

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРУКТУР
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ДИНАМІЧНОЮ МАРШРУТИЗАЦІЄЮ
ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ ЗА КРИТЕРІЄМ «ЕФЕКТИВНІСТЬ-ВАРТІСТЬ»**

Проведено дослідження ефективності топологій телекомунікаційних мереж з динамічною маршрутизацією, огляд основних параметрів протоколів динамічної маршрутизації та стану їх показників ефективності. Також досліджено залежність ефективності структур телекомунікаційних мереж та вартості їх проектування. Надано науково-практичні рекомендації та вказано обмеження щодо застосування методу синтезу фізичної структури під час побудови та модернізації телекомунікаційних мереж. Надано перелік рекомендацій щодо передумов застосування методу модифікації логічної структури у телекомунікаційних мережах. Дотримання даних рекомендацій щодо застосування методів дозволить мінімізувати додаткове навантаження на мережу та підвищити ефективність використання мережевих ресурсів.

Ключові слова: маршрутизація, протоколи динамічної маршрутизації, ефективність топологій телекомунікаційних мереж, пропускна спроможність, критерій «ефективність – вартість».

V.I. LUZHANSKY, L.V. KARPOVA, B.S. PODGORNYKH
Khmelnytsky National University

**SIMULATION AND RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF THE STRUCTURES OF
TELECOMMUNICATION NETWORKS WITH DYNAMIC ROUTING AND IT COMPARISON BY THE
CRITERION OF EFFICIENCY-COST"**

Investigation of the effectiveness of the topology of telecommunication networks with dynamic routing, overview of the basic parameters of dynamic routing protocols and the State of their performance indicators. Also, the dependence of the efficiency of the structures of telecommunication networks and the cost of their design. Courtesy of the scientific-practical recommendations and specify limits on the application of the method of synthesis of physical structures in the construction and modernization of telecommunication networks. Lists recommendations for conditions of application of the method of modification of logical structure in telecommunication networks. Compliance with these recommendations on the application of methods allows to minimize the additional load on the network and increase the efficiency of the use of network resources.

Keywords: routing, dynamic routing protocols, the efficiency of telecommunications networks topology, bandwidth, the criterion of "efficiency-cost".

Вступ. Швидка еволюція сучасних телекомунікаційних технологій майже щоденно створює нові послуги, які сприяють удосконаленню методів проектування та експлуатації засобів та мереж зв'язку. За останні декілька років значного поширення набули мобільні пристрої, такі як смартфони, нетбуки, та планшети.

На сучасному етапі життя відбувається бурхливий ріст корпоративних обчислювальних мереж. Найважливішою умовою підвищення конкурентоспроможності підприємств у ринкових умовах є впровадження нових, найбільш сучасних інформаційних та мережевих технологій, різноманітних методів прискорення маршрутизації, підтримки необхідної якості обслуговування, передачі голосового та відео трафіку, підвищення рівня безпеки мережі, та інше. Особливу важливість має ефективна маршрутизація повідомлень в умовах відмови окремих елементів мережі, сплесків трафіку і локальних перевантажень. Для більш ефективного перетворення мережевих ресурсів у параметри якості надання послуг зв'язку, потрібен не тільки значний їх об'єм, а також коректна фізична структура оптимального розподілу ресурсів мережі.

Станом на сьогоднішній день вибір найбільш оптимальної фізичної та удосконалення логічної структур з урахуванням вимог до вибору маршрутів для ефективного використання мережевих ресурсів є актуальною науковою задачею.

Постановка наукової задачі. Для розв'язання маршрутних задач у рамках існуючих протоколів запропоновано ряд комбінаторних алгоритмів, заснованих на використанні теорії графів для опису мережі зв'язку. Математична модель телекомунікаційних систем (ТКС) у цьому разі представляється зваженим орієнтованим графом, множину вершин якого складають мережні вузли, множина дуг моделює тракти передачі між вузлами мережі, потужність якої дорівнює n .

Основною перевагою комбінаторних алгоритмів розв'язання завдання пошуку найкоротшого шляху є невисока та заздалегідь відома обчислювальна складність їхньої реалізації. Найефективнішими та найпоширенішими з них є алгоритми Дійкстри (Dijkstra), Беллмана-Форда (Bellman-Ford), Флойда-Уоршелла (Floyd-Warshall) та велика кількість їх модифікацій. При цьому перші два алгоритми знаходять найкоротші шляхи від обраного вузла-відправника пакетів до інших вузлів, а третій алгоритм знаходить найкоротші шляхи від усіх вузлів до всіх інших вузлів.

Інтернет поділяється на автономні системи. Автономна система (Autonomous System – AS) – група мереж та маршрутизаторів під керуванням одного адміністратора. Маршрутизація всередині автономної

системи віднесена до *внутрішньої маршрутизації*.

Маршрутизація між автономними системами віднесена до *зовнішньої маршрутизації*. Кожна автономна система може вибрати протокол внутрішньої маршрутизації для того, щоб обробляти маршрутизацію всередині автономної системи. Однак для обробки маршрутизації між автономними системами вибирається тільки один протокол маршрутизації.

Вибір протоколу маршрутизації значною мірою залежить від наступних факторів: топологія та складність мережі; розміри мережі та необхідність у подальшому її масштабуванні; завантаженість мережі; вимоги до надійності мережі; вимоги до захисту інформації в мережі; необхідність підключення маршрутизованого сегменту до існуючої мережі; можливість організації програмних маршрутизаторів; кваліфікація та суб'єктивні уподобання обслуговуючого персоналу.

Наведено короткий опис основних протоколів динамічної маршрутизації, проаналізовано основні характеристики протоколів відповідно до їх специфікації, створено зведену порівняльну таблицю характеристик основних протоколів динамічної маршрутизації, також посилаючись на дослідження [3] створено статистичні діаграми основних характеристик роботи протоколів динамічної маршрутизації класу IGP, а саме порівняння протоколів RIP, IGRP, EIGRP, OSPF.

Протокол RIP (Routing Information Protocol – протокол маршрутної інформації). Протокол ґрунтується на дистанційно-векторному алгоритмі вибору маршрутів та у більшості реалізацій використовує найпростішу метрику — кількість проміжних маршрутизаторів до мережі призначення. Головною перевагою протоколу є легкість конфігурації, що не вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. Протокол є відкритим та підтримується практично усіма виробниками мережевого обладнання.

Протокол IGRP. Закритий дистанційно-векторний протокол IGRP (Interior Gateway Protocol – внутрішній протокол маршрутизації) компанії Cisco Systems був спроектований для усунення ряду недоліків протоколу RIP, і мав ціль забезпечити кращу підтримку великих мереж (до 255 маршрутизаторів), що містять канали зв'язку з різними характеристиками смуги пропускання та величини затримки. Протокол використовує комбіновану метрику, яка включає затримку, смугу пропускання, надійність та завантаженість маршруту [3].

На рис. 1 зображено порівняльну характеристику основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням часу виявлення змін у топології.

На рис. 2 зображено порівняльну характеристику основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням максимальної кількості маршрутизаторів у мережі.

На рис. 3 зображено порівняльну характеристику основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням часу поширення маршрутної інформації.

На рис. 4 зображено порівняльну характеристику основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням часу збіжності протоколів.

Протокол EIGRP. Протокол EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol – покращений протокол вибору внутрішніх маршрутів) компанії "Cisco Systems" являє собою удосконалену версію початкового протоколу IGRP. Протокол є гібридним, заснований на алгоритмі оновлення Diffusing-Update Algorithm (DUAL). Він суміщає у собі найкращі сторони дистанційно-векторних протоколів (простота алгоритму вибору оптимального маршруту) і протоколів стану каналів зв'язку (швидка збіжність та економія смуги пропускання мережі за рахунок повідомлень тільки про стан зв'язків і про їх зміну) [3].

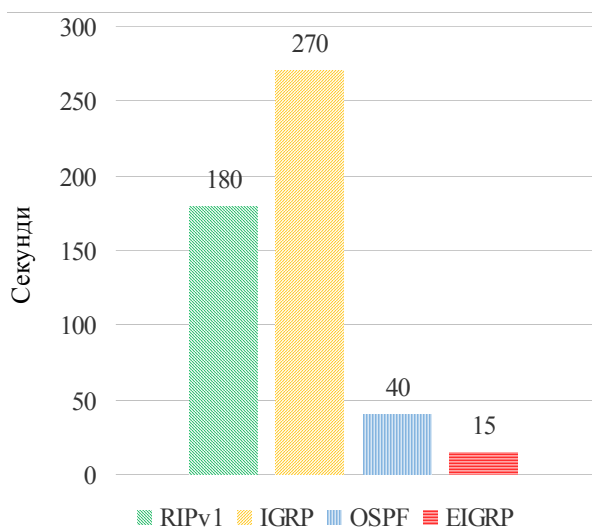


Рис. 1. Порівняльна характеристика основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням часу виявлення змін у топології

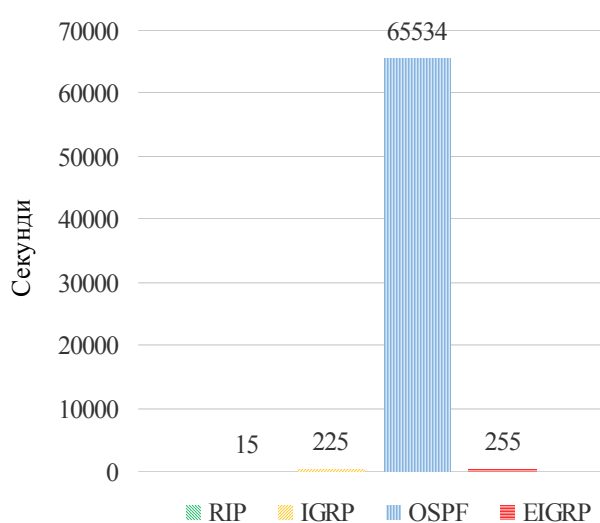


Рис. 2. Порівняльна характеристика основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням максимальної кількості маршрутизаторів у мережі

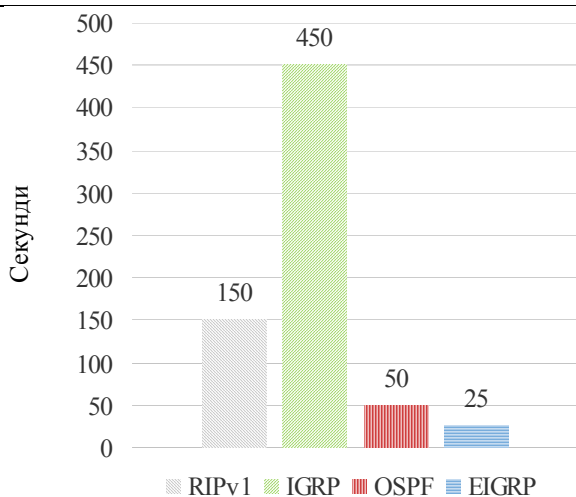


Рис. 3. Порівняльна характеристика основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням часу поширення маршрутної інформації

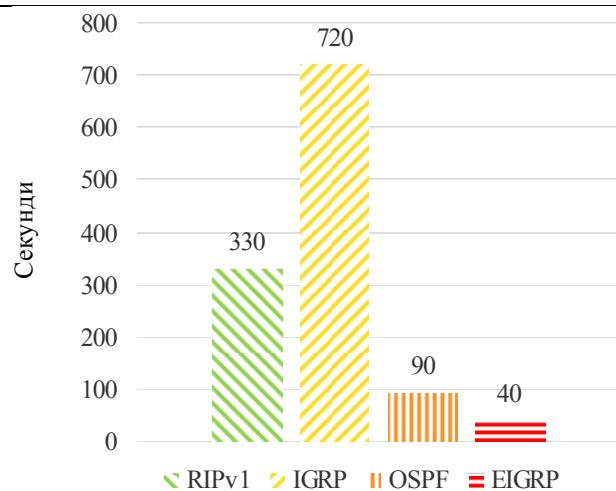


Рис. 4. Порівняльна характеристика основних протоколів динамічної маршрутизації за значенням часу збіжності протоколу

Протокол OSPF. Найбільш універсальним та гнучким у налаштуванні протоколом динамічної маршрутизації у корпоративних мережах на сьогоднішній день є відкритий протокол вибору першого найкоротшого шляху (Open Shortest Path First Protocol – Відкритий. Найкоротший шлях перший). Він заснований на алгоритмі стану каналів зв'язку і володіє високою стійкістю до змін топології мережі зі швидкою збіжністю. При виборі маршруту використовується метрика пропускну здатності складової мережі (тобто передача даних по найбільш швидкісних каналах зв'язку). Протокол може підтримувати різні вимоги IP-пакетів на якість обслуговування (пропускна спроможність, затримка та надійність) за допомогою побудови окремої таблиці маршрутизації для кожного із цих показників.

Нехай мережа представляється графом $G=(V, E)$, де $|V|$ – кількість вершин у графі, $|E|$ – кількість ребер у графі, тоді зі збільшенням значення $|V| \approx |E|$ кількість маршрутів, що використовують спільні ребра буде збільшуватись та, водночас, зросте імовірність одночасного існування потоків у даних ребрах.

Це еквівалентно перевантаженню сегмента мережі, або погіршенню рівня якості сервісу кожного з потоків. Структури, де $|E| \approx |V|$ мають низьку зв'язність, тому ребра максимально задіяні у маршрутах. Через низьку кількість ребер не завжди можуть існувати альтернативні маршрути, тож особливості фізичної топології мережі сильно впливають на вибір маршрутів. Кількість маршрутів, що припадає на кожне ребро приблизно однакова, що робить будь-яку частину мережі потенційно вразливою до перевантаження.

Протилежна ситуація, коли $|E| \gg |V|$, сприяє появі суттєвого розкиду значень кількості маршрутів на ребро. У таких мережах явно виражена потенційно вразлива ділянка, проте у деяких випадках вона вказує на магістраль мережі, тому за обраним маршрутом є можливість забезпечити необхідний об'єм ресурсів для потоку. Характерною ознакою таких структур є дві протилежні ситуації: одні потоки отримують надлишкову кількість ресурсів мережі, яку ніколи не застосовують, також вона недоступна іншим потокам через вибрані маршрути; інші значною мірою залежать від існування та рівня сервісу суміжних потоків, та ведуть боротьбу за виділений ресурс.

Для мереж, де $|E| \approx |V|$ вибір типу фізичної топології є головним фактором при розподілі ресурсів для обраних маршрутів, оскільки, маршрути утворюють логічну структуру з обмеженого набору шляхів, що за таких умов робить її максимально подібною до фізичної. У мережах із $|E| \gg |V|$ фізична структура забезпечує множину альтернативних шляхів, з яких протоколи динамічної маршрутизації утворюють логічну структуру, яка не завжди може забезпечувати максимально ефективне використання ресурсів мережі. Для першого типу мереж необхідно правильно підібрати фізичну структуру, для другого – змінити логічну структуру шляхом вибору альтернативних маршрутів, що дозволять внести зміни у розподіл ресурсів.

Для проведення досліджень над структурою графу потрібно його створити у вигляді матриці суміжності S розміром $|V| \times |V|$ де заповнені або ненульові елементи відповідають ребрам графа. Елементами матриці суміжності S можуть виступати вагові коефіцієнти ребер, або для варіанту телекомунікаційної мережі матриця суміжності S відповідає матриці пропускну спроможностей ребер C . Елементи матриці S , прийматимуть значення "1" при наявності ребра між вершинами i та j , $i \neq j$ та "0" при відсутності. Для створення структури спрямованість ребер є не важливою, тому достатньо заповнити елементи над або під діагоналлю матриці S ; в подальшому буде заповнюватись верхня діагональ. Кожен ненульовий елемент матриці S визначає ребро $e_{i,j}$, що входить до множини E . Кількість ребер в графі

повинна задовольняти умову зв'язності, за основним визначенням якої між будь-якою парою вузлів повинен існувати шлях. Для цього граф повинен характеризуватись мінімальною кількістю ребер, яка рівна:

$$|E_{\min}| = |V| - 1. \tag{1}$$

Загальна кількість комірок, яку потрібно заповнити в матриці S становить:

$$|E_{\max}| = \frac{|V|^2 - |V|}{2}. \quad (2)$$

Отже, для побудови графу $G=(V, E)$ з накладеною умовою зв'язності кількість ребер повинна бути від $|E_{\min}|$ до $|E_{\max}|$, що дозволить представити його як телекомунікаційну мережу.

При заданих $|V|$ та $|E|$ кількість утворених варіацій фізичних структур визначається відповідно до закону комбінацій як:

$$C_{|E_{\max}|}^{|E|} = \frac{|E_{\max}|!}{|E|!(|E_{\max}| - |E|)!} \quad (3)$$

Підґрунтям для методу синтезу фізичної структури є метод аналізу ієрархій (МАІ), за допомогою якого отримано показник ефективності. МАІ служить інструментом прийняття складних рішень відповідно до встановлених критеріїв та пріоритетів. Основним недоліком методу є те, що вхідні дані встановлює експерт та визначає оцінки при відповіді на запитання "Який з об'єктів є важливішим?" шляхом попарного порівняння кожного досліджуваного об'єкту. Кожна оцінка виражає міру переважання одного об'єкту над іншим відповідно до поставлених критеріїв.

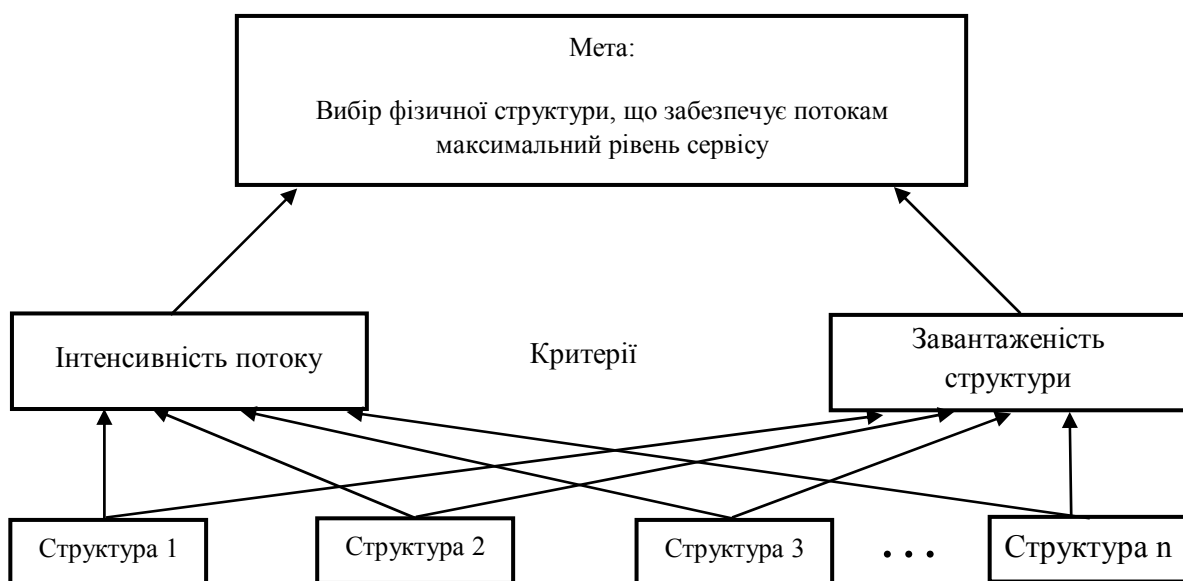


Рис. 5. Ієрархічна модель синтезу фізичної структури

Застосування методу аналізу ієрархій передбачає розбиття проблеми на ієрархічні рівні (рис. 6). Найвищий рівень, що є першим рівнем ієрархії, являє собою мету, яку потрібно досягнути при прийнятті рішення. У даному випадку метою є пошук найбільш ефективної структури, яка дасть змогу протоколам динамічної маршрутизації визначити найкоротші маршрути з найвищим рівнем параметрів якості сервісу для потоків. Поставлена мета відображає завдання знаходження мінімуму або максимуму відповідно до даних, які надходять з нижчого рівня ієрархії.

На другому рівні знаходяться критерії з допомогою яких досягається поставлена мета. Кількість критеріїв може бути довільною. У роботі обумовлено два критерії: інтенсивність потоку I та завантаженість мережі L . Особливістю МАІ є те, що кожному критерію відповідає пріоритет або вага s , що впливає на кінцеве рішення. Така особливість є досить важливою для телекомунікаційних мереж, які хоча і будуються як мультисервісні, проте, завжди є частина переважаючого трафіку в загальному потоці. Також, основний поділ трафіку на чутливий та не чутливий до затримки вносить свої особливості у важливість характеристик якості сервісу, які будуть виступати критеріями при оцінці структур. Критеріями оцінки вибрано параметри якості сервісу тому, що мережа створюється для обслуговування потоків, які повинні транспортуватись через неї з мінімально необхідним рівнем сервісу, для задовільного сприйняття користувачем. Тобто, дотримання рівня якості сервісу для потоків буде визначати ефективність функціонування мережі.

На третьому рівні ієрархії постають альтернативи – це можливі рішення досліджуваної проблеми. У даному випадку альтернативами постають структури, серед яких обирають найкращу. Як вже зазначалось поняття найкращої структури згідно суб'єктивних уподобань є неправильним, тому буде введено додатковий рівень ієрархії. Таке введення не суперечить МАІ та розглядається як деталізація об'єкту досліджень. Додатковим рівнем будуть виступати потоки, що на даному рівні розуміється як абстрактний об'єкт, який при взаємодії з верхнім рівнем, тобто структурою, набуває своїх характеристик, які є критеріями другого рівня та порівнюються на найвищому рівні.

На кожному рівні ієрархії МАІ здійснюється опрацювання даних нижчого рівня, а результат

передається на вищий. На найвищому рівні ієрархії, згідно поставленої мети, приймається остаточне рішення при порівнянні показників ефективності кожної досліджуваної структури. Розрахунок показника P_k є простим за своєю сутністю та представлений залежністю (4) і є сумарним значенням зважених критеріїв.

$$P_k = \max \left[\sqrt[|V|]{\prod_{i=1, j=2}^{|V|} I_{i,j}^{\omega_1}} + \sqrt[|V|]{\prod_{i=1, j=2}^{|V|} L_{i,j}^{\omega_2}} \right], i \neq j \quad (4)$$

де P_k – показник ефективності структури;
 I, L – матриці-критерії інтенсивності потоків та завантаженості;
 ω_1, ω_2 – вага або пріоритет критерію;
 i – кількість вузлів графу,
 j – кількість ребер у графі.

P_k може змінюватись в межах, які залежатимуть від значень, що приймають критерії, тобто шкали оцінювання. При формуванні значення критерію буде здійснено його нормування до діапазону від "0" до "1", та в подальшому відповідно до ваги або пріоритету с критерію буде задаватись його частка у кінцевому показнику. Вона вказується експериментатором, який досконало розбирається у предметі досліджень та знає, які з критеріїв є важливішими над іншими.

Пріоритет може внести вагомні зміни у кінцевий показник, якщо відомо наскільки важливим є критерій для передачі потоків із заданим видом трафіку. При визначенні фізичної структури, не встановлюється прив'язка до конкретних видів трафіку, вона упускається. У відповідності до поставленої мети критерієм ефективності буде максимум показника P_k , тому наближення показника до «1» характеризує найбільш ефективну фізичну структуру, яка відповідно до обраних маршрутів забезпечить найвищі показники якості сервісу для потоків.

Критеріями порівняння структур виступають параметри якості сервісу, які є важливими при транспортуванні потоків. Основними характеристиками якості сервісу на яких основані сучасні метрики є наступні: пропускна спроможність, затримка та завантаженість.

Першим етапом у розробці досліджуваної моделі є створення неорієнтованого графа $G=(V, E)$ телекомунікаційної мережі у вигляді матриці суміжності S . Для створення дослідної моделі, яка б могла надати достатню кількість результатів потрібно внести можливість задавати початкові параметри її роботи. Для генерації графа $G=(V, E)$ такими параметрами будуть кількість вузлів $|V|$ та ребер $|E|$. Параметр кількості вузлів $|V|$ є первинним і може приймати будь-які натуральні значення $|V| \in \mathbb{N}$, окрім значення 1, оскільки мережею називається об'єднання пристроїв, то в неї повинні входити хоча б 2 пристрої з'єднані між собою ребром. Кількість ребер $|E|$ є вторинним параметром і безпосередньо залежить від кількості вузлів $|V|$. Як було обумовлено у другому розділі граф повинен відповідати умові зв'язності, тому для заданого значення кількості вузлів $|V|$ існує мінімальне значення кількості ребер, при якому виконується умова (1), і рівне $|E_{\max}|$. Максимальне значення кількості ребер повинно утворювати повнозв'язну структуру, з $|E_{\max}|$ (2), тобто заповнити всі комірки над або під діагоналлю матриці S розмірністю $|V| \times |V|$.

Межі дотримання кількості ребер від $|E_{\min}|$ до $|E_{\max}|$ потрібні для відповідності графа $G=(V,E)$ телекомунікаційній мережі, а також для конкретизації вибірки досліджуваних фізичних структур. Кількість комбінацій ребер $C_{|E_{\max}|}^{|E|}$ (3) вказує на максимум варіацій фізичної структури без врахування їх зв'язності та містить велику кількість ізоморфних структур. Кількість незв'язних структур для заданих $|V|$ і $|E|$ є сталим числом, проте, розрахувати його наперед неможливо, так як невідомо математичної залежності.

Основним способом знаходження незв'язних структур є їх відсіювання за умовою відсутності шляху між будь-якою парою вузлів. Порівняння графів на ізоморфність є складним і тривалим процесом, тому його буде упущено. Отже, в результаті створити та проаналізувати $C_{|E_{\max}|}^{|E|}$ (3) структур, які будуть прототипами для дослідження роботи вибору методу вибору фізичної структури. Створення кожного графа у вигляді матриці суміжності S оперує лише двома величинами: наявністю або відсутністю ребра між заданою парою вершин i та j , $i \neq j$. В такому разі, буде використовуватись двійковий код, $2^{|E_{\max}|}$, в якому кількість ненульових розрядів є не меншою від $|E_{\min}|$.

В таблиці 1 представлено значення показника ефективності для згрупованих структур відповідно до утвореної топології. Більшість утворених структур із 5-ти вершин не мають літературної назви топології та об'єднуються під класом гібридних. Для їх позначення буде використана числова абревіатура згідно з рис. 6, де першим значенням буде кількість ребер структури, другим її порядковий номер на рис. 6. Для прикладу топологія 4.3 – це зірка згідно з рис. 6.

4 ребра	5 ребер	6 ребер	7 ребер	8 ребер
4.1 – Дерево	5.1 – Гібридна	6.1 – Гібридна	7.1 – Гібридна	8.1 – Гібридна
4.2 – Шина	5.2 – Гібридна	6.2 – Гібридна	7.2 – Гібридна	8.2 – Гібридна
4.3 – Зірка	5.3 – Гібридна	6.3 – Гібридна	7.3 – Гібридна	8.3 – Гібридна
	5.4 – Гібридна	6.4 – Гібридна	7.4 – Гібридна	
	5.5 – Кільцева	6.5 – Гібридна		

Рис. 6. Класифікація структур телекомунікаційних мереж з п'ятьма вершинами за кількістю ребер

Таблиця 1

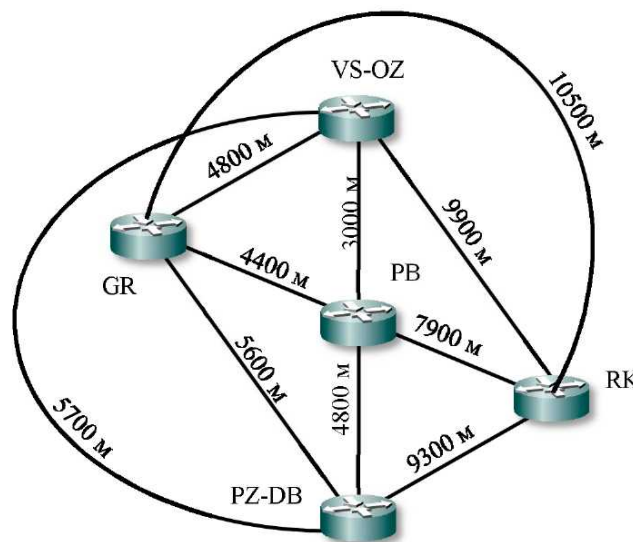
Значення показника ефективності для структур з п'ятьма вершинами

Кількість ребер $ E $	Топологія, відповідно до рис. 7	Кількість зв'язних структур в топології	Показник ефективності структури P	
1	2	3	4	
4	Дерево, 4.1	5	0,5228	
	Шина, 4.2	60	0,5234	
	Зірка, 4.3	60	0,625	
5	Гібридна, 5.1	60	0,5206	
	Гібридна, 5.2	60	0,5742	0,5892
	Гібридна, 5.3	60	0,5892	
	Гібридна, 5.4	30	0,6169	
	Кільце, 5.5	12	0,6667	
6	Гібридна, 6.1	60	0,6218	0,6443
	Гібридна, 6.2	60	0,6225	0,6557
	Гібридна, 6.3	60	0,6225	0,6723
	Гібридна, 6.4	10	0,6557	
	Гібридна, 6.5	15	0,7076	
7	Гібридна, 7.1	20	0,6756	
	Гібридна, 7.2	30	0,6756	0,6756
	Гібридна, 7.3	60	0,7259	
	Гібридна, 7.4	10	0,7586	
8	Гібридна, 8.1	15	0,7908	0,8299
	Гібридна, 8.2	30	0,7908	0,8299
9	Сітка, 9.1	5	0,9061	
10	Повнозв'язна, 10.1	1	1	

Як видно з таблиці 1, значення показника ефективності для структур із різною кількістю ребер може бути однаковим, а іноді, структури з меншою кількістю ребер стають більш ефективні. На рис. 7 показано діапазони зміни показників P для кожної групи структур. Рекомендується використовувати досліджений метод, як інструмент початкового відсіювання гірших топологій, а знайдені результати піддавати комп'ютерному моделюванню.

Проведено дослідження по визначенню ефективності структур з 4, 5 та 6-а вершинами. Для кожної структури був визначений показник ефективності та здійснено порівняльний аналіз структур між собою. За результатами дослідження структури чотирма ребрами отримали показники ефективності P у діапазоні від 0,558 – 0,625, зіркоподібна топологія є найкращою структурою з кількістю ребер рівною 4. Для структур з $|E| = 5$ показник ефективності коливається у діапазоні від 0,742 до 0,6667, серед даної групи структур найкращою топологією є кільцева, вона випереджає топологію зірка 4.3 на 4%. Структури з $|E| = 6$ та $|E| = 7$ отримали показники ефективності у діапазоні від 0,6218 до 0,0,7076 та від 0,6756 до 0,8299 відповідно. Серед структур з шістьма ребрами найбільш ефективною є гібридна топологія 6.5, яка є ефективнішою від топології та ефективніша за топологію 5.5 на 4% та на 8%, серед структур з сімома ребрами найефективнішою є гібридна топологія 7.4, що на 9% ефективніше за топологію 6.5 на 5%, за топологію 5.5 на 9%, та за топологію зірка 4.3 на 13%.

Для дослідження основних топологій телекомунікаційних мереж за критерієм «ефективність – вартість» спробуємо спроектувати телекомунікаційну мережу одного з інтернет-провайдерів міста Хмельницький. План-схема розміщення маршрутизаторів зображена на рисунку 8.



- VS-OZ – Магістральний маршрутизатор, що обслуговує райони «Виставка» та «Озерна»;
 GR – Магістральний маршрутизатор, що обслуговує район «Гречани»;
 PB – Магістральний маршрутизатор, що обслуговує район вулиці Прибузька, та центральну частину міста Хмельницького;
 RK – Магістральний маршрутизатор, що обслуговує район «Ракове»;
 PZ-DB – Магістральний маршрутизатор, що обслуговує райони «Південно-західний» та «Дубово»;

Рис. 7. Схема розташування маршрутизаторів (вершин) та відстань між ними у мережі для дослідження

Для дослідження основних топологій телекомунікаційних мереж (рис. 7) буде створено зведену таблицю вартості побудови різних топологій телекомунікаційних мереж, та проведено порівняльну графічну характеристику за критерієм «ефективність-вартість».

Для спрощення процесу проектування топології мережі та розрахунку умовної вартості побудови відповідної топології обумовлено декілька критеріїв:

- 1) Топологія мережі буде складатися з 5 маршрутизаторів (вершин), кожен з яких буде відповідати за обслуговування окремого району міста;
- 2) У ролі маршрутизаторів обрано модель Cisco 12016E/80, що дозволяє забезпечити пропускну спроможність близько 80 Гбіт/с;
- 3) Вартість Cisco 12016E/80 становить 32500\$;
- 4) Для спрощення розрахунків обрано оптоволоконний кабель як середовище передачі інформації, з урахуванням умов прокладання було обрано одномодовий 12-жильний оптичний кабель FinMark LT048-SM-07, вартістю 4.20 \$ за 1 погонний метр;
- 5) умовна вартість прокладання 1 км оптоволоконного кабеля складає 190,3\$;

Значення показника ефективності та умовної вартості конструювання різних топологій телекомунікаційних мереж

Кількість ребер $ E $	Топологія, відповідно до рис. 7	Показник ефективності структури P		Нормоване значення вартості конструювання мережі S_n	Сумарна вартість конструювання мережі, S_m , \$
1	2	3		4	5
4	Дерево, 4.1	0,5228		0,61036	275762
	Шина, 4.2	0,5234		0,60259	272250
	Зірка, 4.3	0,625		0,55498	250739
5	Гібридна, 5.1	0,5206		0,70656	319223
	Гібридна, 5.2	0,5742	0,5892	0,71741	324125
	Гібридна, 5.3	0,5892		0,69878	315711
	Гібридна, 5.4	0,6169		0,65117	294200
	Кільце, 5.5	0,6667		0,657	296834
6	Гібридна, 6.1	0,6218	0,6443	0,71822	324491
	Гібридна, 6.2	0,6225	0,6557	0,66477	300346
	Гібридна, 6.3	0,6225	0,6723	0,7532	340295
	Гібридна, 6.4	0,6557		0,76	343368
	Гібридна, 6.5	0,7076		0,76	343368
7	Гібридна, 7.1	0,6756		0,79692	360050
	Гібридна, 7.2	0,675 6	0,7259	0,7289	359611
	Гібридна, 7.3	0,7259	0,7289	0,85522	386390
	Гібридна, 7.4	0,7586		0,85619	386829
8	Гібридна, 8.1	0,7908	0,8299	0,84259	380683
	Гібридна, 8.2	0,7908	0,8299	0,91061	411413
9	Сітка, 9.1	0,9061		0,95336	430729
10	Повнозв'язна, 10.1	1		1	451801

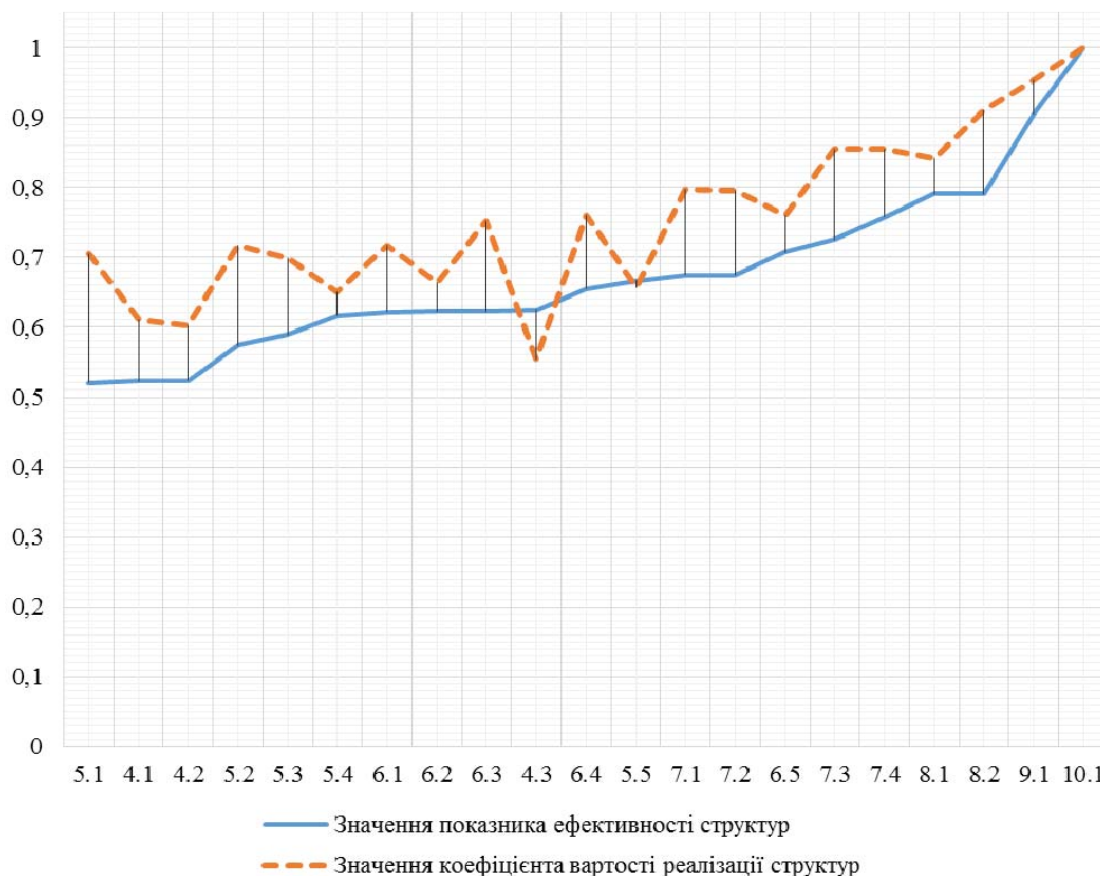


Рис. 8. Зведений графік взаємозалежності показника ефективності структур та їхньої вартості з сортуванням за значенням показника ефективності структур

В результаті дослідження були надані науково-практичні рекомендації, що за критерієм «ефективність-вартість» найбільш доцільно проектувати мережу з топологією зірка 4.3, показник вартості реалізації якої є найнижчим та рівний $S_n = 0,55498$, при цьому значення ефективності P для цієї структури складає 0,625.

Згідно проведених дослідів у розділі 3 вибір фізичної структури для мереж із низькою зв'язністю має значний вплив на подальше функціонування телекомунікаційної мережі. Обмеженість у виборі маршрутів або відсутність обхідних шляхів є ключовим фактором у неможливості змінити ситуацію після побудови мережі шляхом програмних методів. Хоча задача маршрутизації є неактуальною для мереж з низькою зв'язністю, однак, її використання дозволяє автоматизувати процес відновлення роботи мережі після виходу з ладу її компонентів. Тому, проектування ефективної фізичної структури із врахуванням особливостей динамічної маршрутизації дозволяє наперед передбачити шляхи передавання даних та врахувати перевантажені маршрутами сегменти при виборі пропускних спроможностей каналів.

Як було досліджено вище, зміна фізичної структури дає більший приріст ефективності ніж зміна логічної структури маршрутами з однаковою метрикою. Мережеві пристрої та лінії є основою утворення ресурсів мережі, однак, утворена ними фізична структура та обрані в них маршрути не дозволяють гарантувати залучення усього доступного ресурсу при обслуговуванні потоків. Тому, обов'язковим критерієм вибору структури повинна бути завантаженість мережі, яка вказує ефективність використання ресурсів структури.

Загалом, застосовувати метод синтезу фізичної структури слід із дотриманням наступних рекомендацій:

- застосовувати метод синтезу фізичної структури мережі потрібно на початковому етапі проектування, для вибору мінімальної множини робочих топологій із заданою кількістю вершин та ребер;
- застосування методу передбачає сталість інтенсивності потоків, тому після вибору найбільш ефективної структури її потрібно змодельовати у симуляторах вищого рівня (OpNet, NS_3, NetSim, GloMoSim, OMNeT++);
- застосування методу упускає розгляд характеристик вузлів, тому більшість синтезованих структур будуть тяжіти до зіркоподібної, а врахування даного фактору можливе при модифікації ієрархії МАІ з введенням додаткового критерію;
- залежно від прогнозованого типу переважаючого трафіку є можливість змінити вагові коефіцієнти критеріїв вибору фізичної структури;
- при виборі найбільш ефективних структур варто врахувати у виборі структури із меншою і більшою кількістю ребер, оскільки, неузгодженості у поєднанні фізичної і логічної структур можуть призвести до появи невикористаного ресурсу мережі, сумарне значення якого може компенсувати ефективність додаткового ребра;
- досліджений метод може бути використаний при модернізації мережі для пошуку більш ефективних рішень фізичної структури згідно існуючих вимог функціонування мережі;
- вибір алгоритмів динамічної маршрутизації можна змінювати в залежності від того чи задані пропускні спроможності ребер, для максимального наближення вибору маршрутів до результатів роботи протоколів динамічної маршрутизації.

В загальному даний метод синтезу фізичної структури є досить гнучкий за рахунок застосування МАІ та може бути модифікований згідно поставленої цілі дослідження. Кількість критеріїв на другому рівні ієрархії є необмеженою і залежить від дослідника, тому варто поряд із інтенсивністю потоків та завантаженістю мережі ввести додаткові критерії якими можуть бути вартість побудови мережі, характеристики вузлів або параметри якості сервісу.

Метод модифікації логічної структури направлений на усунення недоліків метрики маршрутизації, та дозволяє врахувати у виборі маршрутів невикористані ресурси сегментів мережі. Передбачається використання методу лише за результатами роботи протоколу динамічної маршрутизації та внесенні відповідних змін у вигляді статичних маршрутів. Це передбачає початкову збіжність протоколу динамічної маршрутизації. Введення змін у таблицю маршрутизації буде ініціювати обмін службовою інформацією для повідомлення внесених змін. Варто враховувати наступні рекомендації при застосуванні методу модифікації логічної структури:

- важливим фактором є початкове відсіювання маршрутів вибраних за допомогою алгоритму MST, що суттєво знизить роботу методу;
- застосування алгоритму MST до матриці завантаженості буде найменш завантажене дерево у мережі, що є ефективним інструментом пошуку невикористаного мережевого ресурсу;
- застосування методу модифікації логічної структури з використанням матриці завантаженості ребер маршрутами можливе до початку роботи протоколу динамічної маршрутизації, оскільки, враховуються лише факт існування потоку у ребрі;
- також, застосування описаного методу з використанням матриці завантаженості з відносними представленням вимог потоків у вигляді пропускну здатності, виконується до початку роботи протоколів динамічної маршрутизації за результатами прогнозування інтенсивності кожного з вузлів;
- в подальшому, за результатами збору статистики трафіку, застосування методу модифікації логічної структури дозволить найбільш ефективно вибрати маршрути із залученням максимального об'єму

ресурсів фізичної структури;

- застосування методу оперує завантаженістю мережі, тому найбільш доцільніше його застосовувати для протоколів динамічної маршрутизації RIP та OSPF, у яких вона не враховується;

Дотримання даних рекомендацій щодо застосування методів дозволить мінімізувати додаткове навантаження на мережу та підвищити ефективність використання мережевих ресурсів.

Висновки

Розроблено модель формування фізичних та модифікації логічних структур відповідно до описаних у роботі методів. Для синтезу фізичної структури вхідними даними є кількість вузлів мережі або множина досліджуваних топологій, а кінцевим результатом є присвоєння кожній структурі показника ефективності. При модифікації логічної структури здійснюється пошук множини маршрутів та для кожного вказується показник розподілу ресурсів. Проведено дослідження по визначенню ефективності структур з 4, 5 та 6-а вершинами. Для кожної структури був визначений показник ефективності та здійснено порівняльний аналіз структур між собою. Проведено дослідження по модифікації логічної структури, побудованої згідно з дистанційно векторними протоколами динамічної маршрутизації, показано, що варіації логічної структури в межах еквівалентних маршрутів можуть збільшити ефективність структури на 7.3%, однак, застосування методу модифікації логічної структури вказує на вибір довшого маршруту, під час застосування якого розподіл мережевих ресурсів досягає свого максимуму (100%). Розраховано показники досліджуваних структур телекомунікаційних мереж за критерієм «ефективність – вартість».

Надано науково-практичні рекомендації та вказано обмеження щодо застосування методу синтезу фізичної структури при побудові та модернізації телекомунікаційних мереж. Надано перелік рекомендацій щодо передумов застосування методу модифікації логічної структури у телекомунікаційних мережах.

Література

1. Електронні засоби навчання. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції : том 1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.znanius.com/3533.html>
2. G. Malkin, F. Baker, "RIP Version 2 MIB Extension", RFC 1389, January 1993.
3. Муляр І. В. Оцінка протоколів динамічної маршрутизації для інтегрованих мереж / І. В. Муляр, А. І. Сбитнев, А. В. Джулій, О. С. Ленков // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2013. – Вип. 43. – С. 158 – 165.
4. Климаш М.М. Теоретичні основи телекомунікаційних мереж : навчальний посібник / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан. – Львів : Вид-во УАД, 2011. – 496 с.

References

1. Elektronni zasoby navchannya. Telekomunikacijni systemy ta merezhi. Struktura j osnovni funkciyi. Tom 1.
2. G. Malkin, F. Baker, "RIP Version 2 MIB Extension", RFC 1389, January 1993.
3. Mulyar I. V., Sbitnyev A. I., Dzhulij A. V., Lyenkov O. S. Ocinka protokoliv dynamichnoyi marshrutyzaciyi dlya intehrovanyx merezh. Zbirnyk naukovykh prac Vijskovooho instytutu Kyuyivskoho nacional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. 2013. Vyp. 43. S. 158 – 165.
4. M.M. Klymash, B.M. Stryxalyuk, M.V. Kajdan, Teoretychni osnovy telekomunikacijnyx merezh: navchalnyj posibnyk, Lviv: Vydavnytvo UAD, 2011. 496 s.

Рецензія/Peer review : 9.8.2015 р. Надрукована/Printed : 30.8.2015 р.
Рецензент: д.т.н., професор Мартинюк В.В.