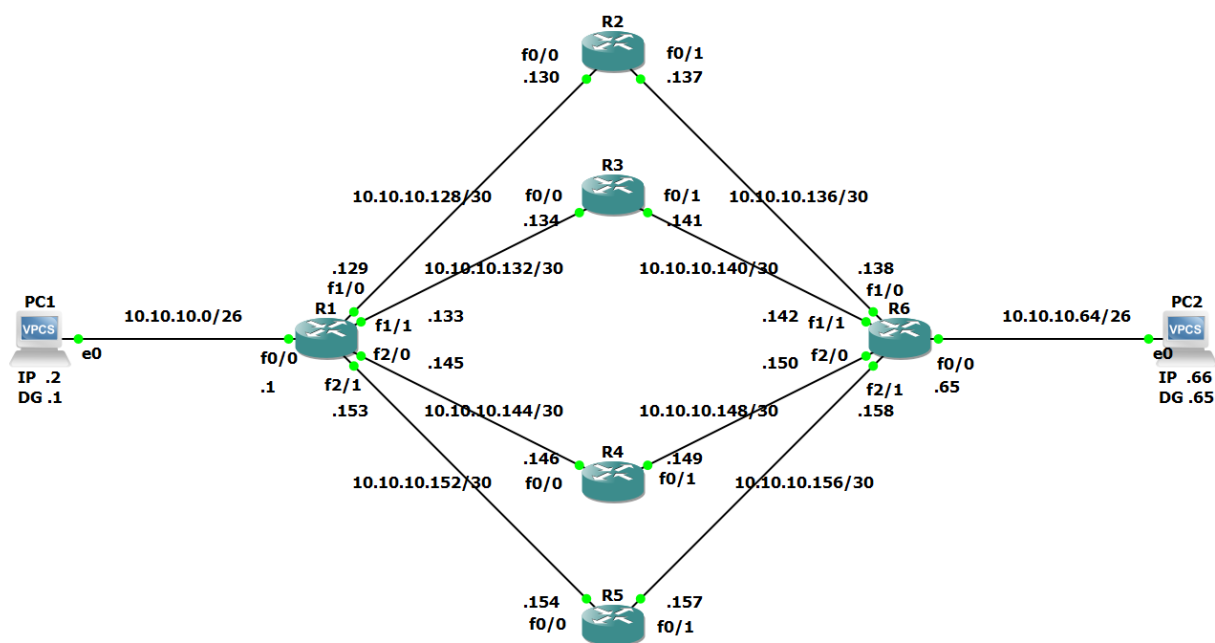


Рис. 2. Топологія досліджуваної мережі

У табл. 2 також наведені параметри інтерфейсів маршрутизаторів мережі, розраховані метрики маршрутів та їхні компоненти за протоколом EIGRP. До компонент метрики шляху відносилися його пропускна здатність (ПЗ) та часова затримка пакетів

вздовж маршруту (маршрутна затримка, M3). Метрики маршруту R1-R5-R6 розраховано для двох варіантів вихідних даних щодо затримок пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів R1 та R5. У процесі дослідження до уваги були прийняті два типи метрик (довжин, відстаней) маршрутів: можлива відстань (Feasible Distance, FD) та оголошена відстань (Advertised Distance, AD). FD – це повна метрика маршруту від R1 до M42, а AD – це частина довжини маршруту від наступного сусіда R1 до M42. Тобто для кожного окремого маршруту завжди $AD < FD$ [9, 10].

Таблиця 2. Параметри інтерфейсів маршрутизаторів та метрики маршрутів

№ маршруту	Маршрут	ПЗ маршруту, Кбіт/с	Затримка пакетів на інтерфейсах, мкс						M3, мкс	FD	AD
1	R1-R2-R6	100000	R1: f1/0	10	R2: f0/1	10	R6: f0/0	10	30	26368	26112
2	R1-R3-R6	100000	R1: f1/1	500	R3: f0/1	10	R6: f0/0	10	520	38912	26112
3	R1-R4-R6	100000	R1: f2/0	1000	R4: f0/1	10	R6: f0/0	10	1020	51712	26112
4	R1-R5-R6 (варіант 1)	100000	R1: f2/1	2000	R5: f0/1	10	R6: f0/0	10	2020	77312	26112
	R1-R5-R6 (варіант 2)	100000	R1: f2/1	500	R5: f0/1	100	R6: f0/0	10	610	41216	28416

На початку проведення експериментів, пов'язаних із визначенням множини основних/резервних маршрутів та порядку балансування навантаження між ними, акцентуємо увагу на двох важливих моментах.

По-перше, за замовчуванням протокол EIGRP реалізує багатошляхову маршрутизацію та автоматично балансує навантаження виключно за маршрутами з однаковою метрикою. Для використання маршрутів з різною метрикою потрібно адміністративно налаштувати керуючий параметр *variance*, який за замовчуванням дорівнює одиниці та може бути збільшений до 128. Значення *variance* визначає, у скільки разів метрика неоптимального маршруту може перевищувати метрику оптимального шляху, щоб неоптимальний маршрут також був залучений до передачі пакетів та був присутнім у таблиці маршрутизації.

По-друге, протокол EIGRP за допомогою алгоритму DUAL намагається запобігти створенню петель у розрахованих маршрутах. Цей протокол не буде використовувати неоптимальний шлях при балансуванні навантаження, якщо його AD перевищує величину FD оптимального шляху.

III. Перший експеримент: визначення основного та резервних маршрутів без балансування навантаження

На рис. 3 наведено топологію досліджуваної мережі, зазначені оптимальний (основний) та неоптимальні (резервні) маршрути для першого варіанту вихідних даних відносно четвертого маршруту (табл. 2). Біля кожного інтерфейсу маршрутизатора додатково вказано часову затримку пакетів (Delay) у мкс. Параметр *variance* дорівнював одиниці, що забороняло балансування навантаження за шляхами з різною метрикою.

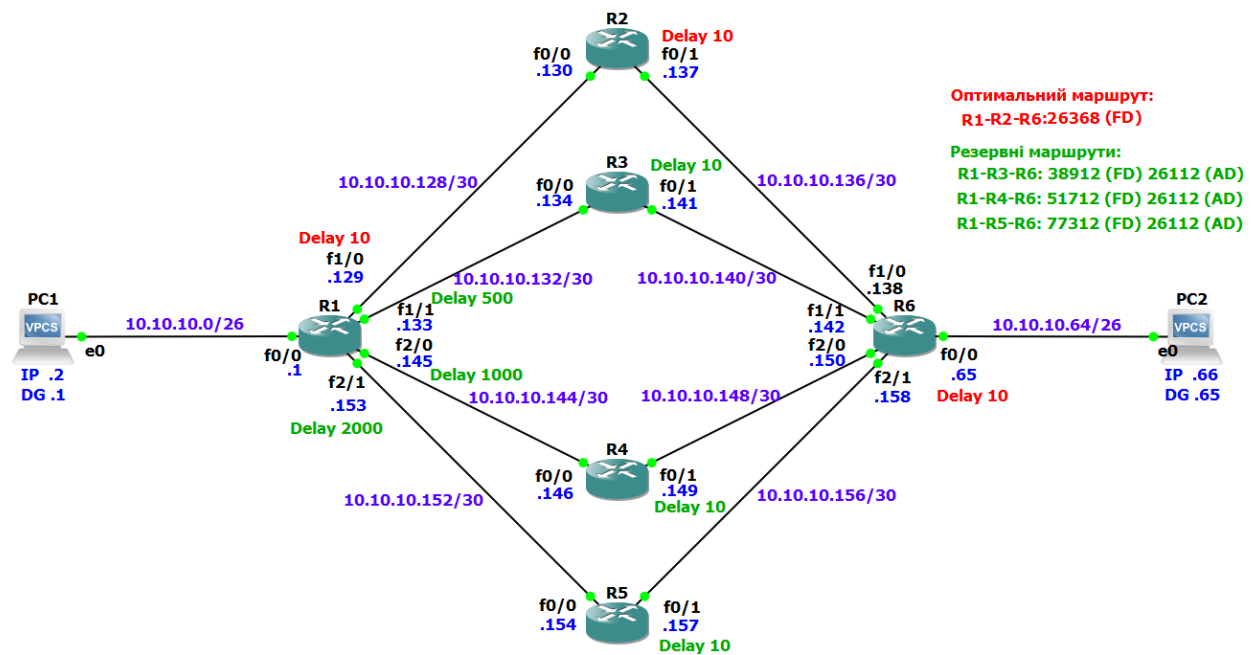


Рис. 3. Топологія досліджуваної мережі для першого варіанту вихідних даних (variance=1)

На рис. 4 представлено таблицю маршрутизації на маршрутизаторі R1.

```
R1#show ip route eigrp
Codes: L - local, C - connected, S - static, R - RIP, M - mobile, B - BGP
       D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
       N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
       E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2
       i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
       ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
       o - ODR, P - periodic downloaded static route, H - NHRP, l - LISP
       a - application route
       + - replicated route, % - next hop override

Gateway of last resort is not set

 10.0.0.0/8 is variably subnetted, 15 subnets, 3 masks
D    10.10.10.64/26 [90/26368] via 10.10.10.130, 00:38:23, FastEthernet1/0
D    10.10.10.136/30
      [90/26112] via 10.10.10.130, 00:38:23, FastEthernet1/0
D    10.10.10.140/30
      [90/28672] via 10.10.10.130, 00:38:23, FastEthernet1/0
D    10.10.10.148/30
      [90/28672] via 10.10.10.130, 00:38:23, FastEthernet1/0
D    10.10.10.156/30
      [90/28672] via 10.10.10.130, 00:38:33, FastEthernet1/0
R1#
```

Рис. 4. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 для першого варіанту вихідних даних (variance=1)

На рис. 5 наведено фрагмент таблиці топології із зазначенням основного (successor) та множини трьох резервних маршрутів до M42 (10.10.10.64/26).

```
R1#show ip eigrp topology
EIGRP-IPv4 Topology Table for AS(12)/ID(10.10.10.153)
Codes: P - Passive, A - Active, U - Update, Q - Query, R - Reply,
       r - reply Status, s - sia Status

P 10.10.10.152/30, 1 successors, FD is 76800
   via Connected, FastEthernet2/1
   via 10.10.10.146 (79616/54016), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.134 (66816/54016), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.130 (54272/54016), FastEthernet1/0
P 10.10.10.64/26, 1 successors, FD is 26368
   via 10.10.10.130 (26368/26112), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (38912/26112), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (51712/26112), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.154 (77312/26112), FastEthernet2/1
P 10.10.10.136/30, 1 successors, FD is 26112
   via 10.10.10.130 (26112/25856), FastEthernet1/0
```

Рис. 5. Таблиця топології на маршрутизаторі R1 для першого варіанту вихідних даних (variance=1)

За результатами аналізу отриманих та наведених на рис. 3-5 результатів можна зробити висновок, що на маршрутизаторі R1 протоколом EIGRP створені чотири динамічних маршрути від R1 до мережі доступу 10.10.10.64/26. Основним маршрутом призначено оптимальний шлях R1-R2-R6 з мінімальною метрикою (FD=26368), тільки він зазначений у таблиці маршрутизації (рис. 4). Інші три маршрути R1-R3-R6, R1-R4-R6 та R1-R5-R6 мають метрики FD 38912, 51712 та 77312 відповідно, що перевищує метрику оптимального маршруту (FD=26368) при variance=1. Тому ці три маршрути відсутні у маршрутній таблиці (рис. 4) та використовуватися при передачі пакетів від R1 до МД2 не будуть. Оскільки AD у цих неоптимальних маршрутів дорівнює 26112, а це менше за FD оптимального маршруту (26368), то всі вони мають статус резервних та присутні у таблиці топології (рис. 5). Більш деталізовану інформацію щодо характеристик побудованих маршрутів можна побачити у таблицях топології (рис. 6) та маршрутизації (рис. 7) на маршрутизаторі R1, які відносяться до мережі 10.10.10.64/26.

Таким чином, у цьому випадку всі пакети від R1 до МД2 будуть передаватися лише з використанням одного основного маршруту, який є оптимальним. Всі інші маршрути є резервними та зможуть по-одному долучатися до передачі пакетів лише у випадку відмови основного маршруту відповідно до зростання значення своєї метрики.

На рис. 8 наведено топологію досліджуваної мережі, зазначені оптимальний (основний) та неоптимальні (резервні) маршрути для другого варіанту вихідних даних відносно четвертого маршруту (табл. 2), та коли параметр variance все ще дорівнював одиниці.


```
R1#show ip eigrp topology 10.10.10.64/26
EIGRP-IPv4 Topology Entry for AS(12)/ID(10.10.10.153) for 10.10.10.64/26
State is Passive, Query origin flag is 1, 1 Successor(s), FD is 26368
Descriptor Blocks:
  10.10.10.130 (FastEthernet1/0), from 10.10.10.130, Send flag is 0x0
    Composite metric is (26368/26112), route is Internal
    Vector metric:
      Minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Total delay is 30 microseconds
      Reliability is 255/255
      Load is 1/255
      Minimum MTU is 1500
      Hop count is 2
  10.10.10.134 (FastEthernet1/1), from 10.10.10.134, Send flag is 0x0
    Composite metric is (38912/26112), route is Internal
    Vector metric:
      Minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Total delay is 520 microseconds
      Reliability is 255/255
      Load is 1/255
      Minimum MTU is 1500
      Hop count is 2
  10.10.10.146 (FastEthernet2/0), from 10.10.10.146, Send flag is 0x0
    Composite metric is (51712/26112), route is Internal
    Vector metric:
      Minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Total delay is 1020 microseconds
      Reliability is 255/255
      Load is 1/255
      Minimum MTU is 1500
      Hop count is 2
  10.10.10.154 (FastEthernet2/1), from 10.10.10.154, Send flag is 0x0
    Composite metric is (77312/26112), route is Internal
    Vector metric:
      Minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Total delay is 2020 microseconds
      Reliability is 255/255
      Load is 1/255
      Minimum MTU is 1500
      Hop count is 2
```

Рис. 6. Таблиця топології на R1 до мережі 10.10.10.64/26 для першого варіанту вихідних даних (variance=1)

```
R1#show ip route 10.10.10.64
Routing entry for 10.10.10.64/26
  Known via "eigrp 12", distance 90, metric 26368, type internal
  Redistributing via eigrp 12
  Last update from 10.10.10.130 on FastEthernet1/0, 00:00:16 ago
  Routing Descriptor Blocks:
    * 10.10.10.130, from 10.10.10.130, 00:00:16 ago, via FastEthernet1/0
      Route metric is 26368, traffic share count is 1
      Total delay is 30 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
      Loading 1/255, Hops 2
R1#
```

Рис. 7. Таблиця маршрутизації на R1 до мережі 10.10.10.64/26 для першого варіанту вихідних даних (variance=1)

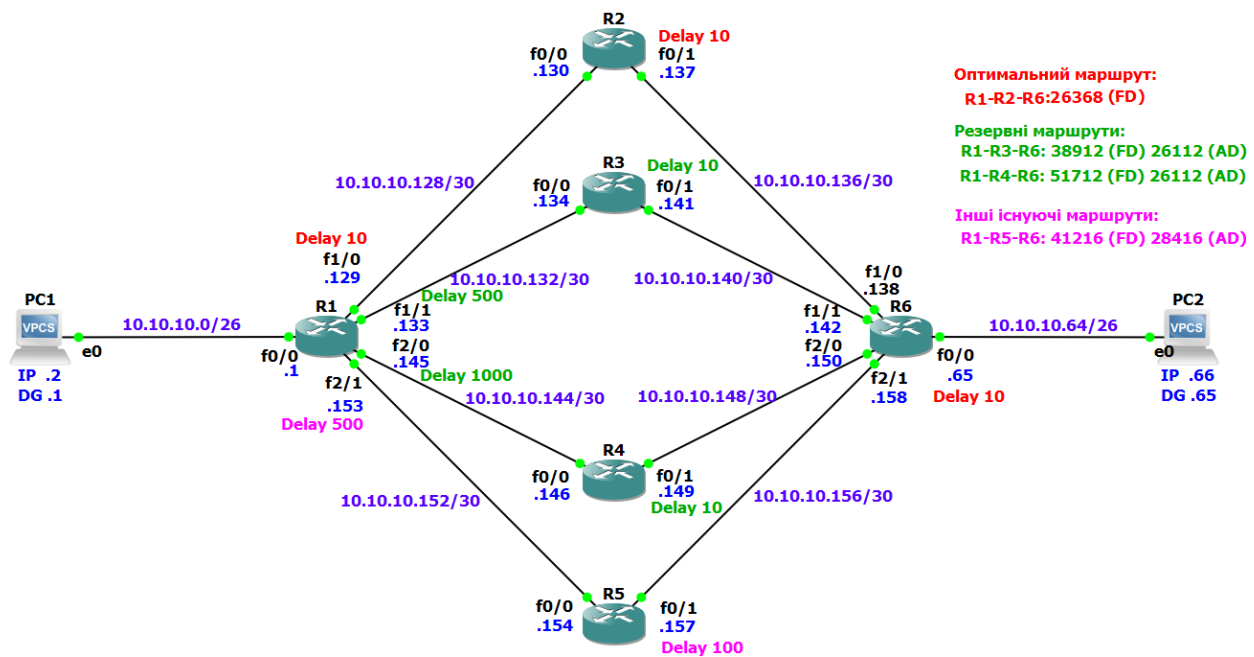


Рис. 8. Топологія досліджуваної мережі для другого варіанту вихідних даних (variance=1)

На рис. 9 наведено таблицю топології всіх існуючих маршрутів, а на рис. 10 – таблицю топології із зазначенням оптимальних та неоптимальних маршрутів, які створені на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних.

```
R1#show ip eigrp topology all-links
EIGRP-IPv4 Topology Table for AS(12)/ID(10.10.10.153)
Codes: P - Passive, A - Active, U - Update, Q - Query, R - Reply,
       r - reply Status, s - sia Status

P 10.10.10.152/30, 1 successors, FD is 38400, serno 4
   via Connected, FastEthernet2/1
   via 10.10.10.130 (31232/30976), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (43776/30976), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (56576/30976), FastEthernet2/0
P 10.10.10.64/26, 1 successors, FD is 26368, serno 32
   via 10.10.10.130 (26368/26112), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (38912/26112), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (51712/26112), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.154 (41216/28416), FastEthernet2/1
P 10.10.10.136/30, 1 successors, FD is 26112, serno 31
   via 10.10.10.130 (26112/25856), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (41216/28416), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (54016/28416), FastEthernet2/0
```

Рис. 9. Таблиця топології всіх існуючих маршрутів на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних (variance=1)

```
R1#show ip eigrp topology
EIGRP-IPv4 Topology Table for AS(12)/ID(10.10.10.153)
Codes: P - Passive, A - Active, U - Update, Q - Query, R - Reply,
       r - reply Status, s - sia Status

P 10.10.10.152/30, 1 successors, FD is 38400
   via Connected, FastEthernet2/1
   via 10.10.10.130 (31232/30976), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (43776/30976), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (56576/30976), FastEthernet2/0
P 10.10.10.64/26, 1 successors, FD is 26368
   via 10.10.10.130 (26368/26112), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (38912/26112), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (51712/26112), FastEthernet2/0
P 10.10.10.136/30, 1 successors, FD is 26112
   via 10.10.10.130 (26112/25856), FastEthernet1/0
```

Рис. 10. Таблиця топології на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних (variance=1)

З них видно, що на маршрутизаторі R1 протоколом EIGRP взагалі створено ті ж самі, що і у попередньому прикладі (рис. 3) чотири динамічні маршрути від R1 до МД 10.10.10.64/26. Оптимальний маршрут R1-R2-R6 мав знову метрику FD 26368. Маршрути R1-R3-R6, R1-R4-R6 та R1-R5-R6 мали метрики 38912, 51712 та 41216 відповідно (рис. 9). Ці значення метрик перевищували метрику FD оптимального маршруту, тому ці шляхи не були представлені у таблиці маршрутизації і можуть розглядатися кандидатами на резервні шляхи. Для маршрутів R1-R3-R6 та R1-R4-R6 їхні AD склали 26112, що не перевищувало FD оптимального маршруту (26368). Тому ці маршрути отримали статус резервних у таблиці топології (рис. 10). Маршрут R1-R5-R6 з метрикою FD 41216 не став резервним (рис. 10), тому що має значення AD 28416, що є дещо більшим за значення FD оптимального маршруту (26368).

IV. Другий експеримент: визначення основних та резервних маршрутів із балансуванням навантаження

З метою дослідження властивостей протоколу EIGRP щодо балансування навантаження за шляхами з різною метрикою у роботі було змінено параметр variance. Його значення було підвищено до двох. На рис. 11 наведено топологію мережі, зазначені основні та резервний маршрути для першого варіанту вихідних даних відносно четвертого маршруту (табл. 2). Як вони були утворені, пояснюється на наступних рисунках.

Збільшення параметра variance супроводжувалося тим, що до передачі пакетів між R1 та МД2 долучалися всі шляхи, метрики FD яких не перевищували більше, а ніж у два рази метрику FD оптимального маршруту. Тобто не були більше 52736, бо метрика FD оптимального маршруту R1-R2-R6 залишилася на рівні 26368. Таким чином, всі маршрути, що мають метрики менше, ніж 52736, будуть занесені до таблиці маршрутизації (рис. 12).

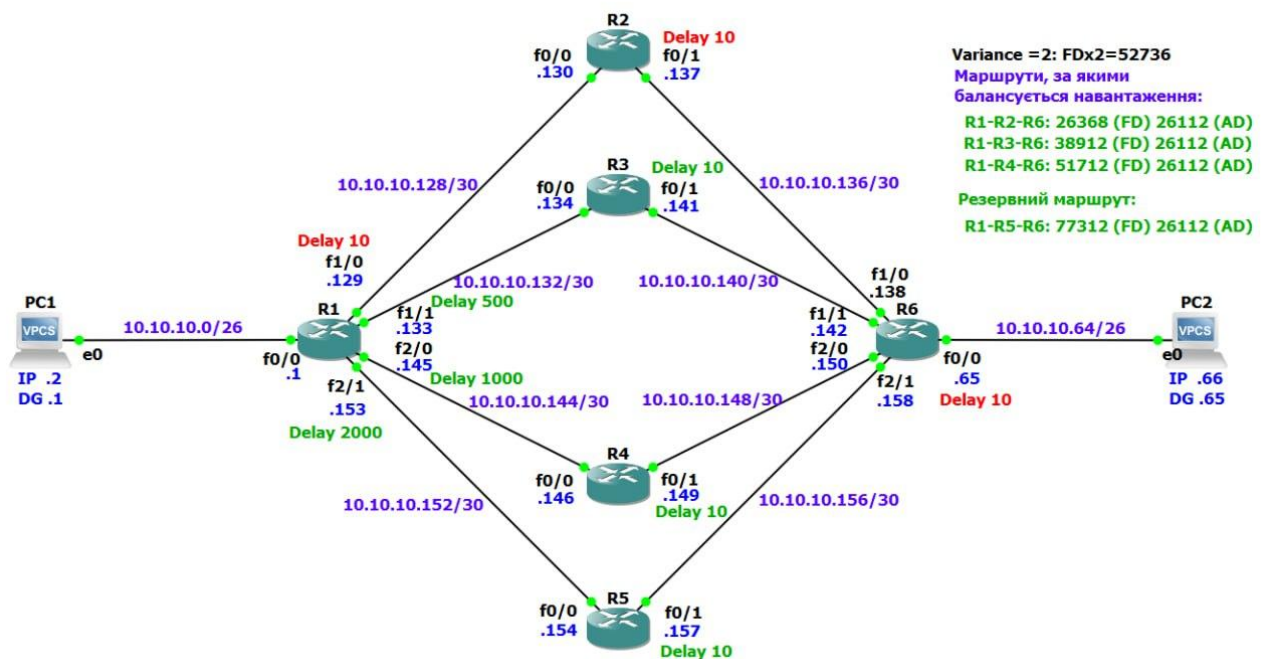


Рис. 11. Топологія досліджуваної мережі для першого варіанту вихідних даних (variance=2)

```
R1#show ip route eigrp
Codes: L - local, C - connected, S - static, R - RIP, M - mobile, B - BGP
D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2
i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
o - ODR, P - periodic downloaded static route, H - NHRP, l - LISP
a - application route
+ - replicated route, % - next hop override

Gateway of last resort is not set

10.0.0.0/8 is variably subnetted, 15 subnets, 3 masks
D    10.10.10.64/26 [90/51712] via 10.10.10.146, 00:00:16, FastEthernet2/0
      [90/38912] via 10.10.10.134, 00:00:16, FastEthernet1/1
      [90/26368] via 10.10.10.130, 00:00:16, FastEthernet1/0
D    10.10.10.136/30
      [90/26112] via 10.10.10.130, 00:00:16, FastEthernet1/0
D    10.10.10.140/30
      [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:16, FastEthernet2/0
      [90/38656] via 10.10.10.134, 00:00:16, FastEthernet1/1
      [90/28672] via 10.10.10.130, 00:00:16, FastEthernet1/0
D    10.10.10.148/30
      [90/51456] via 10.10.10.146, 00:00:16, FastEthernet2/0
      [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:16, FastEthernet1/1
      [90/28672] via 10.10.10.130, 00:00:16, FastEthernet1/0
D    10.10.10.156/30
      [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:16, FastEthernet2/0
      [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:16, FastEthernet1/1
      [90/28672] via 10.10.10.130, 00:00:16, FastEthernet1/0
R1#
```

Рис. 12. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 для першого варіанту вихідних даних (variance=2)

Це стосується маршрутів R1-R2-R6, R1-R3-R6 та R1-R4-R6, які мають метрики 28368, 38912 та 51712 відповідно. Шлях R1-R5-R6 має метрику 77312, що перевищує значення 52736, тому він не потрапляє до маршрутної таблиці (рис. 12), але, як і всі інші перераховані шляхи, присутній у таблиці топологій (рис. 13), бо значення їхніх метрик AD не перевищує величину FD оптимального шляху. У таблиці топології (рис. 13) вказується, що у мережі функціонує три основних шляхи (successors), а четвертий (R1-R5-R6) є резервним.

```
R1#show ip eigrp topology
EIGRP-IPv4 Topology Table for AS(12)/ID(10.10.10.153)
Codes: P - Passive, A - Active, U - Update, Q - Query, R - Reply,
       r - reply Status, s - sia Status

P 10.10.10.152/30, 1 successors, FD is 76800
   via Connected, FastEthernet2/1
   via 10.10.10.146 (79616/54016), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.134 (66816/54016), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.130 (54272/54016), FastEthernet1/0
P 10.10.10.64/26, 3 successors, FD is 26368
   via 10.10.10.130 (26368/26112), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (38912/26112), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (51712/26112), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.154 (77312/26112), FastEthernet2/1
P 10.10.10.136/30, 1 successors, FD is 26112
   via 10.10.10.130 (26112/25856), FastEthernet1/0
```

Рис. 13. Таблиця топології на маршрутизаторі R1 для першого варіанту вихідних даних (variance=2)

На рис. 14 наведено таблицю маршрутизації від маршрутизатора R1 до мережі 10.10.10.64/26, де можна спостерігати порядок балансування навантаження між визначеними основними маршрутами (табл. 3).

```
R1#show ip route 10.10.10.64
Routing entry for 10.10.10.64/26
  Known via "eigrp 12", distance 90, metric 26368, type internal
  Redistributing via eigrp 12
  Last update from 10.10.10.146 on FastEthernet2/0, 00:06:43 ago
  Routing Descriptor Blocks:
    10.10.10.146, from 10.10.10.146, 00:06:43 ago, via FastEthernet2/0
      Route metric is 51712, traffic share count is 122
      Total delay is 1020 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
      Loading 1/255, Hops 2
    10.10.10.134, from 10.10.10.134, 00:06:43 ago, via FastEthernet1/1
      Route metric is 38912, traffic share count is 163
      Total delay is 520 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
      Loading 1/255, Hops 2
    * 10.10.10.130, from 10.10.10.130, 00:06:43 ago, via FastEthernet1/0
      Route metric is 26368, traffic share count is 240
      Total delay is 30 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
      Loading 1/255, Hops 2
R1#
```

Рис. 14. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 до мережі 10.10.10.64/26 для першого варіанту вихідних даних (variance=2)

Таблиця 3. Порядок балансування навантаження між основними маршрутами для першого варіанту вихідних даних (variance=2)

Основні маршрути	Метрика маршруту	Частка трафіку
R1-R2-R6	26368	240
R1-R3-R6	38912	163
R1-R4-R6	51712	122

Порядок балансування визначається значеннями лічильників (share count) для кожного основного шляху (рис. 14), які далі перенесені до табл. 3. Таким чином, трафік від маршрутизатора R1 до мережі доступу 10.10.10.64/26 за допомогою протоколу EIGRP буде балансуватися між трьома основними маршрутами у пропорції 240:163:122. Тобто, наприклад, спочатку буде відправлено 240 пакетів через оптимальний маршрут R1-R2-R6, потім 163 пакети – через другий за значенням метрики маршрут (R1-R3-R6), а вже потім 122 пакети – вздовж R1-R4-R6.

У протоколі EIGRP співвідношення значень лічильників обернено до співвідношення метрик оптимального і неоптимальних маршрутів. Це, скоріш за все, здійснюється з метою вирівнювання завантаженості маршрутів, які мають різну метрику. В ідеалі ці дії повинні призвести також до вирівнювання затримок пакетів, що передаються різними шляхами, та мінімізації значення джитеру (варіації затримки) пакетів, обумовленого реалізацією багатошляхової маршрутизації.

На рис. 15 представлена топологія досліджуваної мережі для другого варіанту вихідних даних відносно четвертого маршруту (табл. 2), коли параметр variance дорівнював двом.

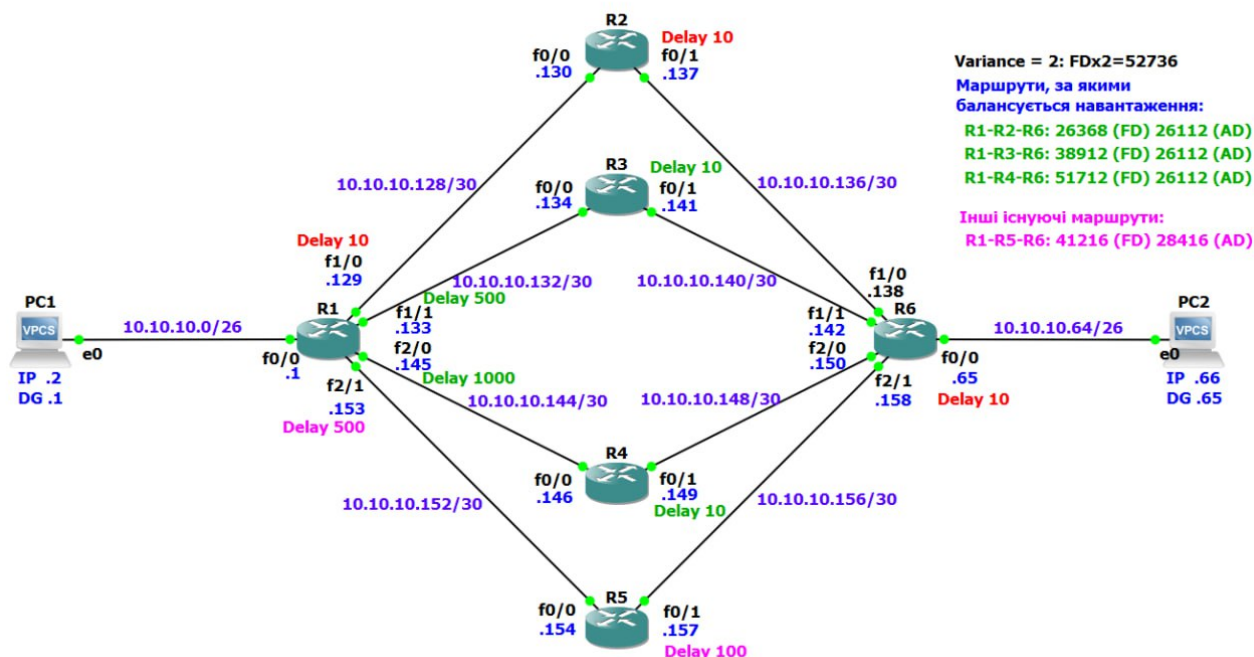


Рис. 15. Топологія досліджуваної мережі для другого варіанту вихідних даних (variance=2)

На рис. 16 та 17 наведено таблиці маршрутизації та топології на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних, коли $\text{variance} = 2$.

```
R1#show ip route eigrp
Codes: L - local, C - connected, S - static, R - RIP, M - mobile, B - BGP
       D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
       N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
       E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2
       i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
       ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
       o - ODR, P - periodic downloaded static route, H - NHRP, l - LISP
       a - application route
       + - replicated route, % - next hop override

Gateway of last resort is not set

    10.0.0.0/8 is variably subnetted, 15 subnets, 3 masks
D       10.10.10.64/26 [90/51712] via 10.10.10.146, 00:00:39, FastEthernet2/0
                        [90/38912] via 10.10.10.134, 00:00:39, FastEthernet1/1
                        [90/26368] via 10.10.10.130, 00:00:39, FastEthernet1/0
D       10.10.10.136/30
                        [90/26112] via 10.10.10.130, 00:01:09, FastEthernet1/0
D       10.10.10.140/30
                        [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:39, FastEthernet2/0
                        [90/38656] via 10.10.10.134, 00:00:39, FastEthernet1/1
                        [90/28672] via 10.10.10.130, 00:00:39, FastEthernet1/0
D       10.10.10.148/30
                        [90/51456] via 10.10.10.146, 00:00:39, FastEthernet2/0
                        [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:39, FastEthernet1/1
                        [90/28672] via 10.10.10.130, 00:00:39, FastEthernet1/0
D       10.10.10.156/30
                        [90/40960] via 10.10.10.154, 00:00:39, FastEthernet2/1
                        [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:39, FastEthernet2/0
                        [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:39, FastEthernet1/1
                        [90/28672] via 10.10.10.130, 00:00:39, FastEthernet1/0
R1#
```

Рис. 16. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних ($\text{variance}=2$)

```
R1#show ip eigrp topology
EIGRP-IPv4 Topology Table for AS(12)/ID(10.10.10.153)
Codes: P - Passive, A - Active, U - Update, Q - Query, R - Reply,
       r - reply Status, s - sia Status

P 10.10.10.152/30, 1 successors, FD is 38400
   via Connected, FastEthernet2/1
   via 10.10.10.146 (56576/30976), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.134 (43776/30976), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.130 (31232/30976), FastEthernet1/0
P 10.10.10.64/26, 3 successors, FD is 26368
   via 10.10.10.130 (26368/26112), FastEthernet1/0
   via 10.10.10.134 (38912/26112), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (51712/26112), FastEthernet2/0
P 10.10.10.136/30, 1 successors, FD is 26112
   via 10.10.10.130 (26112/25856), FastEthernet1/0
```

Рис. 17. Таблиця топології на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних ($\text{variance}=2$)

Як видно з рис. 16 та 17, на маршрутизаторі R1 протоколом EIGRP створені чотири динамічні маршрути від R1 до мережі 10.10.10.64/26. Як і раніше, три основні маршрути R1-R2-R6, R1-R3-R6 та R1-R4-R6 мали метрики 28368, 38912 і 51712 відповідно. Однак у цьому випадку маршрут R1-R5-R6, який мав метрику 41216, не отримав статус резервного маршруту, тому що має AD 28416, що є більшим значенням за FD оптимального маршруту (26368). На рис. 18 наведено таблицю топології всіх існуючих маршрутів від R1 до мережі 10.10.10.64/26 для другого варіанту вихідних даних. З цієї таблиці можна зробити висновок, що маршрутизатору R1 все відомо про маршрут R1-R5-R6, але він його свідомо не включає до складу резервних рішень (рис. 17).

```
R1#show ip eigrp topology 10.10.10.64/26
EIGRP-IPv4 Topology Entry for AS(12)/ID(10.10.10.153) for 10.10.10.64/26
State is Passive, Query origin flag is 1, 3 Successor(s), FD is 26368
Descriptor Blocks:
 10.10.10.130 (FastEthernet1/0), from 10.10.10.130, Send flag is 0x0
   Composite metric is (26368/26112), route is Internal
   Vector metric:
     Minimum bandwidth is 100000 Kbit
     Total delay is 30 microseconds
     Reliability is 255/255
     Load is 1/255
     Minimum MTU is 1500
     Hop count is 2
 10.10.10.134 (FastEthernet1/1), from 10.10.10.134, Send flag is 0x0
   Composite metric is (38912/26112), route is Internal
   Vector metric:
     Minimum bandwidth is 100000 Kbit
     Total delay is 520 microseconds
     Reliability is 255/255
     Load is 1/255
     Minimum MTU is 1500
     Hop count is 2
 10.10.10.146 (FastEthernet2/0), from 10.10.10.146, Send flag is 0x0
   Composite metric is (51712/26112), route is Internal
   Vector metric:
     Minimum bandwidth is 100000 Kbit
     Total delay is 1020 microseconds
     Reliability is 255/255
     Load is 1/255
     Minimum MTU is 1500
     Hop count is 2
 10.10.10.154 (FastEthernet2/1), from 10.10.10.154, Send flag is 0x0
   Composite metric is (41216/28416), route is Internal
   Vector metric:
     Minimum bandwidth is 100000 Kbit
     Total delay is 610 microseconds
     Reliability is 255/255
     Load is 1/255
     Minimum MTU is 1500
     Hop count is 2
R1#
```

Рис. 18. Таблиця топології на маршрутизаторі R1 до мережі 10.10.10.64/26 для другого варіанту вихідних даних (variance=2)

Порядок балансування навантаження між основними маршрутами в ІКМ не змінився та відповідає рішення, представленому у табл. 3.

V. Третій експеримент: визначення основних та резервних маршрутів із балансуванням навантаження за умови відмов

Метою третього експерименту є дослідження процесу балансування навантаження в ІКМ за умови відмов, тобто коли той чи інший елемент мережі виходить з ладу та не виконує певний час свої функції. На рис. 19 наведено топологію досліджуваної мережі після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2 для першого варіанту вихідних даних (табл. 2), коли параметр variance дорівнював двом.

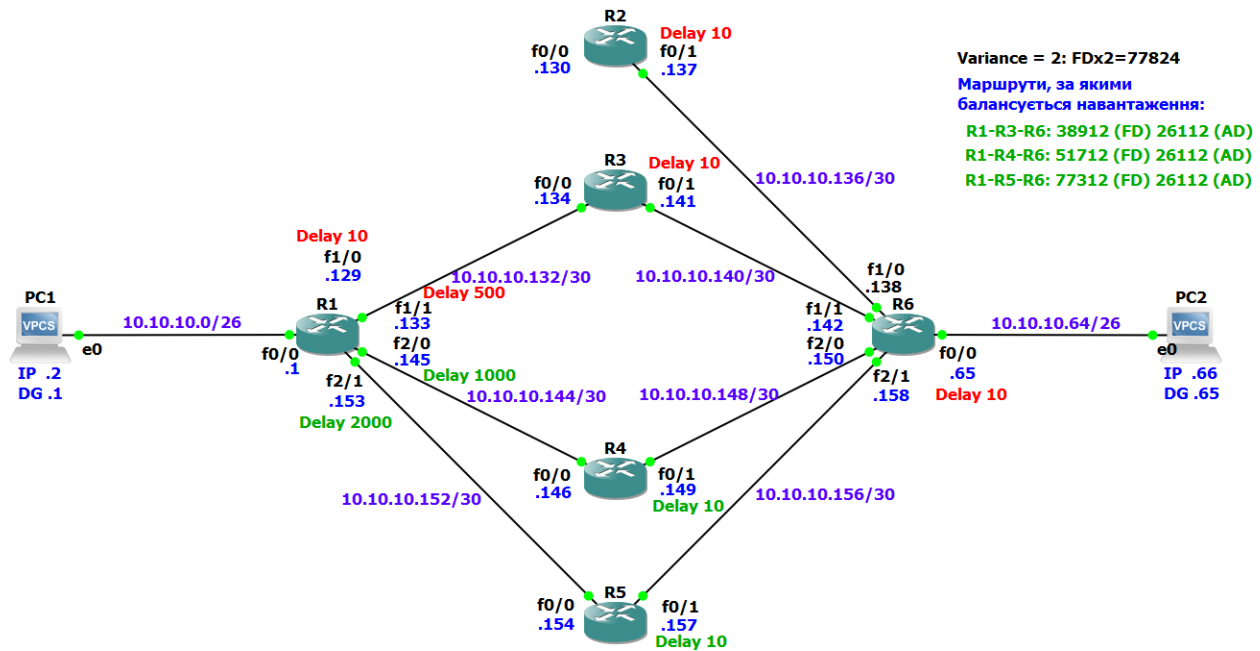


Рис. 19. Топологія досліджуваної мережі для першого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2 несправним стає маршрут R1-R2-R6, який раніше був оптимальним. Тому протокол EIGRP оптимальним надалі вважає попередньо розрахований маршрут R1-R3-R6, який серед інших доступних має найменшу метрику – 38912. До того ж, на відміну від випадку, представленого на рис. 11, маршрут R1-R5-R6 з метрикою 77312 також стає основним, тому що змінився верхній поріг метрик для основних шляхів. Цей поріг тепер складає 77824, бо variance=2, а FD оптимального шляху 38912. Підтвердженням цього висновку є зміст таблиць маршрутизації (рис. 20) та топології (рис. 21) на маршрутизаторі R1.

```
R1#show ip route eigrp
Codes: L - local, C - connected, S - static, R - RIP, M - mobile, B - BGP
       D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
       N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
       E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2
       i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
       ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
       o - ODR, P - periodic downloaded static route, H - NHRP, l - LISP
       a - application route
       + - replicated route, % - next hop override

Gateway of last resort is not set

    10.0.0.0/8 is variably subnetted, 14 subnets, 3 masks
D       10.10.10.64/26 [90/77312] via 10.10.10.154, 00:00:31, FastEthernet2/1
          [90/51712] via 10.10.10.146, 00:00:31, FastEthernet2/0
          [90/38912] via 10.10.10.134, 00:00:31, FastEthernet1/1
D       10.10.10.128/30
          [90/105216] via 10.10.10.154, 00:00:30, FastEthernet2/1
          [90/79616] via 10.10.10.146, 00:00:30, FastEthernet2/0
          [90/66816] via 10.10.10.134, 00:00:30, FastEthernet1/1
D       10.10.10.136/30
          [90/79616] via 10.10.10.154, 00:00:30, FastEthernet2/1
          [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:30, FastEthernet2/0
          [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:30, FastEthernet1/1
D       10.10.10.140/30
          [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:31, FastEthernet2/0
          [90/38656] via 10.10.10.134, 00:00:31, FastEthernet1/1
D       10.10.10.148/30
          [90/79616] via 10.10.10.154, 00:00:31, FastEthernet2/1
          [90/51456] via 10.10.10.146, 00:00:31, FastEthernet2/0
          [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:31, FastEthernet1/1
D       10.10.10.156/30
          [90/77056] via 10.10.10.154, 00:00:31, FastEthernet2/1
          [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:31, FastEthernet2/0
          [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:31, FastEthernet1/1
R1#
```

Рис. 20. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 для першого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

```
R1#show ip eigrp topology
EIGRP-IPv4 Topology Table for AS(12)/ID(10.10.10.153)
Codes: P - Passive, A - Active, U - Update, Q - Query, R - Reply,
       r - reply Status, s - sia Status

P 10.10.10.152/30, 1 successors, FD is 76800
   via Connected, FastEthernet2/1
   via 10.10.10.146 (56576/30976), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.134 (43776/30976), FastEthernet1/1
P 10.10.10.64/26, 3 successors, FD is 38912
   via 10.10.10.134 (38912/26112), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (51712/26112), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.154 (77312/26112), FastEthernet2/1
P 10.10.10.136/30, 3 successors, FD is 41216
   via 10.10.10.134 (41216/28416), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (54016/28416), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.154 (79616/28416), FastEthernet2/1
```

Рис. 21. Таблиця топології на маршрутизаторі R1 для першого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Важливо зазначити, що зміна оптимального маршруту та переліку основних шляхів вплинула на перегляд порядку балансування навантаження в мережі. На рис. 22 наведено таблицю маршрутизації від маршрутизатора R1 до M42 (10.10.10.64/26), де можна спостерігати пропорції балансування навантаження між основними маршрутами (табл. 4).

```
R1#show ip route 10.10.10.64
Routing entry for 10.10.10.64/26
  Known via "eigrp 12", distance 90, metric 38912, type internal
  Redistributing via eigrp 12
  Last update from 10.10.10.154 on FastEthernet2/1, 00:02:29 ago
  Routing Descriptor Blocks:
    10.10.10.154, from 10.10.10.154, 00:02:29 ago, via FastEthernet2/1
    Route metric is 77312, traffic share count is 121
    Total delay is 2020 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
    Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
    Loading 1/255, Hops 2
    * 10.10.10.146, from 10.10.10.146, 00:02:29 ago, via FastEthernet2/0
    Route metric is 51712, traffic share count is 181
    Total delay is 1020 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
    Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
    Loading 1/255, Hops 2
    10.10.10.134, from 10.10.10.134, 00:02:29 ago, via FastEthernet1/1
    Route metric is 38912, traffic share count is 240
    Total delay is 520 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
    Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
    Loading 1/255, Hops 2
R1#
```

Рис. 22. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 до мережі 10.10.10.64/26 для першого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Таблиця 4. Порядок балансування навантаження між основними маршрутами для першого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Основні маршрути	Метрика маршруту	Частка трафіку
R1-R3-R6	38912	240
R1-R4-R6	51712	181
R1-R5-R6	77312	121

На рис. 23 наведено топологію досліджуваної мережі після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2 для другого варіанту вихідних даних (табл. 2), коли параметр variance дорівнював двом.

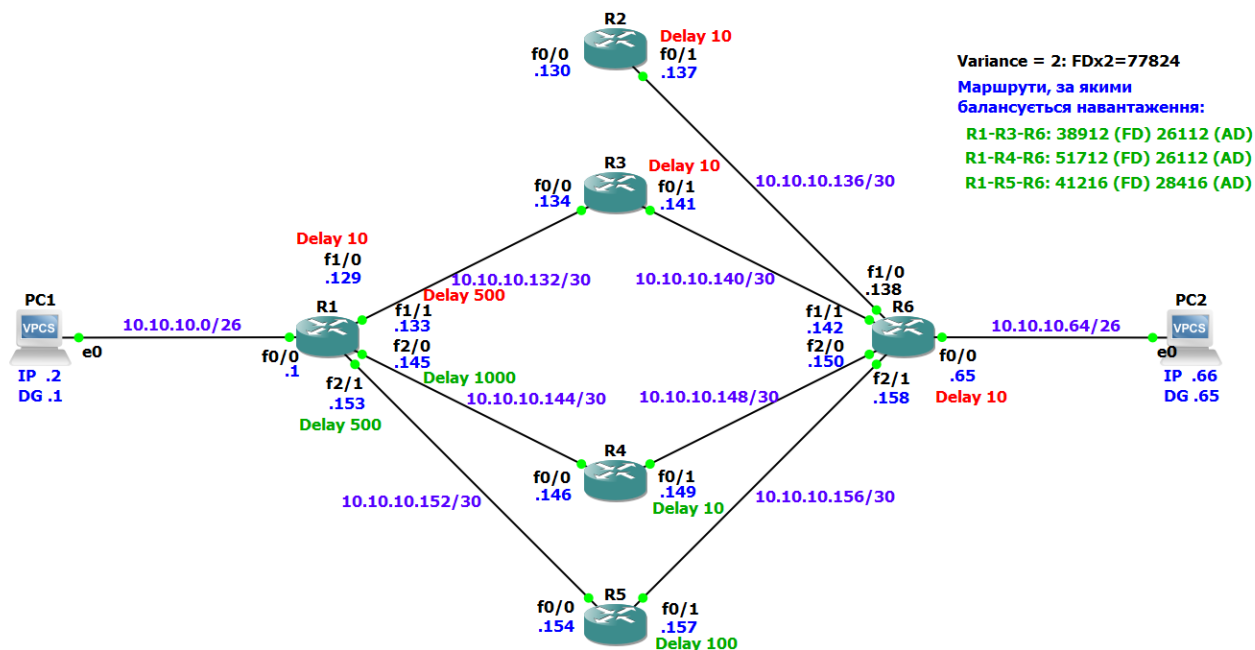


Рис. 23. Топологія досліджуваної мережі для другого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Як і у попередньому випадку, представленому на рис. 19, після відмови маршруту R1-R2-R6 протокол EIGRP від маршрутизатора R1 до МД2 (10.10.10.64/26) оптимальним вважає маршрут R1-R3-R6, який має метрику 38912. Цей маршрут та маршрути R1-R4-R6 та R1-R5-R6 з метриками 51712 та 41216 відповідно виступають як основні (рис. 24) та присутні у таблиці маршрутизації (рис. 25).

```
R1#show ip eigrp topology
EIGRP-IPv4 Topology Table for AS(12)/ID(10.10.10.153)
Codes: P - Passive, A - Active, U - Update, Q - Query, R - Reply,
       r - reply Status, s - sia Status

P 10.10.10.152/30, 1 successors, FD is 38400
   via Connected, FastEthernet2/1
   via 10.10.10.134 (43776/30976), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (56576/30976), FastEthernet2/0
P 10.10.10.64/26, 3 successors, FD is 38912
   via 10.10.10.134 (38912/26112), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (51712/26112), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.154 (41216/28416), FastEthernet2/1
P 10.10.10.136/30, 3 successors, FD is 41216
   via 10.10.10.134 (41216/28416), FastEthernet1/1
   via 10.10.10.146 (54016/28416), FastEthernet2/0
   via 10.10.10.154 (43520/30720), FastEthernet2/1
```

Рис. 24. Таблиця топології на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

```
R1#show ip route eigrp
Codes: L - local, C - connected, S - static, R - RIP, M - mobile, B - BGP
       D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
       N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
       E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2
       i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
       ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
       o - ODR, P - periodic downloaded static route, H - NHRP, l - LISP
       a - application route
       + - replicated route, % - next hop override

Gateway of last resort is not set

    10.0.0.0/8 is variably subnetted, 15 subnets, 3 masks
D       10.10.10.64/26 [90/41216] via 10.10.10.154, 00:00:35, FastEthernet2/1
                               [90/51712] via 10.10.10.146, 00:00:35, FastEthernet2/0
                               [90/38912] via 10.10.10.134, 00:00:35, FastEthernet1/1
D       10.10.10.136/30
                               [90/43520] via 10.10.10.154, 00:00:35, FastEthernet2/1
                               [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:35, FastEthernet2/0
                               [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:35, FastEthernet1/1
D       10.10.10.140/30
                               [90/43520] via 10.10.10.154, 00:00:35, FastEthernet2/1
                               [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:35, FastEthernet2/0
                               [90/38656] via 10.10.10.134, 00:00:35, FastEthernet1/1
D       10.10.10.148/30
                               [90/43520] via 10.10.10.154, 00:00:35, FastEthernet2/1
                               [90/51456] via 10.10.10.146, 00:00:35, FastEthernet2/0
                               [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:35, FastEthernet1/1
D       10.10.10.156/30
                               [90/40960] via 10.10.10.154, 00:00:35, FastEthernet2/1
                               [90/54016] via 10.10.10.146, 00:00:35, FastEthernet2/0
                               [90/41216] via 10.10.10.134, 00:00:35, FastEthernet1/1
R1#
```

Рис. 25. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 для другого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Для перевірки порядку балансування навантаження між основними маршрутами з оновленими метриками на рис. 26 наведено таблицю маршрутизації від R1 до мережі доступу 10.10.10.64/26. Для наочності інформація про порядок балансування навантаження в ІКМ занесена у табл. 5.

Таким чином, порядок балансування між основними маршрутами (табл. 5) порівняно з попереднім експериментом (табл. 4) дещо змінився. Це викликано зміною не множини основних маршрутів, а їхніх метрик. На зменшення метрики маршруту R1-R5-R6 із значення 77312 (табл. 4) до величини 41216 (табл. 5) відразу відреагував протокол EIGRP, перерахувавши лічильник пакетів, підвищивши його для цього шляху з 121 до 227. На практиці це призведе до направлення цим маршрутом більшої кількості пакетів, підвищивши навантаження на нього.

Отже, як показано на рис. 22 та 26, а також у табл. 4 та 5, протокол EIGRP ефективно адаптується до зміни стану мережі, спричинених відмовою її елементів. Це проявлялося як у зміні переліку основних та резервних маршрутів, так і порядку балансування навантаження між основними маршрутами з метою покращення рівня якості обслуговування.

```
R1#show ip route 10.10.10.64
Routing entry for 10.10.10.64/26
  Known via "eigrp 12", distance 90, metric 38912, type internal
  Redistributing via eigrp 12
  Last update from 10.10.10.154 on FastEthernet2/1, 00:00:12 ago
  Routing Descriptor Blocks:
    10.10.10.154, from 10.10.10.154, 00:00:12 ago, via FastEthernet2/1
      Route metric is 41216, traffic share count is 227
      Total delay is 610 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
      Loading 1/255, Hops 2
    * 10.10.10.146, from 10.10.10.146, 00:00:12 ago, via FastEthernet2/0
      Route metric is 51712, traffic share count is 181
      Total delay is 1020 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
      Loading 1/255, Hops 2
    10.10.10.134, from 10.10.10.134, 00:00:12 ago, via FastEthernet1/1
      Route metric is 38912, traffic share count is 240
      Total delay is 520 microseconds, minimum bandwidth is 100000 Kbit
      Reliability 255/255, minimum MTU 1500 bytes
      Loading 1/255, Hops 2
R1#
```

Рис. 26. Таблиця маршрутизації на маршрутизаторі R1 до мережі 10.10.10.64/26 для першого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Таблиця 5. Порядок балансування навантаження між основними маршрутами для другого варіанту вихідних даних (variance=2) після відмови каналу зв'язку між маршрутизаторами R1 та R2

Основні маршрути	Метрика маршруту	Частка трафіку
R1-R3-R6	38912	240
R1-R4-R6	51712	181
R1-R5-R6	41216	227

Висновки

Як показав проведений аналіз, до ключових властивостей сучасних ІКМ відносять мультисервісність та якість обслуговування, надійність та відмовостійкість, безпеку та кіберстійкість, а також масштабованість (рис. 1). Важливу роль у підвищенні ефективності реалізації перерахованих властивостей відіграють протоколи маршрутизації в IP-мережах, функціонал яких останнім часом значно розширився з точки зору підтримки складних маршрутних метрик, реалізації багатошляхової маршрутизації, підтримки резервних маршрутів тощо (табл. 1). Серед протоколів IP-маршрутизації значно виділяється за своїми потенційними можливостями пропрієтарний протокол EIGRP. Тому у роботі було проведено ряд експериментів у середовищі GNS3 для дослідження властивостей протоколу EIGRP з точки зору підтримки стратегій багатошляхової відмовостійкої маршрутизації та аналізу впливу цих рішень на порядок балансування навантаження за основними маршрутами, які мають різну метрику.

Експерименти проведені на мережній топології, яка включала шість маршрутизаторів, що створювали чотири шляхи між двома мережами доступу (рис. 2). Розглядалося декілька варіантів вихідних даних щодо метрик інтерфейсів/маршрутів (табл. 2) і значень коефіцієнту варіації (variance), які впливали на вибір оптимальних шляхів, множини основних та резервних маршрутів при забезпеченні відмовостійкості ІКМ, а також на порядок балансування навантаження між ними, як у нормальних умовах експлуатації, так і за умов відмов мережного обладнання.

Результати експериментального дослідження підтвердили ефективність протоколу EIGRP щодо швидкої конвергенції та оперативної адаптації до зміни стану мережі, спричинених зміною метрик інтерфейсів/маршрутів та/або топології ІКМ через відмову її елементів. Рішення щодо адаптації супроводжувалися переглядом оптимальних шляхів, зміною переліку основних та резервних маршрутів, а також порядку балансування навантаження між основними маршрутами з метою покращення рівня якості обслуговування. Перевірено, що при відмові оптимального маршруту відбувається його швидка заміна іншим маршрутом (основним або резервним), який має мінімальну метрику. Це призводить до збільшення метрики FD оптимального маршруту та оновлення діапазону метрик неоптимальних шляхів, що дозволяє їм потрапити до маршрутної таблиці та/або таблиці топології як основні або резервні шляхи.

Продемонстровано, що протокол EIGRP балансує навантаження на підставі автоматичного перерозрахунку співвідношення між значеннями лічильників для кожного основного шляху з маршрутної таблиці, які обернені до співвідношення метрик оптимального і неоптимальних маршрутів. Це здійснюється з метою вирівнювання завантаженості маршрутів, які мають різну метрику, та повинно призвести до вирівнювання затримок пакетів, що передаються різними шляхами, та мінімізації значення джитеру пакетів, обумовленого реалізацією багатошляхової маршрутизації.

Моніторинг таблиць маршрутизації та топології дозволяє відслідковувати у реальному часі зміни у множині оптимальних та неоптимальних, основних та резервних шляхів, а також їхніх характеристик та статусів. Механізм боротьби з петлями, який підтримується у EIGRP, також забороняє використання шляхів при балансуванні навантаження, які мають високі значення маршрутної метрики. Крім цього, адміністратор мережі може особисто втручатися у процес балансування навантаження в ІКМ, вручну змінюючи значення коефіцієнта варіації (параметра variance) або метрики окремих інтерфейсів та маршрутів. Проте значення цих керуючих параметрів рекомендовано попередньо обґрунтувати та розрахувати, щоб не погіршити ефективність роботи мережі. Для цього доречно використовувати засоби автоматизації налаштувань, заснованих на процедурах мережного програмування. Перспективи розвитку протоколу EIGRP у напрямку забезпечення відмовостійкості полягають у підтримці технології Fast ReRouting із реалізацією схем захисту вузла, каналу, маршруту, пропускної здатності та значень інших показників QoS/QoE [3, 4, 11-14].

Список літератури

1. Crichigno, J., Kfoury, E., Bou-Harb, E., Ghani, N. (2022). High-Speed Networks: A Tutorial, Springer, 477 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-88841-1>
2. Edgeworth, B., Lacoste, R. (2023). CCNP Enterprise Advanced Routing ENARSI 300-410 Official Cert Guide (2nd ed.), Cisco Press, 1104 p.
3. 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>.
4. 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: Монографія. Х.: ХНУРЕ, 198 с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-378-1>.
5. Medhi D., Ramasamy K. (2018), Network Routing (Algorithms, Protocols, and Architectures), 2nd edition, Elsevier Inc., 1018 p.
6. Misra S., Goswami S. (2017), Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies, 1st Edition. Wiley, 536 p.
7. Cisco Networking Academy (Ed.) (2014), Routing Protocols Companion Guide, Pearson Education, 792 p.
8. Savage D., Moore J. Ng S., Slice D., Paluch P., White R. (2016), Cisco's Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP), RFC 7868. 80 p. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC7868>.
9. Cisco Systems (2017), IP Routing: EIGRP Configuration Guide, 326 p.
10. Pepelnjak, I. (2000), EIGRP Network Design Solutions: The Definitive Resource for EIGRP Design, Deployment, and Operation, CiscoPress, 384 p.
11. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. (2018), "Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection", Proceedings of the 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2018, P. 135–138, DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526707>.
12. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A. M., Segeč P., Papán J. (2019), "Design of the Fast ReRoute QoS Protection Scheme for Bandwidth and Probability of Packet Loss in Software-Defined WAN", Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Polyana, Ukraine, 2019, P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CADSM.2019.8779321>.
13. Yeremenko O. S., Lemeshko O. V., Tariki N. (2017), "Fast ReRoute scalable solution with protection schemes of network elements", Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, UKraine, 2017, P. 783–788. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100353>.
14. Lemeshko O., Yeremenko O., Sleiman B., Yevdokymenko M. (2020), "Fast ReRoute Model with Realization of Path and Bandwidth Protection Scheme in SDN", Advances in Electrical and Electronic Engineering, No. 18(1), P. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.15598/aece.v18i1.3548>.