

М.М. Климаш, Б.А. Бугиль, О.А. Лаврів, Т.В. Корецький  
Національний університет “Львівська політехніка”

## ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИБОРУ МАРШРУТІВ ПЕРЕДАВАННЯ ПОТОКІВ ДАНИХ ДЛЯ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ МЕРЕЖЕВИХ ТОПОЛОГІЙ

© Климаш М.М., Бугиль Б.А., Лаврів О.А., Корецький Т.В., 2012

**Проаналізовано конфігурації топологій за критеріями пропускної здатності та затримки. За цими критеріями формується інтегральна оцінка та здійснюється порівняння топологій з шістьма вузлами.**

**Ключові слова:** модель, топологія, теорія графів, алгоритм Беллмана–Форда, маршрутизація, інтегральна оцінка.

**The article analyzed the topologies configuration using the bandwidth and delay criteria. Based on these criteria formed an integral evaluation and the comparison between topologies with six nodes.**

**Key words:** model, topology, graph theory, algorithm Bellman-Ford, routing, integrated assessment.

**Вступ.** Якість функціонування телекомунікаційних мереж значною мірою пов'язана із ефективністю вибору маршрутів для передавання інформації між взаємодіючими вузлами. Їх вибирають за визначеними критеріями, що можуть бути задані оператором мережі та ним же встановлені як статичні маршрути, або протоколами динамічної маршрутизації, що характеризуються різними алгоритмами та метриками під час обрахунку маршруту, відповідно обираючи різні оптимальні шляхи. Недоліки статичних маршрутів є відомими, а також із збільшенням складності топології мережі вибір оператором статичних маршрутів стає громіздким та може бути помилковим або не враховувати всіх поставлених критеріїв. Водночас вибір маршрутів динамічними протоколами обмежений в критеріях, які входять до їх метрики, і впливає на складність реалізації протоколу. Комбіновані методи вибору маршрутів закладено в протоколи динамічної маршрутизації завдяки можливості гнучкої зміни метрики з коригуванням ціни каналу.

Найпростішими методами аналізу телекомунікаційних мереж щодо ефективності вибору маршрутів є теорія графів. Мережа представляється набором вузлів, якими є обслуговуючі пристрої, та ребер між ними, утворюючи граф. Перевагою використання графів є максимальне охоплення властивостей ребер, що дає змогу аналізувати пропускну здатність та затримку каналів передавання інформації. Не менш важливим є поєднання послідовності ребер для утворення маршруту за встановленими критеріями. Водночас враховувати параметри та характеристики вузлів, а також зміну властивостей потоків при обробці можна лише за їх впливом на параметри ребер.

**Модель та план експерименту для дослідження конфігурацій топологій мережі.** Вибір оптимального шляху – це багатокритеріальна задача, яку розв'язують зі спрощеннями та обмеженнями, викликаними тривалістю прийняття рішення. У кожен момент роботи мережі її

вузли та канали характеризуються деяким рівнем завантаження. Зростання цього рівня негативно впливає на параметри якості сервісу для інформаційних пакетів, що в той самий момент часу тільки розпочинають транспортуватись мережею по наперед обраному шляху, при формуванні якого не врахували поточної завантаженості. Звісно, логічно припустити, що в кожен момент часу оптимальний маршрут буде іншим, тому потрібно постійно його визначати повторно. Зрештою, всі ресурси вузлів будуть зосереджені на перманентному аналізі завантаженості та повторному визначенні шляхів і нічого не залишиться для основного завдання – обробки і транспортування інформації. Звідси випливає простий висновок: потрібно наперед передбачити завантаженість мережі та, за певних обмежень, яких неможливо уникнути, вибрати оптимальні шляхи.

Завантаженість мультисервісної мережі є випадковим явищем та аналізується у [1] шляхом дослідження властивостей мультисервісних потоків та визначення адекватних імовірнісних моделей їх опису. Планування структурно-функціональних параметрів мережевих пристроїв для обробки реального мультисервісного трафіку розглядається у [2]. Такі дослідження дають змогу сформулювати стратегію потокової маршрутизації, за якої основним критерієм оптимальності вибору шляху є забезпечення мінімально необхідних параметрів якості сервісу для транспортіваних потоків. Оскільки в роботі використовується теорія графів, основний акцент дослідження спрямований на з'єднувальні ланки, котрі дають змогу врахувати лише два параметри якості сервісу: пропускну здатність та затримку поширення.

Вищезгадані роботи щодо аналізу трафіку є ресурсовитратними, а також вимагають довготривалого спостереження за змінами стану мережі для визначення її усталеного режиму роботи. Об'єднання характеристик потоків із вибором шляхів у області теорії графів є наступним кроком досліджень, тому в роботі пропонується їх спрощене врахування. Також припускаються такі обмеження:

- пропускну здатність шляху визначається найменшою пропускну здатністю ланки маршруту. Це відповідає правилу теорії графів про пропускну здатність шляху та вводиться для того, щоб завантаження вузлів мережі було однаковим;
- пропускну здатність ланки (ребра) графу рівномірно ділять між всіма шляхами, що проходять через неї.

Перше обмеження апріорі створює недовантаження мережі, а друге вводить рівномірний розподіл ресурсів мережі для кожного з потоків, тим самим припускаючи, що кожен із вузлів створює однакове навантаження. Така ситуація нагадує традиційну схему виділених каналів, коли потоку надається ресурс строго визначеного об'єму, тому великі потоки починають відчувати зменшення якості сервісу, а малі недовантажують ланку. Саме в цьому твердженні поєднуються вплив властивостей потоків та лінійна орієнтація теорії графів. Однак, в роботі основну увагу зосереджено на аналізі топологічних структур щодо ефективності вибору маршрутів шляхом їх порівняння за критеріями затримки та пропускну здатності.

Варто зазначити, що вибір топології мережі більшою мірою враховує фінансові затрати при реалізації такої структури, а також усталені фактори переваг та недоліків обраної топології. Після встановлення мережі протоколи динамічної маршрутизації або адміністратор визначають оптимальні шляхи за правилом “найкращі з можливих”. Тому доцільно проаналізувати всі можливі структури мережі для вибору оптимальних шляхів протоколами динамічної маршрутизації.

Для аналізу топологічних структур частково використовуватимемо метод аналізу ієрархій. Результатом використання цього методу є об'єктивна оцінка поставленої мети за визначеними критеріями. Отже, для кожної досліджуваної топології буде сформовано оцінку, що характеризує ступінь придатності топології для функціонування динамічних протоколів маршрутизації.

Досліджують топології за допомогою моделі, входними параметрами якої є кількість вузлів графа ( $N$ ) та пропускну здатність ребер. Матрицю пропускну здатностей для конкретної досліджуваної мережі буде сформовано відповідно до пропускну здатностей ланок, однак, для загального випадку вони всі будуть однаковими, для порівняння топологій між собою. На початку дослідження необхідно сформувати матриці суміжності та пропускну здатностей графів із зада-

ною кількістю вузлів. Мінімальна кількість ребер графу ( $r_{\min}$ ) є на одиницю меншою від кількості вузлів, а максимальна ( $r_{\max}$ ), відповідає повнозв'язній топології та визначається із залежності (1).

$$r_{\max} = \sum_{i=1}^{r_{\min}} (N - i), \quad (1)$$

У сформованих топологіях мереж потрібно визначити шляхи для кожного із вузлів. Алгоритми Дейкстри та Беллмана–Форда найбільше підходять для цієї задачі, причому для реальних мереж пропонується використовувати алгоритм Дейкстри, а алгоритм Беллмана–Форда буде застосований лише для загального випадку. Це здійснено тому, що за однакових вагових коефіцієнтів ребер ці алгоритми дають однаковий результат за різну тривалість роботи, яка для алгоритму Дейкстри є дещо більшою. Тому для дослідження загального випадку графу мережі та пошуку шляхів використовується алгоритм Беллмана–Форда.

Після визначення найкоротших шляхів для кожного із вузлів формується матриця, в якій записано для кожного ребра кількість маршрутів, що через нього проходять. Аналізуючи цю матрицю, можна наперед сказати, чи можливо підвищити ефективність вибраних маршрутів, чи ні. У випадку, коли кількість шляхів, що проходить по окремії ланці, є однаковою для всіх ланок графу мережі, то шляхи вибрано оптимально, і єдиним корективом їх оптимальності є застосування характеристик потоків. Це відповідає однорідності значень, занесених до матриці. В таких мережевих топологіях протоколи динамічної маршрутизації ефективно функціонують, вибираючи найвдаліші шляхи. Матриці, в яких хоча б одне значення відрізняється від інших, розцінюються як потенційно неоптимальна система вибраних шляхів. При виконанні описаних вище обмежень отримана неоднорідна структура матриці призведе до зменшення пропускної здатності шляхів, що проходять через найбільш завантажену ланку, і в результаті це відобразиться у недовантаженості решти ланок шляху. У такому випадку вибрані маршрути можна скорегувати шляхом зміни топології мережі, що не завжди раціонально, або зміною метрики шляхом перевизначення вагових коефіцієнтів ребер та застосуванням алгоритму Дейкстри для вибору нових шляхів.

Використовуючи побудовану матрицю, визначають пропускну здатність ланок кожного шляху як рівнопропорційну частку від загальної. Неоднорідність матриці маршрутів призведе до неоднакової пропускної здатності кожної ланки шляху, а її мінімальне значення визначатиме загальну пропускну здатність маршруту. Це призведе до зниження пропускної здатності інших ланок шляху, створюючи недовантаження мережі загалом. Кінцева матриця пропускних здатностей топології, що розглядається, формується як сума пропускних здатностей шляхів, які проходять кожною з ланок графу, що відповідає мінімально необхідній пропускній здатності ланки мережі. Досягнення номінального значення пропускної здатності, яку було задано в умові, відповідає найефективнішому вибору маршрутів, що проходять через ребро графу.

Матриця затримок показує тривалість передавання інформації між двома вузлами за обраним у попередньому пункті маршрутом. Вона визначається як сума обернених значень пропускної здатності шляху за кожною ланкою. Ця затримка не враховує вплив вузла через накладені вище обмеження, хоча в реальних мережах його частина є вирішальною у затримці поширення. Досліджувані значення наводять для значення в 1-ну умовну одиницю швидкості, для того щоб не було прив'язки до конкретної пропускної здатності ланки, так само як і для матриці пропускних здатностей.

Зазначеними маніпуляціями отримують матриці пропускних здатностей та затримок, які будуть критеріями для отримання оцінки досліджуваної топології. За методом аналізу ієрархій потрібно сформулювати додаткову матрицю (A), що визначає порівняльну важливість критеріїв між собою. Ця матриця є частковим недоліком, а можливо – і перевагою цього методу, оскільки визначає ступінь впливу кожного критерію на остаточну оцінку. Будемо вважати, що усі критерії є рівноважливими, і ця матриця жодного впливу на результат не матиме. Для зведення всіх матриць-критеріїв до єдиної оцінки необхідно для кожного рядка матриці знайти вектор локального пріоритету ( $B_i$ ), використовуючи середнє геометричне із подальшим нормуванням цього значення відносно решти пріоритетів рядків матриці. Оцінка топології визначатиметься таким співвідношенням:

$$P = A_1 \cdot B_{(1,1)} + A_2 \cdot B_{(1,2)} + \mathbf{K} + A_n \cdot B_{(m,n)}, \quad (2)$$

де  $P$  – оцінка досліджуваної топології,  $m$  – індекс матриці одного із критеріїв,  $n$  – індекс локального пріоритету відповідної матриці-критерію.

**Визначення інтегральної оцінки для топологічних структур із 6-ма вузлами за критерієм оптимальності вибраних шляхів.** Для дослідження було обрано топології із 6-ма вузлами. Для заданої кількості вершин існує 30827 конфігурацій топологій, що є максимальною кількістю варіантів графів, однак не кожен граф може описувати телекомунікаційну мережу. Оцінка визначатиметься лише для зв'язних конфігурацій, що визначаються за умови існування шляхів між всіма вузлами графу.

Цільова функція (3) визначає оптимальність конфігурації графу за визначеною інтегральною оцінкою за методом аналізу ієрархій. Оскільки пропускна здатність конвертувалась у затримку, а другим критерієм оцінювання була власне затримка, то мінімальна оцінка відповідає найкращому маршрутові із проаналізованих.

$$\min(P). \quad (3)$$

За результатами моделювання було отримано інтегральну оцінку для кожної з досліджуваних топологій. На рис. 1 наведено гістограму розподілу отриманих оцінок.

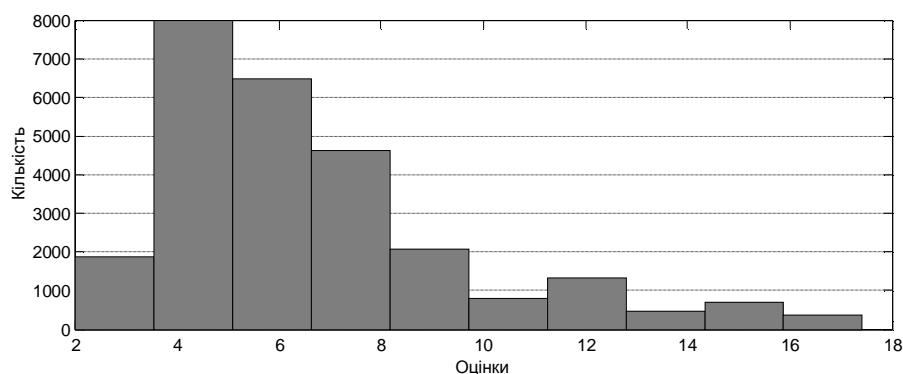


Рис. 1. Гістограма отриманих оцінок

Для наочності представлення отриманих результатів всі конфігурації топологій були згруповані за кількістю ребер у досліджуваному графі в 11 груп. У кожній групі міститься різна кількість топологій, як показано в табл. 1, і водночас вони характеризуються різним рівнем отриманих оцінок.

Таблиця 2

**Розбиття досліджуваних топологій на групи**

№ групи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кількість ребер	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Максимальна кількість конфігурацій	3003	5005	6435	6435	5005	3003	1365	455	105	15	1
Кількість зв'язних конфігурацій	1296	3660	5700	6165	4945	2997	1365	455	105	15	1

Остання, одинадцята група містить одну топологію із 15-ма ребрами, що відповідає повнозв'язному графу (рис. 2а). Як і очікувалось, для цієї конфігурації було отримано найнижчу оцінку, яка становить 2. У міру зменшення кількості ребер у досліджуваних графах інтегральна оцінка зростала та стала найвищою для топології з 5-ма ребрами (рис. 2б), коли вузли з'єднані послідовно, і становить 17.409. Під час аналізу першої групи, куди входять топології з 5-ма ребрами, найнижчу оцінку отримала топологія “зірка”, оцінка якої дорівнює 8.94.

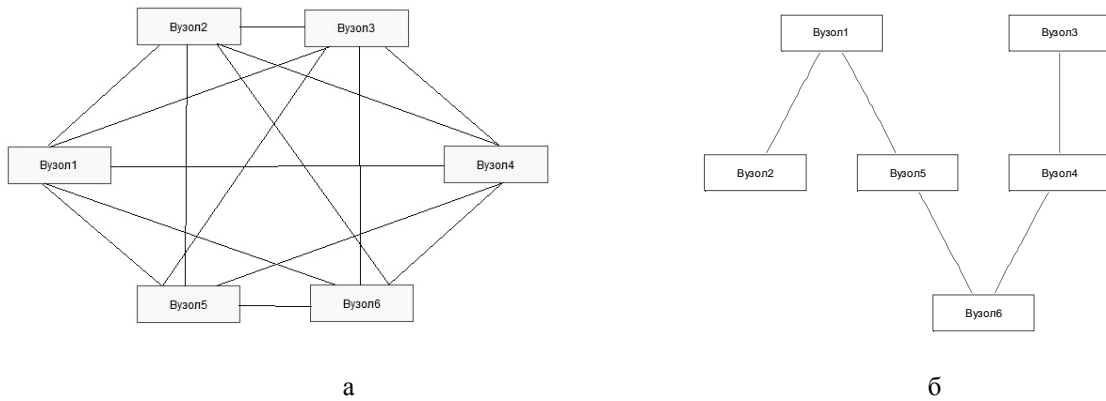


Рис. 2. Конфігурація графу з найнижчою (а) та найвищою (б) інтегральними оцінками

Розроблена модель генерує всі можливі конфігурації топологій, однак за умови коли всі вузли є еквівалентними, перестановка вузлів між собою топології не змінює, а отже, для кожного варіанта топології існує  $A_N^1 = \frac{N!}{(N-1)!} = \frac{6!}{5!} = 6$  згенерованих конфігурацій. Відповідно для таких варіантів оцінки будуть однаковими. Однак, під час дослідження було помічено, що за цими критеріями різні конфігурації топологій можуть мати однакові оцінки. Через складність аналізу графів у матричній формі та неможливість візуального перебору всіх досліджуваних варіантів у цій статті не наводяться приклади різних топологій з однаковою інтегральною оцінкою. В табл. 2 наведено максимальні та мінімальні оцінки для кожної з груп топологій та кількість різних оцінок у групі.

Таблиця 2

#### Порівняння оцінок

№ групи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кількість різних оцінок	20	338	1103	1146	483	76	11	4	2	1	1
Максимальна оцінка	17.41	13.21	10.08	7.58	5.61	4.36	3.61	2.98	2.53	2.2	2
Мінімальна оцінка	8.94	7.66	6.21	4.82	4.13	3.6	3.14	2.78	2.44	2.2	2

Як видно з табл. 2, оцінки в групах, починаючи з 7-ї і вище, не перекриваються, на відміну від решти груп, оскільки в цих конфігураціях є достатня кількість з'єднувальних ланок, і відповідно вибрані шляхи мають малу кількість спільних ланок. Решта груп мають невеликий перехідний діапазон оцінок, що робить топології з різною кількістю ребер еквівалентними, однак даний ефект присутній через упущення впливу функціональних параметрів вузлів.

**Висновок.** Проаналізовано конфігурації мережевих топологій із шістьма вузлами на основі теорії графів із виведенням інтегральної оцінки за методом аналізу ієрархій. Для дослідження було розроблено модель, що дає змогу при заданій кількості вузлів згенерувати всі можливі конфігурації топологій та їх проаналізувати за критеріями пропускної здатності та затримки. За отриманими інтегральними оцінками можна визначити ефективність вибору шляхів у досліджуваному варіанті топології та порівняти з еквівалентними за кількістю вузлів та ребер конфігураціями. Запропоновано при виборі конфігурації топології телекомунікаційної мережі враховувати інтегральну оцінку, що дасть змогу при експлуатації мережі підвищити ефективність функціонування протоколів динамічної маршрутизації.

1. Mykhailo Klymash, Orest Lavriv, Bohdan Bugil. Multiservice traffic with self-similarity distribution system's parameters modeling and research. Proceedings of international conference CADSM'2011. 2. Климаш М.М., Лаврів О.А., Бугіль Б.А., Бак Р.І. Модель забезпечення параметрів якості обслуговування системи розподілу мультисервісного трафіку // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2011. – № 705. – С. 138–144.