

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЦЕНТР «МАЛА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ»

НАУКОЄМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Колективна монографія

Під загальною редакцією
В.М. Безрука, Л.С. Глоби, О.Є. Стрижака

Київ

2019

УДК 621.391+004.7

НЗ4

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного центру «Мала академія наук України» (протокол № 1 від 15 січня 2019 року), науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол № 2 від 25.06.2018 р.)

Рецензенти:

Бараннік В.В., д.т.н., проф., начальник кафедри бойового застосування та експлуатації АСУ Харківського Національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба; Климаш М.М., д.т.н., проф., завідувач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

НЗ4

Наукоємні технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах : монографія / Під загальною редакцією В.М. Безрука, Л.С. Глоби, О.Є. Стрижака. – К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 194 с.
ISBN 978-617-7734-02-3

В монографії викладені сучасні результати досліджень ряду авторів з наукоємних технологій оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах. Розглядаються особливості методів багатокритеріальної оптимізації систем з урахуванням сукупності показників якості, а також особливості та результати вирішення задач управління при передачі та обробці інформації для різних типів інфокомунікаційних мереж.

УДК 621.391+004.7

© Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2019

© Харківський національний університет радіоелектроніки, 2019

© Національний центр «Мала академія наук України», 2019

ISBN 978-617-7734-02-3 © Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019

ЗМІСТ

	Вступ	4
1	МЕТОДИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М.</i>	7
2	БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ПРОЕКТНИХ ВАРІАНТІВ ПРИ ПЛАНУВАННІ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М., Чеботарьова Д.В.</i>	27
3	ВИБІР ПЕРЕВАЖНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ <i>Безрук В.М., Власова В.О., Скорик Ю.В.</i>	47
4	БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М., Гальченко К.Р.</i>	83
5	КЕРУВАННЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ <i>Скулиш М.А., Суліма С.В.</i>	97
6	ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕНЬ У ДАТА-ЦЕНТРИ ЗА КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ <i>Гвоздецька Н.А., Глоба Л.С., Прокопець В.А., Степурін О.В.</i>	127
7	ДИНАМІЧНИЙ РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ У ВІРТУАЛІЗОВАНИЙ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ОПЕРАТОРА УКРАЇНИ З ПІДВИЩЕННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ДАНИХ <i>Гвоздецька Н.А., Глоба Л.С., Прокопець В.А.</i>	151
8	МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ВЕРТИКАЛЬНОГО ХЕНДОВЕРУ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ <i>Глоба Л.С., Кірющукін Р.О., Курдеча В.В.</i>	177

ВСТУП

Інфокомунікації – сучасна концепція конвергентної взаємодії телекомунікацій та інформаційних технологій з метою забезпечення своєчасної якісної передачі та обробки інформації.

Із впровадженням у світі технологій 4G LTE та розвитком тенденції переходу до технологій 5G постає питання збільшення швидкості та ефективності передачі та обробки даних. Все більшого поширення набувають сервіси Internet of Things (Інтернет речей) та сервіси міжмашинної взаємодії (M2M). Ці сервіси продукують великі масиви даних у режимі реального часу, що тягне за собою появу концепції BigData. Поряд із цим у світі гостро стоїть проблема економії електроенергії, що наразі споживається центрами обробки даних у величезних обсягах.

Такі виклики сучасного світу інфокомунікацій спричиняють необхідність пошуку нових наукоємних технологій оптимізації та управління при вирішенні задач планування та проектування інфокомунікаційних мереж. В монографії викладені деякі сучасні результати досліджень ряду авторів з питань оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах з урахуванням сукупності техніко-економічних вимог, включаючи швидкість передачі та обробки даних, енергоефективність, оптимальне використання ресурсів та інше. Це визначає актуальність опублікування даної колективної монографії, в якій викладені деякі результати досліджень авторів по вирішенню задач оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах з використанням сучасного математичного апарату та високоефективних обчислювальних засобів. Кожен розділ монографії являє собою завершене викладення результатів досліджень, отриманих авторами цього розділу.

Матеріали 1 розділу підготував Безрук В.М. У цьому розділі розглядаються деякі особливості методів багатокритеріальної оптимізації, що використовуються при розв'язанні різних типів задач оптимізації проектних рішень у мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості. Наведено методи вирішення багатокритеріальних задач оптимізації при застосуванні безумовного критерію переваги, що приводить до отримання підмножини Парето-оптимальних рішень на множині допустимих варіантів. Для звуження підмножини Парето до єдиного переважного проектного варіанту застосовується умовний критерій переваги. Розглянуто різні методи формування умовного критерію переваги з урахуванням додаткової інформації від експертів, що дають можливість звуження підмножини Парето до єдиного переважного рішення. У наступних розділах 2 – 4 наводяться деякі приклади, що ілюструють практичні особливості використання розглянутих методів при багатокритеріальному аналізі і виборі оптимальних проектних варіантів для різних засобів зв'язку.

Матеріали 2 розділу підготували Чеботарьова Д.В., Безрук В.М. У цьому розділі розглянуто особливості застосування методів багатокритеріальної

оптимізації на етапі номінального планування радіомережі системи стільникового мобільного зв'язку (СМЗ) 2-го та 3-го покоління. Вирішена задача оптимізації радіомережі СМЗ як задача дискретного вибору Парето-оптимальних проектних варіантів при врахуванні сукупності показників якості. Розглянуто також особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації при номінальному плануванні транспортної мережі СМЗ. Наведені результати вибору оптимальної топології транспортної мережі СМЗ з урахуванням сукупності показників якості.

Матеріали 3 розділу підготували Безрук В.М., Скорик Ю.В., Власова В.О. У даному розділі розглянуто особливості вибору переважного проектного варіанту з урахуванням сукупності показників якості при застосуванні умовного критерія переваги, що заснований на використанні методу аналізу ієрархій (МАІ). Цей метод полягає в отриманні суджень експертів по парним порівнянь різних елементів проблеми вибору. В результаті обробки цих даних за строго формалізованими процедурами обчислюється вектор глобальних пріоритетів, компоненти якого визначають пріоритетність вибору переважного варіанту системи. Досліджено практичні особливості застосування МАІ для вибору переважного варіанту на прикладі різних типів засобів зв'язку, зокрема, мовних кодеків для ІР телефонії, системи масового обслуговування заявок у вузлах комутації мережі, проектних варіантів систем мобільного зв'язку 3-го покоління, технологій мобільного зв'язку 4-го покоління, типів мобільних телефонів, протоколів маршрутизації в ad-hoc мережах, модуляції в цифрових системах зв'язку, систем телевізійного мовлення стандартів DVB-T і ATSC, протоколів маршрутизації в бездротовій сенсорно-актуаторній мережі.

Матеріали 4 розділу підготували Безрук В.М., Гальченко К.Р. У даному розділі розглядаються особливості математичного формулювання та вирішення задач оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку. Оскільки, практичні умови роботи мереж зв'язку вимагають врахування декількох показників якості (метрик) при виборі оптимальних маршрутів, тому розглянуто багатокритеріальний підхід до вирішення задач оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку. Наведено метод формування підмножини Парето-оптимальних варіантів маршрутизації, що дають можливість організації багатошляхової маршрутизації у мережі зв'язку. Наводиться приклад вирішення задачі оптимальної маршрутизації у мультисервісній мережі зв'язку з урахуванням сукупності показників якості.

Матеріали 5 розділу підготували Скулиш М.А., Суліма С.В. У даному розділі запропоновано алгоритм оптимального розподілу ресурсів у віртуалізованих мережах. Метою алгоритму надання ресурсів є виділення достатньої їх кількості для мережевих функцій, так що їх SLA можна задовольнити навіть у присутності пікового навантаження. В основі будь-якого алгоритму надання ресурсів лежать два питання: скільки ресурсів надавати і коли. Ці питання глибоко досліджуються авторами розділу.

Матеріали 6 розділу підготували Глоба Л.С., Степурін О.В., Гвоздецька Н.А., Прокопеч В.А. У даному розділі запропоновано підхід до підвищення енергоефективності обчислень для серверного кластера як інформаційно-телекомунікаційної одиниці інфраструктури ЦОД, який відрізняється одночасним врахуванням параметрів енергоефективності та продуктивності при розподілі задач. Розроблено алгоритм підвищення енергоефективності обчислень на основі запропонованого підходу, який складається з етапу попередньої індивідуальної атестації серверного кластера та етапу енергоефективного розподілу задач. Врахування індивідуальних залежностей енергоспоживання серверів від їх завантаженості є основною відмінною рисою запропонованого підходу.

Матеріали 7 розділу підготували Глоба Л.С., Прокопеч В.А., Гвоздецька Н.А. У даному розділі проаналізовано ефективність методу динамічного розподілу ресурсів у віртуалізованій мережі мобільного оператора України з використанням механізмів підвищення енергоефективності обробки даних. Основною метою методу динамічного розподілу ресурсів є підтримка обсягу ресурсів, достатнього для виконання вимог SLA (Service Level Agreement – Угода про рівень обслуговування) при уникненні надмірності. Це дозволяє більш ефективно використовувати апаратні ресурси для економії електроенергії та зменшення викидів CO₂. Ефективність методу перевірено для віртуалізованого ядра EPC (Evolved Packet Core) мережі мобільного зв'язку України. Для додаткового підвищення енергоефективності обробки даних у дослідженні застосовано підхід PCPB (Power Consumption and Performance Balance), який запропоновано у розділі 6.

Матеріали 8 розділу підготували Кірюшкін Р.О., Курдеча В.В., Глоба Л.С. У даному розділі проведено огляд основних методів вертикального хендвера та зроблений висновок про неефективність існуючих рішень у бездротових гетерогенних мережах з багатокласовими груповими викликами мобільних вузлів. Описано модифікацію методу вертикального хендвера за рахунок зміни алгоритму прийняття рішень для різних типів викликів мобільного вузла що дозволило підвищити ефективність зв'язку у гетерогенних безпроводових мережах. Розглянуто створену математичну модель алгоритму прийняття рішення, який застосовує методи TOPSIS і MULTIMOORA. Проведено імітаційне моделювання методу прийняття рішення, який базується на запропонованій математичній моделі та доведено його ефективність у гетерогенних бездротових мережах.

4. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ

Безрук В.М., Гальченко К.Р.

Зростаючі обсяги та різноманітність трафіку у мультисервісних мережах зв'язку, а також високі вимоги до якості його передачі визначають необхідність застосування нових підходів до управління мережами зв'язку. При плануванні мереж зв'язку важливими задачами є задачі оптимальної маршрутизації. В даному розділі розглядаються особливості математичного формулювання та вирішення задач оптимальної маршрутизації. Оскільки, як правило, практичні умови роботи мереж зв'язку вимагають врахування декількох показників якості (метрик) при виборі оптимальних маршрутів, тому актуальним являється багатокритеріальний підхід до вирішення задачі оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку. Наводиться приклад вирішення задачі оптимальної маршрутизації з урахуванням сукупності показників якості.

4.1. Особливості задачі оптимальної маршрутизації

Розглянемо деякі особливості задачі оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку [1-3]. Маршрутизацією називається процес визначення шляху при переміщенні інформації по мережі від джерела до одержувача. Розглянемо принципи формування оптимальних маршрутів. Прямим наслідком принципу оптимальності є можливість розглядати множину оптимальних маршрутів від всіх джерел до даних приймачів у вигляді дерева, у корені якого розташовується приймач. Таке дерево називається вхідним деревом. Воно зображено на рис. 4.1. Відстані вимірюються кількістю транзитних ділянок. Звернемо увагу, що вхідне дерево не обов'язково є унікальним. В одній мережі може існувати кілька вхідних дерев з однаковими довжинами маршрутів. Ціль всіх алгоритмів вибору маршрутів полягає в обчисленні й використанні вхідних дерев для всіх маршрутизаторів. Оскільки вхідне дерево не містить петель, то кожен пакет буде доставлений за кінцеве й обмежене число пересилань. На практиці все це не так просто. Лінії зв'язку й маршрутизатори можуть виходити з ладу й знову з'являтися в мережі під час виконання операції, тому в різних маршрутизаторів можуть виявитися різні подання про поточну топологію мережі.

Крім того, ми уникнули питання про те, чи збирає маршрутизатор сам інформацію для обчислення вхідного дерева, або ця інформація збирається іншими засобами. Проте принцип оптимальності й вхідне дерево становлять точку відліку, щодо якої можна вимірювати ефективність різних алгоритмів вибору маршрутів.

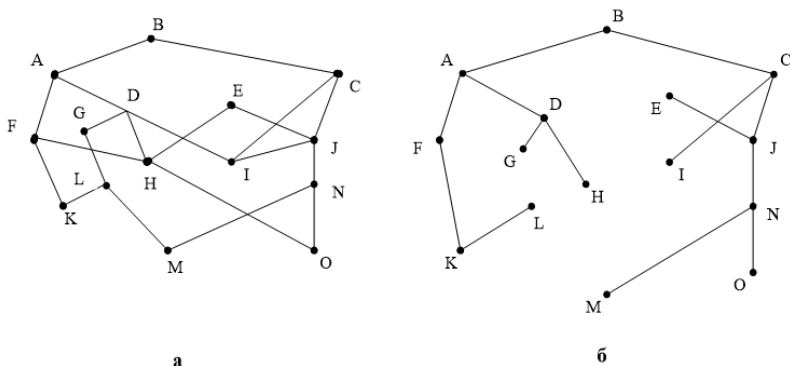


Рис. 4.1. а – підмережа; б – вхідне дерево для маршрутизатора B

Розглянемо особливості постановки задачі оптимальної маршрутизації. У розгалужених комутованих мережах зв'язку між будь-якими двома вузлами мережі (джерелом і адресатом) є, як правило, кілька незалежних шляхів, по яких можуть бути передані повідомлення. Основним завданням маршрутизації є вибір певного шляху із зазначеної множини. Вибір здійснюється за допомогою матриць (таблиць) маршрутів, які зберігаються у кожному вузлі. Матриця маршрутів M_i i -го вузла задає черговість вибору вихідних напрямків при встановленні зв'язку i -го вузла до кожного з інших вузлів мережі. Матрицю M_i можна представити так:

$$M_i = \begin{matrix} & \text{BK}_1 & \text{BK}_2 & \dots & \text{BK}_r & \dots & \text{BK}_N \\ \begin{matrix} \beta_{i1} \\ \beta_{i2} \\ \vdots \\ \beta_{ij} \\ \vdots \\ \beta_{iA} \end{matrix} & \begin{bmatrix} m_{i11} & m_{i12} & \dots & m_{i1r} & \dots & m_{i1N} \\ m_{i21} & m_{i22} & \dots & m_{i2r} & \dots & m_{i2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{ij1} & m_{ij2} & \dots & m_{ijr} & \dots & m_{ijN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{iA1} & m_{iA2} & \dots & m_{iAr} & \dots & m_{iAN} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (4.1)$$

де BK – проміжний вузол (вузол комутації); N – число вузлів (користувачів) мережі, β_{ij} – j -а гілка, що виходить із BK_i , $j = \overline{1, A_i}$, A_i – кількість гілок, що виходять із BK_i , m_{ijr} – елемент, що визначає порядковий номер гілки β_{ij} при виборі шляху передачі інформації від BK_i до BK_r , у випадку простої матриці маршрутів або ймовірність вибору гілки β_{ij} , $\{\sum_{j=1}^{A_i} m_{ijr} = 1, r = \overline{1, N}\}$ у випадку стохастичної матриці маршрутів.

Нехай задана сукупність маршрутних матриць $\{M_i, i = \overline{1, N}\}$. Це означає, що для всієї мережі заданий план розподілу інформації. При статичному плані розподілу інформації здійснюється *статична* (фіксована) маршрутизація в мережі. Однак найбільш ефективне використання ресурсів мережі досягається при *динамічній* (адаптивній) маршрутизації, коли план розподілу інформації змінюється відповідно до перемінних умов роботи мережі (перевантаженнями на

окремих напрямках або ділянках мережі, ушкодженнями каналів або їхніх пучків, ушкодженнями вузлів і ін.). Подібний динамічний розподіл потоків інформації було запропоновано спочатку для телефонних мереж, однак практичне використання воно одержало в обчислювальних мережах. Починаючи з мережі ARPA, адаптивна маршрутизація застосовувалася в тому або іншому ступені практично у всіх створюваних обчислювальних мережах.

Оптимізація маршрутизації може виконуватися як за загальномережними, так і за локальними критеріями. До перших, відносяться середня затримка при передачі повідомлень (пакетів) і середня ймовірність своєчасної доставки в мережах із комутацією пакетів, інтегральні втрати в мережах із комутацією каналів, максимально припустимі значення довжини або вартості шляху й ін. Локальними критеріями можуть бути затримка при передачі між групою (парою) абонентів, ймовірності втрат на окремих напрямках зв'язку й ін.

У загальному випадку вибір критерію оптимальності алгоритму неоднозначний. Перевагу варто віддавати критеріям, пов'язаним з коефіцієнтами використання пропускної здатності каналів зв'язку. Це означає, що оптимальними вважаються такі рішення по маршрутизації або керуванню потоками, які при виконанні вимог до характеристик доставки інформації дозволяють максимально використовувати пропускну здатність трактів мережі, або одержати максимальні значення коефіцієнтів використання пропускної здатності трактів мережі.

Відповідно до критерію оптимальності для кожної гілки, що входить у той або інший маршрут, визначається деяка її вага (вартість). Маршрут з мінімальною або максимальною вагою, що є лінійною сумою ваг гілок, вважається оптимальним за даним критерієм або за найкоротшим шляхом.

Залежно від того, де виконується розрахунок маршрутних матриць і приймається рішення про маршрут для даного вузла, при адаптивній маршрутизації, визначають:

- *централізовану* маршрутизацію, при якій рішення про маршрути приймається в центральному вузлі мережі або мережному маршрутному центрі;
- *розподілену* (децентралізовану) маршрутизацію, при якій кожний вузол-маршрутизатор визначає найкоротші шляхи до всіх інших вузлів-маршрутизаторів мережі, використовуючи певні алгоритми обміну службовою інформацією, що характеризують стан вихідних напрямків вузла;
- *ізолювану* маршрутизацію, коли кожний вузол-маршрутизатор сам ухвалює рішення щодо шляху передачі за індивідуальним критерієм без обміну службовою інформацією із сусідами;
- *змішану* маршрутизацію, що представляє те або інше сполучення централізованої й розподіленої маршрутизації.

Для розрахунку маршрутів при всіх типах маршрутизації застосовуються два основних класи алгоритмів:

- алгоритми визначення найкоротшого шляху, які забезпечують для заданої пари джерело-адресат вибір оптимального за заданим критерієм (найкоротшого шляху);
- алгоритми ймовірнісного (альтернативного) вибору можливих маршрутів для заданої пари джерело-адресат, мінімізуючих (максимізуючих) обраний критерій оптимальності маршрутизації в цілому по мережі з урахуванням середнього навантаження, що надходить у мережу, між всіма парами джерело-адресат. У цьому випадку для заданої пари джерело-адресат визначається множина маршрутів з ймовірностями їхнього вибору.

В алгоритмах визначення найкоротшого шляху використовуються, в основному, два методи рішення: методи нумерації вузлів і гілок і матричні методи. Методи нумерації вузлів і гілок, як правило, є ітераційними й визначають найкоротший шлях від заданого вузла до всіх інших вузлів мережі. Матричні методи дозволяють знайти найкоротші шляхи між всіма вузлами мережі одночасно, використовуючи операції над матрицями ваг гілок мережі. У мережах з пакетною комутацією найбільше застосування одержали ще два методи, що є різновидами таких методів, як метод Форда-Фалкерсона й метод Дейкстри.

Мережа зв'язку може пропустити обмежену величину навантаження. При збільшенні навантаження вище цієї величини відбувається насичення мережі, а це, у свою чергу, може привести до втрати її працездатності. Мова йде про ситуації, коли вхідне навантаження перевищує потенційну продуктивність мережі або зростають транзитні навантаження в проміжних вузлах, також через збільшення вхідного навантаження. Необхідно управляти вхідним навантаженням і підтримувати певне співвідношення між вхідними й транзитними навантаженнями. Таке керування здійснюється за допомогою алгоритмів керування потоками, які повинні:

- запобігти зниженню ефективності мережі через перевантаження;
- виключити можливість втрати працездатності мережі (повного блокування);
- оптимально розподілити ресурси між користувачами;
- забезпечити відповідність між продуктивністю мережі й вхідним навантаженням.

4.2. Формальна постановка задачі оптимізації маршрутизації

Основним завданням маршрутизації є вибір певного шляху з множини дозволених між будь-якими двома вузлами (джерелом і адресатом) за допомогою матриць (таблиць) маршрутів. Матриця маршрутів A_i i -го вузла задає черговість або ймовірності вибору вихідних напрямків при встановленні з'єднань із i -го вузла до кожного (r -го) вузла мережі. Сукупність маршрутних матриць $\{A_i, i = \overline{1, N}\}$ є планом розподілу інформації. Відповідно до критерію оптимальності маршруту для кожної гілки, що входить у різні маршрути, визначається деяка вага. Маршрут з мінімальною (максимальною) сумарною

вагою є оптимальним за даним критерієм. Різні критерії оптимізації породжують різні плани маршрутизації. Аналогічно, використання різних загальномережних і індивідуальних критеріїв оптимізації маршрутизації також приводить до незбіжних рішень. Тому не існує універсальної маршрутизації. Однак загальна постановка завдання оптимізації плану розподілу інформації (маршрутизації) може бути сформульована, якщо не конкретизувати вид критерію. Вона може бути наступною [1]. Нехай заданий граф мережі $G(N, M)$, у якому множина вершин $\{N\}$ відповідає проміжним вузлам із пропускними здатностями $G_i(t)$, $i = \overline{1, N}$, а множина ребер $\{M\} = \{i, j; i = 1, N, j = \overline{1, A_{ij}}, A_i \in \{[1, N - 1], i \neq j \forall i, j\}$ відповідає каналам зв'язку із пропускними здатностями $G_{ij}(t)$, де A_i – кількість ребер (гілок), що виходять із i -го комутаційного (проміжного) вузла.

Оптимізація здійснюється на інтервалі керування T_a . Величина його вибирається таким чином, щоб не було перевищення значення $T_{\text{вим}}$ – інтервалу часу між зафіксованими змінами в мережі (функціональними і структурними), тобто повинне виконуватися умова

$$T_a \leq T_{\text{вим}}. \quad (4.2)$$

Передбачається також, що дотримується ще одна умова, куди входить значення T_a :

$$T_{nci} \ll T_a, \quad (4.3)$$

де T_{nci} – сумарний час передачі контрольної інформації про зміни в мережі, виробітки керуючого впливу (рішення відповідних оптимізаційних завдань) і передачі службової керуючої інформації.

Умова (4.3) дозволяє обґрунтувати вимоги до часових характеристик алгоритмів адаптивної маршрутизації.

Вхідний потік характеризується набором функцій $\lambda_{ir}(t)$, $i, r = \overline{1, N}$. Величина $\lambda_{ir}(t)$ являє собою інтенсивність вхідного потоку у вузлі i , адресованого r -му вузлу.

Врахування умов (4.2) дозволяє виключити час із розгляду й користуватися наступними параметрами:

$$\|C_{ij}(t)\|_{t \in T_a} = C_{1a} = \|C_{ij}\|, \quad (C_i(t))|_{t \in T_a} = C_{2a} = (C_i), \quad (4.4)$$

$$\Lambda_{\text{вх}}(t) = \|\lambda_{ir}(t)\|_{t \in T_a} = \Lambda_{\text{вх}} = \|\lambda_{ir}\|. \quad (4.5)$$

Маршрутні коефіцієнти в матриці маршрутів визначаються як

$$P_{ij} = \{P_{ikj} \geq 0, (i, k, j) \in \{M\}\}_i, \quad (4.6)$$

де P_{ikj} – частина повного потоку $\lambda_{i(j)}$, що направляється по k -й гілці з вузла i , адресованого проміжному вузлу BK_i .

В цьому випадку повинні виконатися умови

$$\sum_{k=1}^{A_i} P_{ikj} = 1, P_{ikj} \geq 0, i, k = \overline{1, N}, j = \overline{1, A_i}. \quad (4.7)$$

Інтенсивності потоків у гілках мережі визначаються так:

$$\lambda_{ik} = \sum_j P_{ikj} \lambda_{i(j)}, i, k = \overline{1, N}, j = \overline{1, A_i}, \quad (4.8)$$

де λ_{ik} – інтенсивність потоку в гілці, що з'єднує вузли BK_i й BK_k .

Інтенсивність повного потоку в BK_i , адресованого BK_{ir} , визначається

як:

$$\lambda_{i(r)} = \lambda_{ir} + \sum_{k=1}^N P_{kir} \lambda_{k(r)}, \quad (4.9)$$

При цьому також виконуються умови

$$\lambda_{ij} < \mu_{ij}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, A_i}, \quad (4.10)$$

де μ_{ij} – інтенсивність обслуговування на гілці ij , що залежить від величин C_{ij} і C_i .

Питання задовільності умовам (4.10) алгоритмічного виду заслуговують окремого розгляду.

Для мереж з маршрутизацією по маршрутним змінним (комутація пакетів – дейтаграмний режим (КП-Д), повідомлень (КП), каналів (КК)) оптимізаційне завдання формулюється так:

$$Q(\Lambda_{вха}, C_{1a}, C_{2a}, P_{ij}) \Rightarrow_{P_{ij}}^{max}, \quad (4.11)$$

умови (4.2) – (4.11) як і раніше включаються у формулювання оптимізаційного завдання, однак вид цільової функції буде іншим:

$$Q(\Lambda_{вха}, C_{1a}, C_{2a}) \Rightarrow_{U_a}^{max}, \quad (4.12)$$

де U_a – функція керування, у випадку коли дозволене використання найкоротших і обхідних маршрутів для частини або для всіх потоків у мережі.

Для реальних мереж з ненадійними каналами й кінцевим часом доведення керуючих впливів до керованих об'єктів у формулювання завдань оптимізації (4.1), (4.2)-(4.11) і (4.12), (4.2)-(4.10) (далі завдань I і II відповідно) необхідно включати ще одну умову:

$$U_a = U_{a \text{ вик}}, \quad (4.13)$$

де $U_{a \text{ вик}}$ – виконаний керуючий вплив.

Якщо при рішенні завдань (I) і (II) умова (4.2) не враховується, тобто вважається, що мережа не змінюється протягом усього періоду розгляду T , то

говорять про статичну маршрутизацію. У загальному ж випадку, при дотриманні умови (4.2) і

$$T = \sum T_a, \quad (4.14)$$

вводять поняття адаптивної маршрутизації.

За певних умов завдання (I) і (II) можуть істотно спрощуватися. Найважливіший зі шляхів спрощення – розбивка вихідного завдання для всієї мережі на сукупність N вузлових завдань, коли кожний вузол ухвалює рішення щодо маршрутизації повідомлень незалежно від інших, тобто може бути побудований розподілений алгоритм маршрутизації. Таке перетворення може бути точним або наближеним. У першому випадку сукупність вузлових рішень забезпечує оптимальний план розподілу потоків у цілому в мережі, у другому мова може йти лише про ступінь близькості до загального оптимального рішення. Точна розбивка можлива при виконанні ряду істотних умов. Насамперед, необхідно, щоб цільова функція була адитивною або мультиплікативною щодо змінних P_{ijr} , тобто повинна являти собою суму або добуток функцій, кожна з яких залежить тільки від своїх вузлових змінних. По-друге, що також обов'язково, змінні P_{ijr} не повинні залежати від r , тобто невідомими повинні бути P_{ij} :

$$P_{ijr} = f_{ij}(\lambda_{ij}) = P_{ij}, \forall i, j, r \in M. \quad (4.15)$$

При цьому обмін службовою інформацією між маршрутизаторами не потрібний, тобто може бути побудований повністю розподілений алгоритм маршрутизації. І, нарешті, вхідний потік також не повинен залежати від Γ , оскільки в протилежному випадку функціонування кожного з вузлів залежить від всіх інших вузлів, і про точну розбивку завдання не може бути й мови. Приклади вузлових завдань розглянуті нижче.

У реальній мережі $P_{ijr} = f(\Lambda_{\Sigma a}), \Lambda_{\Sigma a} = \sum_i \sum_r \lambda_{ir}$. Тому для побудови оптимальної розподіленої маршрутизації, крім виконання інших умов, необхідний обмін службовою інформацією між маршрутизаторами, при цьому принципового значення набуває умова $U_a = U_{a \text{ исп}}$, що може бути виконана при відповідних часових характеристиках алгоритмів адаптивної маршрутизації.

Звідси випливають такі твердження:

1. По цільовій функції $Q(\bullet)$ довільного виду може бути знайдений оптимальний план розподілу інформації (оптимальна маршрутизація) для мережі зв'язку із заданою $\Lambda_{\Sigma a}$ на інтервалі керування T_a , при повному спостереженні мережі й виконанні умови $T_a \geq T_{\text{пці}}$. При цьому якщо мережа спостерегається в одній точці, то буде здійснюватися централізована стратегія маршрутизації; якщо в багатьох точках при обміні службовою керуючою інформацією між ними – децентралізована (розподілена) стратегія маршрутизації.
2. Повністю оптимальна розподілена маршрутизація в мережі, що не потребує обміну службовою інформацією між точками спостереження, може бути здійснена в мережі по цільовій функції $Q(\bullet)$, що є

сепарабельною функцією від змінних маршрутизації в точках спостереження. Крім того, повинні виконуватися сформульовані вище вимоги до P_{ijr} і λ_{ir} . Оскільки в загальному випадку $P_{ijr} = f(\Lambda_{\Sigma})$ для $\forall i, r, j \in M$, то не існує оптимальної розподіленої маршрутизації без обміну службовою інформацією між маршрутизаторами (для існування такої маршрутизації необхідне виконання умов (1.15)).

3. При статичній маршрутизації умова $T_a \geq T_{\text{псі}}$ не враховується, при адаптивній ця умова здобуває визначальне значення.

Завдання знаходження оптимальної статичної маршрутизації збігається із завданням (I) при відсутності умови $T_a \geq T_{\text{псі}}$ й представляє, по суті, завдання розподілу потоків інформації в мережі.

Якщо $P_{ijr} = \begin{cases} 1, & \text{при } j = 1, \\ 0, & \text{при } j \neq 1, \end{cases}$ то при вирішенні завдання (I) буде знайдений розподіл потоків при фіксованій маршрутизації.

Методи рішення завдань (I) і (II) істотно залежать від виду цільової функції $Q(\bullet)$, отже, для мереж з різними видами комутації будуть різні.

Особливістю алгоритмів оптимізації керування складними системами по завданнях (I) і (II) є наявність невизначеності щодо середовища проектування й станів елементів систем. Ця обставина може приводити до помилок у прийнятті рішень, що з'являється при роботі алгоритмів керування. Тому покладаються апіорі справедливими наступні допущення, що дозволяють вважати знайдені керуючі рішення стохастично стійкими:

- вимірювання параметрів мережі зв'язку використовує методи оптимальної організації обробки вимірів параметрів середовища проектування, що дозволяє максимально знизити апіорну невизначеність у їхніх значеннях;
- статистична обробка спостережень дозволяє замінити стохастичне завдання оптимізації детермінованим шляхом заміни компонентів випадкових векторів середовища проектування їхніми математичними очікуваннями;
- для рішення завдань (I) і (II) у необхідних випадках застосовуються відповідні узагальнення цільових функцій і обмежень по простору середовища проектування;
- оптимальне керування в завданнях (I) і (II) можливо визначити, використовуючи допущення про наявність повної інформації про мережу.

Це означає, що за умови виконання вимоги, що час збору й обробки інформації про стан мережі не перевищує величини часу зміни середовища проектування, точність рішення буде залежати від того, наскільки можна вважати виконаним умову про миттєве виконання керуючого впливу ($U_a = U_{a \text{ вик}}$) на інтервалі $T_{a-1} > t$. Інакше кажучи, якщо швидкість передачі службової керуючої інформації висока, і за час передачі керуючого рішення не відбудеться зміни сформованої ситуації в мережі, то можна одержати необхідну точність реального керування. Покладається, що час реакції системи керування такий, що справедливо $U_a = U_{a \text{ вик}}$. Звідси випливає вимога до швидкості передачі службової інформації.

Сформульовані положення можна розглядати як зовнішні вимоги до показників системи вимірювання мережних параметрів й швидкості передачі службової інформації системою керування.

4.3. Складові алгоритмів маршрутизації

Алгоритми маршрутизації розрізняються за декількох ключових характеристиках. По-перше, на характеристики протоколу маршрутизації впливає ціль, яка ставилася розробником алгоритму. По-друге, алгоритми маршрутизації застосовують різні метрики, що впливають на вибір оптимальних маршрутів. Нарешті, різні види алгоритмів по-різному використовують ресурси мережі й маршрутизаторів.

При розробці алгоритмів маршрутизації звичайно ставиться одна або декілька з наступних цілей [1,3]:

- оптимальність;
- простота й мінімальний обсяг службової інформації, що передається;
- надійність і стійкість алгоритму;
- швидка збіжність;
- гнучкість.

Нагадаємо, що під оптимальністю алгоритму маршрутизації будемо розуміти здатність маршрутизатора вибрати кращий маршрут.

Крім того, алгоритми маршрутизації намагаються зробити як можна більш простими. Іншими словами, алгоритм маршрутизації повинен ефективно виконувати свої функції з мінімальними витратами на передавання службової інформації. Ефективність алгоритму особливо важлива в тому випадку, коли реалізуюче його програмне забезпечення працює на комп'ютері з обмеженими фізичними ресурсами.

Алгоритми маршрутизації повинні бути надійними, тобто вони повинні безпомилково працювати в незвичайних або непередбачених умовах, таких як апаратні збої, високе навантаження й неправильна установка. Оскільки маршрутизатори розташовуються у вузлових точках мережі, збій у їхній роботі може привести до серйозних проблем. Найчастіше кращими виявляються ті алгоритми маршрутизації, які витримали перевірку часом і підтвердили свою стабільність у різних умовах роботи мережі.

Крім того, алгоритми маршрутизації повинні швидко збігатися. Під збіжністю розуміється процес узгодження оптимальних маршрутів всіма маршрутизаторами. Коли в мережі відбувається така подія, як вихід з ладу маршрутизатора або, навпаки, початок або поновлення його роботи, інші маршрутизатори поширюють по всіх мережах повідомлення про відновлення маршрутів, внаслідок чого відбувається повторне обчислення оптимальних маршрутів й узгодження їх між всіма маршрутизаторами. Якщо алгоритм маршрутизації повільно сходиться, то це може привести до появи петель маршрутизації або до недоступності частини мережі.

Алгоритми маршрутизації також повинні бути гнучкими, тобто швидко й точно адаптуватися до різних мережних умов. Наприклад, припустимо, що один з мережних сегментів вийшов з ладу. Така проблема враховується в

багатьох алгоритмах маршрутизації. У такій ситуації необхідно швидко вибрати для всіх маршрутів, що зазвичай проходять через цей сегмент, оптимальний обхідний маршрут. Алгоритм маршрутизації повинен по можливості адаптуватися до змін смуги пропускання, довжини черги на маршрутизаторі й мережним затримкам, а також до інших параметрів.

Для визначення оптимального маршруту алгоритми маршрутизації використовують велику кількість різних метрик [2,3]. У складних алгоритмах маршрутизації вибір маршруту здійснюється за декількома метриками, що утворить складну (гібридну) метрику. Метрика являє собою числову характеристику маршруту. Звичайно меншому значенню метрики відповідає кращий маршрут.

Для визначення найкращого маршруту використовують наступні метрики, наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Часто використовувані метрики

№	Тип метрики	Опис
1	Кількість переходів	Кількість маршрутизаторів, які необхідно пройти пакету, щоб досягти пункту призначення. Чим менше, тим краще.
2	Довжина маршруту	Кожному каналу призначається значення, що відображає витрати на передачу. Довжина маршруту представляє сумарну кількість переходів на всіх пройдених ділянках. Чим менше, тим краще.
3	Надійність	Мережними адміністраторами каналам присвоюється рейтинг по надійності, враховуючи ймовірність помилок у каналі (відношення кількості переданих біт до кількості помилок) і швидкість відновлення каналу після збоїв.
4	Затримка	Проміжок часу, необхідний для доставки пакета по мережі від відправника до одержувача. Вимірюється в тактах затримки – кількість імпульсів системних годинників IBM PC (період проходження імпульсів 55мс). Чим менше, тим краще.
5	Смуга пропускання	Характеризує пропускну здатність каналу зв'язку. Чим більше, тим краще.
6	Навантаження	Характеризує ступінь зайнятості мережного ресурсу. Оцінюються інтенсивність використання процесора й кількість оброблюваних у секунду пакетів. Моніторинг параметра вимагає значних ресурсів.
7	Витрати на передачу	Характеризує витрати, пов'язані з орендною платою за використання чужих каналів зв'язку.

При аналізі різних типів метрик, слід відмітити, що величина затримки залежить від багатьох факторів, таких як смуга пропускання проміжних ліній зв'язку, довжина черги на порту кожного маршрутизатора, переповнення на

проміжних лініях зв'язку, а також фізична відстань, яку необхідно пройти. Оскільки затримка є комбінацією декількох важливих параметрів, ця метрика є широко розповсюдженою.

Смуга пропускання характеризує пропускну здатність каналу. За інших рівних умов 10-мегабітовий канал Ethernet переважніше, ніж виділена лінія зі смугою пропускання 64 кбіт/с. Хоча смуга пропускання характеризує максимальну пропускну здатність каналу, маршрути, що проходять по каналах з більшою смугою пропускання, не завжди виявляються краще маршрутів, що проходять по більше повільних лініях. Наприклад, якщо швидкий канал завантажений більше, то для передачі по ньому пакета одержувачеві може знадобитися більше часу, ніж при використанні більш повільного, але менш завантаженого каналу.

При вирішенні задач оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку в ряді випадків доцільно використовувати багатокритеріальний підхід, який буде враховувати декілька показників якості (метрик) при виборі оптимальних маршрутів [4].

4.4 Оптимальна маршрутизація у мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості

Розглянемо приклад вирішення задачі оптимальної маршрутизації у мультисервісній мережі зв'язку [4,5]. Така мережа зв'язку є складною системою з множиною елементів і для забезпечення високої якості обслуговування різних типів трафіку актуальним завданням є оптимальна маршрутизація з урахуванням сукупності показників якості. При цьому виникає необхідність застосування методології багатокритеріальної оптимізації при вирішенні задачі оптимальної маршрутизації у таких мережах зв'язку.

Задача оптимальної маршрутизації з урахуванням сукупності показників якості представляється моделлю $\{X, F\} \rightarrow x^*$, де $X = \{x\}$ – множина припустимих варіантів маршрутизації; $F(\bullet)$ – цільова функція вибору; x^* – оптимальне рішення задачі маршрутизації. Багатокритеріальний підхід вимагає здійснення декомпозиції цільової функції $F(\bullet)$, тобто її еквівалентного представлення за допомогою сукупності окремих цільових функцій вибору $F_v(x)$, $v = 1, \dots, N$.

При цьому може бути сформульована наступна багатокритеріальна задача оптимальної маршрутизації. Задано множину припустимих рішень (маршрутів) на кінцевому графі мережі $G = (V, E)$, де V – множина вузлів, E – множина ліній зв'язку. Припустима множина маршрутів – це ті рішення $x \in X$ у вигляді підграфів $x = (V_x, E_x)$ для графа $G = (V, E)$, які задовольняють обмеження $V_x \in V$, $E_x \in E$. Припускається, що на множині X задана векторна цільова функція $\vec{F}(x) = (F_1(x), \dots, F_v(x), \dots, F_m(x))$, складові якої визначають значення відповідних показників якості маршрутів k_v . Показники якості маршрутів, як правило, пов'язані між собою й є антагоністичними. Потрібно знайти оптимальні за сукупністю показників якості варіанти маршрутів. Розв'язанням такої задачі є підмножина Парето-оптимальних варіантів

маршрутизації, яким відповідає погоджений оптимум окремих цільових функцій $F_1(x), \dots, F_v(x), \dots, F_m(x)$.

Кожний маршрут, визначається відповідними комбінаціями ліній зв'язку $E_x \in E$ і характеризується сукупністю показників якості обслуговування $k_v, v = \overline{1, m}$ та відповідними їм окремими цільовими функціями $F_1(x), \dots, F_v(x), \dots, F_m(x)$.

Вибір оптимальних маршрутів з урахуванням сукупності показників якості складається з виділення підмножини Парето-оптимальних варіантів маршрутизації. Варіант маршруту $\tilde{x} \in X$ є Парето-оптимальним, якщо не існує іншого маршруту $x^* \in X$, для якого виконуються нерівності $F_v(x^*) \leq F_v(\tilde{x}), v = \overline{1, m}$, причому, хоча б одне з них є строгим. При порівнянні маршрутів за цим векторним критерієм переваги з множини допустимих варіантів виключаються безумовно гірші варіанти маршрутів і залишаються незрівняні між собою – Парето-оптимальні варіанти маршрутів.

Зокрема, для знаходження Парето-оптимальних варіантів маршрутизації може бути використаний ваговий метод. Він зводиться до знаходження екстремальних значень скалярної цільової функції маршрутів при різних припустимих комбінаціях значень коефіцієнтів $\lambda_i (\lambda_i > 0, \sum_{i=1}^v \lambda_i = 1)$

$$extr_{var(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_v)}(F_p(x) = \sum_{v=1}^m \lambda_v F_v(x)). \quad (4.17)$$

Розглянуто деякі практичні особливості розв'язання багатокритеріальної задачі маршрутизації на прикладі структури мережі зв'язку (рис. 4.2).

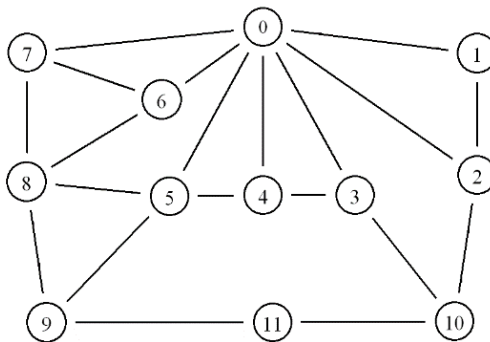


Рис. 4.2. Структура досліджуваної мережі зв'язку.

Інформація передається з вузла 0 в усі інші вузли. Введено такі показники якості ліній зв'язку: час затримки пакетів, рівень втрат пакетів, вартість використання лінії зв'язку. Значення нормованих до максимальних значень показників якості ліній зв'язку наведені в табл. 4.2.

Під час аналізу даної мережі видно, що для кожного вузла призначення існує значна кількість варіантів вибору маршруту. Наприклад, при передачі з вузла 0 у вузол 8 кількість маршрутів становить 22.

Таблиця 4.2. Нормовані значення показників якості ліній зв'язку

Лінія зв'язку	Час затримки передачі	Рівень втрат пакетів	Вартість лінії зв'язку
1	2	3	4
0-1	0.676	1	0.333
0-2	1	0.25	1
0-3	0.362	1	0.333
0-4	0.381	0.25	1
0-5	0.2	1	0.333
0-6	0.19	1	0.333
0-7	0.571	0.25	1
7-6	0.4	0.25	0.333
7-8	0.362	0.25	0.667
8-6	0.314	0.5	0.5
8-5	0.438	0.25	0.333
8-9	0.248	0.5	0.333
9-5	0.257	0.25	1
9-11	0.571	0.25	0.667
11-10	0.762	0.25	0.333
5-4	0.381	0.25	0.667
2-10	0.457	0.25	0.333
3-10	0.79	0.25	0.333
4-3	0.286	0.25	0.333
1-2	0.448	0.25	0.333

Для ілюстрації на рис. 4.2 множина варіантів маршрутів між вузлами 0 і 8 подана у критеріальному просторі оцінок показників якості k_1 й k_2 . Підмножині Парето-оптимальних альтернатив маршрутів, знайдених ваговим методом, відповідає ліва нижня межа, що включає три точки, позначені знаком ▲. Цій підмножині відповідає погоджений за Парето оптимум показників якості, тобто мінімально можливе значення одного з показників якості при зміні значень іншого показника якості.

Знайдені Парето-оптимальні варіанти маршрутів еквівалентні з точки зору безумовного критерію переваги – критерію Парето. Отримана підмножина Парето-оптимальних варіантів маршрутів може бути використана для організації багатошляхової маршрутизації, що використовується, зокрема, у технології MPLS. Такий підхід дозволить реалізувати вирівнювання навантаження й керування трафіком і забезпечить оптимальну якість обслуговування з урахуванням сукупності показників якості.

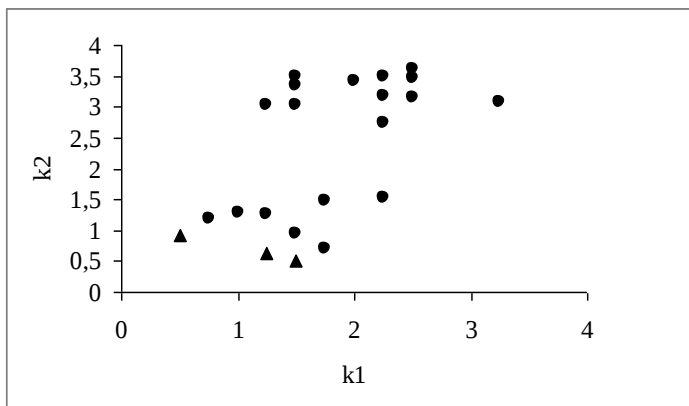


Рис. 4.3. Вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів маршрутів у критеріальному просторі

Висновки

1. Розглянуті особливості формулювання різних типів задачі оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку, зокрема, централізовану, розподілену, ізольовану, статистичну, змішану.

2. Наведені вимоги до характеристик алгоритмів маршрутизації та особливості використовуваних метрик, що визначають структуру різних алгоритмів маршрутизації у мережах зв'язку.

2 Розглянуті теоретичні і практичні особливості вирішення задачі оптимальної маршрутизації у мультисервісній мережі зв'язку з урахуванням сукупності показників якості на основі запропонованої методології багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень.

Література

1. Вишне夫斯基 В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512с.
2. Адамс Б., Ченг Э. Руководство по междоменной многоадресной маршрутизации: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 320с.
3. Астраханцев А.А., Безрук В.М. Маршрутизация в сетях зв'язку. –Харків: СМІТ, 2011. – 367с.
4. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций: Монография. – Харьков: ФОП Коряк С.Ф., 2017. – 268с.