

Б.А. Бугиль, О.А. Лаврів, М.І. Бешлей, В.В. Червенець,  
Національний університет "Львівська політехніка"

## МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ФІЗИЧНОЇ ТА ЛОГІЧНОЇ СТРУКТУР ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

© Бугиль Б.А., Лаврів О.А., Бешлей М.І., Червенець В.В., 2013

B.A. Buhyl, O.A. Lavriv, M.I. Beshley, V.V. Chervenets,  
Lviv Polytechnic National University

## OPTIMIZATION METHODS FOR TELECOMMUNICATIONS NETWORKS PHYSICAL AND LOGICAL STRUCTURES

© Buhyl B.A., Lavriv O.A., Beshley M.I., Chervenets V.V., 2013

The article deals with reasons why the planned network resource is not used completely. The main attention is paid to the dynamic routing protocol, which does not consider the current load of local network segments according to the principle of its functioning. In the paper local segments loading considers with existence of a constant flow to reduce the computational complexity of the proposed method. The method is proposed in the work to maximize the use of network resources and resource allocation improving based on alternative routes variation through less loaded local segment. The proposed method implemented as a simulation model in Matlab. It allows making decision on routes variation based on introduced efficiency index for resource allocation. The article shows results of two experiments on the proposed method to determine its adequacy. The task of the first experiment is to determine the effectiveness of the method to vary the network resources allocation for simple network structure. The second experiment compares the value of efficiency index for resource allocation with load balancing according to the protocol EIGRP and the one with route replacement. The proposed method replaces dynamically defined routes to alternative that maximizes the efficient use of shared network resource. The major factors influencing the effectiveness of a network resource handling is a network physical or logical structure. It depends on the number of edges in the network topology. Physical structure forms when designing the network in the future does not undergo significant modifications, so the paper proposes a method of physical structure selecting that will provide the highest flows service quality for a given number of nodes and edges. Physical structure redundancy increases with connectivity increasing, leading to a set of possible logical structures. Formation of these logical structures provides routing policies in the network. In this paper, we propose a comprehensive method of physical and logical structures selection, which provides the most effective use of network resources to ensure a high level of flows service quality. Routing protocols operation depends on the network physical structure, because it has to form the best logical structure. The criterions of logical structure effectiveness are the QoS parameters for transmitting flows. The main disadvantage of dynamic routing protocols is that the selection of the optimal route bases on mono-criterion metric does not considers all the network features and causes an ineffective use of network resources. At present, the only way to control the network resources allocation during the routing process is traffic balancing. It means that all equivalent routes are uses, through which you can reach the recipient.

**Key words:** telecommunication network, route, flow, graph, efficiency index, resources allocation.

Проведено аналіз та обґрунтування чинників, що впливають на особливості використання мережевого ресурсу, закладеного у процесі проектування телекомунікацій-

ної мережі. Кількість ребер у топології мережі є основним фактором, що характеризує вплив фізичної та логічної структур на ефективність використання мережевого ресурсу. Запропоновано метод вибору фізичної структури, яка забезпечить максимальну якість сервісу потокам при заданій кількості вузлів і ребер. Для забезпечення балансу потоків розроблено метод модифікації логічної структури, що ґрунтується на пошуку альтернативних шляхів через найменш завантажені локальні сегменти телекомунікаційної мережі.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, маршрут, граф, показник ефективності, розподіл ресурсів.

### Вступ

Процес маршрутизації невід’ємно пов’язаний із структурою телекомунікаційної мережі, що закладена на етапі її проектування, і складність маршрутизації безпосередньо залежить від відповідності фізичної структури до мережі віртуальної [1], яку утворює процес маршрутизації. Під складністю маршрутизації розуміємо неоднозначність вибору маршрутів між кожною парою вузлів у заданій структурі мережі. Зменшення зв’язності структури мережі зменшує складність вибору маршрутів, оскільки зменшується кількість безпосередніх з’єднань між вузлами. Цей вибір може здійснювати адміністратор мережі, який за допомогою об’єднання багатьох факторів може ефективно вибрати статичні маршрути у нескладних структурах. Статичні маршрути мають власні переваги і активно використовуються у роботі мережі, та основним інструментом маршрутизації у сучасних мережах є протоколи динамічної маршрутизації. Автоматичний вибір маршрутів, їх оновлення та забезпечення відновлення роботи мережі у разі виходу з ладу її окремих елементів робить управління мережею незалежним від людського фактора. Основним недоліком динамічної маршрутизації є недосконалість алгоритмів вибору маршрутів та недосконалість метрик, що об’єднують незначну кількість мережевих параметрів, які враховують під час вибору маршрутів. Компромід між збіжністю та оптимальністю вибору маршрутів є основою при розробленні протоколів динамічної маршрутизації; найчастіше застосовують алгоритми Дейкстри та Беллмана-Форда, які є основою більшості сучасних протоколів. Основним недоліком протоколів динамічної маршрутизації є те, що вибір оптимального маршруту здійснюється на основі однокритеріальної метрики, яка не охоплює всіх особливостей функціонування мережі і стає причиною неефективного використання мережевих ресурсів. У роботі запропоновано комплексний метод підбору фізичної та логічної структур, які дозволять максимально використати мережевий ресурс для забезпечення потоків високого рівня сервісу.

Прокладання маршруту через структуру мережі протоколами динамічної маршрутизації формує розподіл мережевих ресурсів, який впливає на рівень якості сервісу потоків. Оскільки інтенсивність потоків є випадковою величиною, що змінюється в часі, завантаженість мережі, а отже, і якість сервісу, залежать від його пікового значення. Для потоків, що транспортуються по виділених лініях, обмежувальним фактором якості сервісу є пропускна здатність каналу зв’язку, а для потоків із гарантованим сервісом – величина зарезервованої смуги пропускання. Виділена лінія для окремого потоку вимагає повнозв’язної топології, що не завжди ефективно із погляду затрачених коштів на будівництво. Отже, у мережах із кількістю з’єднувальних ланок, меншою за максимальну, одне ребро може належати декільком маршрутам, що призведе до конкуренції за виділення пропускної здатності ребра для кожного із потоків.

При виборі маршрутів за протоколами динамічної маршрутизації [2], найкоротший маршрут не гарантує забезпечення якості сервісу; також більшість метрик не враховує наявних маршрутів, які вже проходять по ланці. Основною проблемою під час вибору маршрутів із гарантованою якістю сервісу для потоків є структура мережі, яка першочергово обмежує найдосконаліші протоколи динамічної маршрутизації, змушуючи вибирати найкращі маршрути з можливих.

Згідно з вищенаведеним завданням забезпечення потоків задовільним сервісом полягає у правильному комбінуванні фізичної і логічної структур телекомунікаційної мережі. Обидві компоненти є одним цілим і, залежно від зв’язності структури, стають домінуючими при впливі на

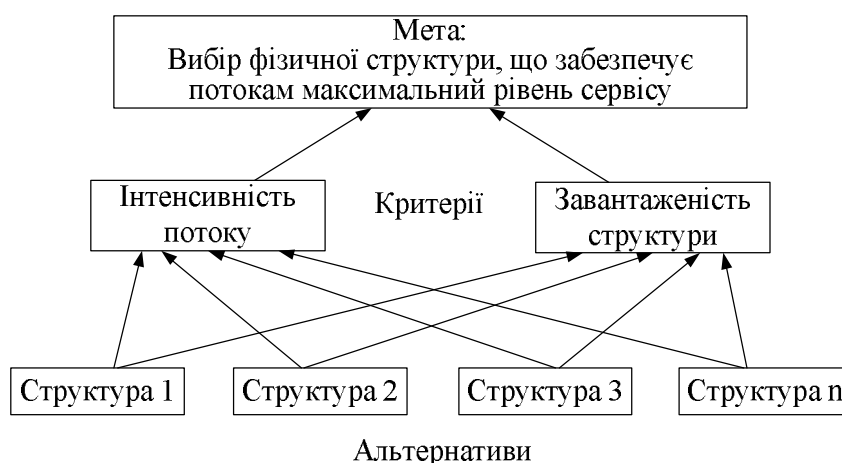
якість сервісу. Тому виконують два підзавдання: вибір фізичної структури та зміна логічної структури, обраної протоколами маршрутизації, для забезпечення потокам задовільного рівня сервісу.

### Метод вибору фізичної структури мережі

Для розв'язання підзадачі вибору фізичної структури запропоновано використати теорію графів, де структура телекомунікаційної мережі буде представлена графом  $G = (V, E)$ , множина вершин  $V$  відповідає вузлам мережі, а множина ребер  $E$  – каналам. Однією з переваг використання теорії графів є можливість дослідження властивостей мереж із максимальним охопленням характеристик ребер, що дає змогу аналізувати вплив пропускної здатності, завантаженості та затримки в каналах передавання інформації на роботу мережі. Водночас враховувати параметри та характеристики вузлів, а також зміну властивостей потоків під час обробки можливо лише за їх впливом на параметри ребер [3].

У теорії графів не кожен граф може представляти телекомунікаційну мережу, тому накладаються обмеження на кількість ребер та їх розміщення в структурі графа. Це обмеження стосується зв'язності графа; згідно з її основним визначенням, між кожною парою вузлів повинен існувати шлях. Забезпечивши відповідність графа до телекомунікаційної мережі, в подальшому досліджують ефективність фізичної структури на предмет забезпечення задовільного рівня якості сервісу потокам за допомогою методу аналізу ієрархій (МАІ).

Цей метод призначений для прийняття складних рішень згідно з встановленими критеріями шляхом попарних порівнянь. Основним його недоліком є формування вхідних даних за допомогою суб'єктивних суджень експертів. Його застосування при порівнянні структур графів є неприйнятним, тому вхідні дані будуть формуватися шляхом визначення максимально можливого рівня сервісу в досліджуваній структурі. У відповідності до МАІ, потрібно сформуванати ієрархічну структуру досліджуваного завдання (рисунок), верхній рівень якої визначатиме ціль – фізична структура з потоками, яким забезпечено максимальний рівень сервісу. Другий рівень показує критерії оцінки, тобто показники якості сервісу. В роботі були прийняті два критерії: інтенсивність потоку  $I$  та завантаженість мережі  $L$ . Завантаженість не є показником рівня сервісу, однак безпосередньо впливає на нього і, найголовніше, свідчить про ефективність використання мережевого ресурсу. Під інтенсивністю потоку розуміємо максимальну швидкість передавання між двома вузлами мережі, яка може бути забезпечена потоку згідно з обраним маршрутом.



Ієрархічне зображення задачі згідно з методом аналізу ієрархій

Для порівняння структур між собою потрібно забезпечити уніфікацію формування потоків та пропускних здатностей ребер. Також ці обмеження використовуватимуться при заміні маршрутів у логічній структурі. У роботі будуть прийняті такі обмеження:

- у мережі одночасно існують всі потоки, причому між кожною парою вузлів  $i$  та  $j$ ,  $i \neq j$  передається один ненапрявлений потік, який протікає за обраним маршрутом;

- пропускна здатність всіх ребер є однаковою;
- пропускна здатність ребра рівномірно ділиться між всіма потоками, що проходять через неї;
- пропускна здатність потоку між вершинами  $i$  та  $j$ ,  $i \neq j$  визначається найменшою пропускною здатністю в ребрі, що належить обраному маршруту.

Ці обмеження дозволяють сформувати сталий потік, який у результаті рівноправної конкуренції з іншими потоками набуває максимального значення інтенсивності. Так буде сформовано перший критерій у вигляді матриці інтенсивності потоків  $I$ . Для структур графів, у яких кількість маршрутів, що проходить по кожному ребрі, не є однаковою, спостерігаємо недовантаження мережі. Це впливає із введеного обмеження про пропускну здатність шляху за теоремою про максимальний потік. Завантаженість кожного ребра є другим критерієм та виражене матрицею завантаженості  $L$ .

На останньому – третьому – рівні ієрархії розміщені альтернативи, тобто структури графів. Потоки, що циркулюють у структурі, оцінюються за введеними критеріями, та згідно з поставленою ціллю структурі присвоюється показник ефективності  $P$  за таким співвідношенням:

$$P = \max \left[ \sqrt[|V|]{\prod_{i=1, j=1}^{|V|} I_{i,j}^{w_1}} + \sqrt[|V|]{\prod_{i=1, j=1}^{|V|} L_{i,j}^{w_2}} \right], \quad i \neq j, \quad (1)$$

де  $P$  – показник ефективності структури,  $w_k$  – вага  $k$ -го критерію,  $|V|$  – кількість вершин графа,  $I$  – матриця інтенсивності потоків,  $L$  – матриця завантаженості.

Цільовою функцією є  $\max(P)$ , тобто структура, у якій потоки набувають найвищих показників якості сервісу. Згідно з вищеописаним методом здійснюється підбір фізичної структури, що має найбільший ефект для структур з низькою зв'язністю.

### Метод оптимізації логічної структури мережі

Із збільшенням зв'язності фізична структура не є вирішальним чинником забезпечення потоків задовільним рівнем сервісу через багатоваріантність розподілу мережевих ресурсів. Вибраний оптимальний маршрут із множини шляхів розподіляє ресурси фізичної структури між потоками, утворюючи логічну структуру. Зміна маршрутів за критерієм максимізації виділених мережевих ресурсів для потоків дасть змогу підібрати таку логічну структуру, яка раціонально використовує ресурси фізичної.

Виконання поставленого підзавдання здійснено у декілька етапів, на яких отримуються вхідні дані, порівнюються та вибираються кращі маршрути. Першим кроком є пошук шляхів у досліджуваній структурі графа та формування матриць найкоротших шляхів  $W$  і завантаженості ребер потоками  $R$ . Матриця  $R$  виражає завантаженість ребра, з тією особливістю, що завантаженість виражається кількістю потоків, що проходять по ребру.

Нехай маємо граф  $G = (V, E)$ , тоді  $e_{i,j} = (i, j)$ ,  $i \neq j$ ,  $i, j \in V$  визначає ребро графа, що з'єднує вершини  $i$  та  $j$ . Визначення матриці найкоротших шляхів  $W$  буде здійснюватись за алгоритмом Флойда, де кожен елемент матриці є шляхом  $m(i, j) = \{e_{i,l}, e_{l,m}, \mathbf{K}, e_{k,j}\}$ ,  $i \neq j$ ,  $i, l, m, k, j \in V$ . Цей запис містить послідовність ребер  $e_{l,m}$ , які належать вибраному найкоротшому шляху. Якщо граф повнозв'язний, то кожен елемент матриці містить лише одне ребро, яке з'єднує відповідні вершини. У решті структур графів ребра можуть повторюватись в декількох шляхах. Для неорієнтованого графа буде достатньо враховувати шляхи, записані над або під діагоналлю матриці.

Матриця  $R$  характеризує кількість найкоротших шляхів, що проходить через кожне ребро графа, відповідно незаповнені елементи вказують на відсутність ребра між вершинами, а елементи, що відповідають ребрам графа, можуть приймати значення від 0 до  $|E_{\max}|$ . Заповнення цієї матриці відбувається на основі матриці найкоротших шляхів підсумовуванням кількості потоків, що

проходять через ребро  $e_{l,m}$   $R_{l,m} = \begin{cases} R_{l,m} + 1, & e_{l,m} \in m \\ R_{l,m}, & e_{l,m} \notin m \end{cases}$ ,  $m \in W_{rout}$ ,  $l, m \in V$ , що входить до будь-якого

із найкоротших шляхів.

Значення матриці  $R$  слугуватимуть характеристикою завантаження ребра. Якщо всі записи є однаковими, то ресурси розподілені рівномірно між усіма маршрутами, згідно з введеними обмеженнями на формування потоків, і логічна структура підібрана правильно. Тому в загальному критерій підбору логічної структури має такий вигляд:  $\min[\max(R) - \min(R)]$ . Значення в дужках вказує на нерівномірність завантаження ребер потоками. Якщо не задано значення інтенсивності потоків між кожною парою вузлів, ця величина свідчить про існування потенційно вузьких місць мережі за кількістю маршрутів. Із врахуванням ситуації, що склалася при IP-маршрутизації, для граничних мережевих пристроїв зовнішній канал міститиме найбільшу кількість маршрутів на ребро, але визначати його як потенційно перевантажений є неправильним. Однак суть введення матриці завантаженості ребер потоками полягає у тому, щоб визначити, які потоки проходять через вказане ребро, і в подальшому, підсумувавши швидкості кожного потоку, визначимо сумарну завантаженість (Мбіт/с). Так можна діяти при відомих значеннях інтенсивностей потоків між кожною парою вузлів, а в цьому випадку враховуємо лише факт існування потоку, що відображено матрицею.

У структурах із великою зв'язністю завжди є можливість перевизначення маршрутів для рівномірного завантаження всіх сегментів мережі. Для цього потрібно знайти у матриці  $R$  значення найменш завантажених ребер і перескерувати потоки, наявні у перенасичених ребрах, у знайдені. Оскільки шлях являє собою послідовність ребер, потрібно виділити із досліджуваної структури, представлені графом мережі, не просто окремі найменш завантажені ребра, а зв'язний підграф. Для цього застосовано алгоритм пошуку найменшого зв'язного дерева (Minimum Spanning Tree, MST) до матриці завантаженості ребер шляхами  $R$ . Побудоване дерево  $G_{MST}(V, E_{\min})$  міститиме всі вузли графа  $G$ , з'єднані мінімальною кількістю ребер, що належать до найменш завантажених. В отриманій структурі існує лише один шлях між двома вузлами, без врахування зворотного, і він являє собою потенційний обхідний шлях між вузлами через незавантажений сегмент мережі.

Для знаходження потенційних обхідних маршрутів потрібно застосувати алгоритм Флойда до знайденого найменшого зв'язного дерева  $G_{MST}(V, E_{\min})$  та сформувати матрицю шляхів  $W_{MST}$ . Отримана матриця шляхів  $W_{MST}$  може містити найкоротші шляхи, визначені у матриці  $W$ , та обхідні шляхи з максимальним рангом  $r = |V| - 1$ , оскільки деревоподібна структура виключає наявність петель. Для пошуку задовільної логічної структури здійснюється відсіювання дублюючих шляхів у матрицях  $W$  та  $W_{MST}$ , та шляхів максимального рангу. Цей крок потрібен для знаходження шляхів, які із найбільшою вірогідністю посприяють покращенню розподілу ресурсів мережі. Найкраще взаємно замінювати шляхи, в яких різниця метрик є мінімальною, що пояснюється мінімальним значенням додаткового навантаження ребер обхідного шляху, однак не для всіх варіантів логічних структур це справедливо.

Після відбору обхідних шляхів треба визначити, які з них позитивно впливатимуть при введенні їх у логічну структуру, та вибрати максимально ефективні. Для цього був введений показник ефективності розподілу ресурсів  $K$  (2). Він характеризує зміну завантаженості мережі згідно з матрицею  $R$ , оскільки зміна одного з маршрутів вплине на перерозподіл ресурсу. Чим меншим буде значення показника  $K$ , тим більшою мірою вивільнений ресурс посприяв підвищенню рівня сервісу.

$$K = \min \left( \sum_{i,j} \left( \frac{\sum R_{i,j}}{|E|} - R_{i,j} \right) \right) \quad (2)$$

Для визначення найефективнішої логічної структури потрібно по черзі підставити кожен відібраний шлях  $m_{MST}(i, j)$ ,  $i \neq j$ ,  $i, j \in V$  у матрицю шляхів  $W$  та визначити значення  $K$  згідно з (2). Шлях, який найпозитивніше впливає на логічну структуру, відповідатиме мінімальному показнику  $K$ , і саме його потрібно замінити.

Відповідно не кожен відібраний маршрут посприяє позитивному перерозподілу ресурсів, зрештою, якщо будуть відомі критичні інтенсивності потоків, це накладе додаткові обмеження на показник  $K$ . Оскільки в роботі вони не задаються, то значення показника вказує на сумарне покращення рівня сервісу потоків з урахуванням зміни балансу ресурсів телекомунікаційної мережі. У разі заміни маршруту вивільнений ресурс буде скерованим на підвищення рівня сервісу суміжних потоків та його зменшення для потоків на шляху нового маршруту. Показник  $K$  висвітлює кількісну складову цих змін, а критерій мінімуму вказуватиме на збільшення об'єму ресурсів переважній кількості потоків.

Із збільшенням кількості вузлів кількість варіацій структур різко зростає, тому підбір логічної структури може вимагати зміни більше ніж одного шляху. Альтернативні шляхи обираємо за результатами застосування алгоритму MST до досліджуваного графа  $G$ , тому кількість шляхів, які потрібно замінити на пряму залежить від кількості незалежних мінімальних зв'язних дерев. Для структур з кількістю ребер, більшою за  $|E| = y \cdot |E_{\min}| + 1$ ,  $y = 2, 3 \dots N$  існуватиме  $y$  незалежних дерев, і у кожному з них буде обраний маршрут для зміни логічної структури [4].

### Висновки

Запропоновано комплексний підхід на основі двох методів, які полягають у виборі оптимальної фізичної та логічної структур за критерієм забезпечення максимального рівня сервісу потокам. Фізична та логічна структури мережі, отже, є максимально подібні, що забезпечує оптимальний баланс потоків у телекомунікаційній мережі. Отже, забезпечено узгоджене виконання завдань розподілу ресурсів на різних рівнях її функціонування. Розроблені методи використовують просте з погляду формалізації завдання математичне забезпечення, отже, можуть бути порівняно легко впроваджені у вигляді засобів підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних мереж операторського класу.

1. Климаш М.М., Бугиль Б.А., Лаврів О.А. *Інтегральна оцінка ефективності вибору маршрутів передавання потоків даних для різних конфігурацій мережевих топологій* // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" №738. *Радіоелектроніка та телекомунікації*. – Львів. – 2012. С. 95–100. 2. Medhi D., Ramasamy K. *Network routing: algorithms, protocols, and architectures*. Morgan Kaufmann, 2007. – 788 p. 3. Mykhailo Klymash, Orest Lavriv, Bohdan Buhyl, Yuriy Danik. *Service Quality Oriented Method of Multiservice Telecommunication Networks Design*. 11<sup>th</sup> International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science Dedicated to the 60th Anniversary of Radio Department at Lviv Polytechnic National University TCSET'2012. February 21-24, 2012 Lviv-Slavske, Ukraine. Publishing House of Lviv Polytechnic. – P. 235–236. 4. Бугиль Б.А. *Підвищення ефективності розподілу ресурсів телекомунікаційної мережі шляхом зміни маршрутів передавання даних [Електронний ресурс]* / Б.А. Бугиль, М.М. Климаш, О.А. Лаврів, І.В. Демидов // *Проблеми телекомунікацій*. – 2012. – № 4 (9). – С. 32 – 44. – Режим доступу до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124\\_bugil\\_resource.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_bugil_resource.pdf).