

РОЗДІЛ 1

РОЛЬ І МІСЦЕ МАРШРУТИЗАЦІЇ

В СУЧАСНИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Мета та завдання інфокомунікаційних мереж у сучасному суспільстві

Відповідно до сучасних тенденцій розвитку світової цивілізації технологічною основою інформаційного суспільства має стати глобальна інформаційна інфраструктура – ГІІ (Global Information Infrastructure, GII), яка могла б забезпечити можливість вільного доступу до інформаційних ресурсів кожного жителя планети. У свою чергу, матеріальною й одночасно системоутворювальною основою ГІІ є інфокомунікаційні мережі [62], без яких стає проблематичним широке впровадження досягнень науки та техніки в сфері промислового виробництва, бізнесу, освіти, медицини, культури й оборони країни.

ІКМ настільки інтегровані в ГІІ (рис. 1.1), що в багатьох випадках їх функції не вдається чітко розділити. У зв'язку з цим топологію та завдання ІКМ доцільно розглядати через структуру і функції ГІІ. Така спорідненість відбивається і в термінології, яка використовується у визначенні ГІІ і ІКМ.

Так, наприклад, відповідно до рекомендації Міжнародного союзу телекомунікацій (International Telecommunications Union, ITU-T) Y.100 «General overview of the Global Information Infrastructure standards development» і Y.101 «Global Information Infrastructure terminology: Terms and definitions» термін ГІІ визначено як «сукупність мереж, апаратури кінцевого користувача, інформації та людських ресурсів, яка може бути використана для доступу до корисної інформації, для зв'язку користувачів один з одним, роботи, навчання, отримання розважальної інформації в будь-який час і в будь-якому місці за умови прийнятної вартості за деякою глобальною шкалою».

Результативним кроком у реалізації на практиці ідей концепції глобальної інформаційної інфраструктури слід вважати створення мережі наступного покоління (Next Generation Network, NGN). В основу побудови NGN покладено ідею створення універсальної мережі, яка дозволяє переносити будь-який вид інформації (мова, дані, відео, аудіо, зображення тощо), а також забезпечувати можливість надання найбільш широкого спектра інфокомунікаційних послуг. ITU-T уже почав стандартизацію мереж нового покоління в межах проекту

глобальної інформаційної інфраструктури, що привело до розроблення низки рекомендацій щодо ГП серії Y. В описі функціональної моделі NGN з точки зору функцій регулювання, контролю та передачі слід керуватися також рекомендаціями ITU-T Y.110, X.200, G.805 і G.809. Відповідно до змісту вимог рекомендацій ITU-T Y.100, Y.110, Y.130 і Y.140 або Y.140.1 базовими принципами NGN є такі:

- переважна реалізація режиму комутації пакетів з відділенням одна від одної функцій перенесення інформації та комутації, функцій управління викликом і функцій управління послугами;

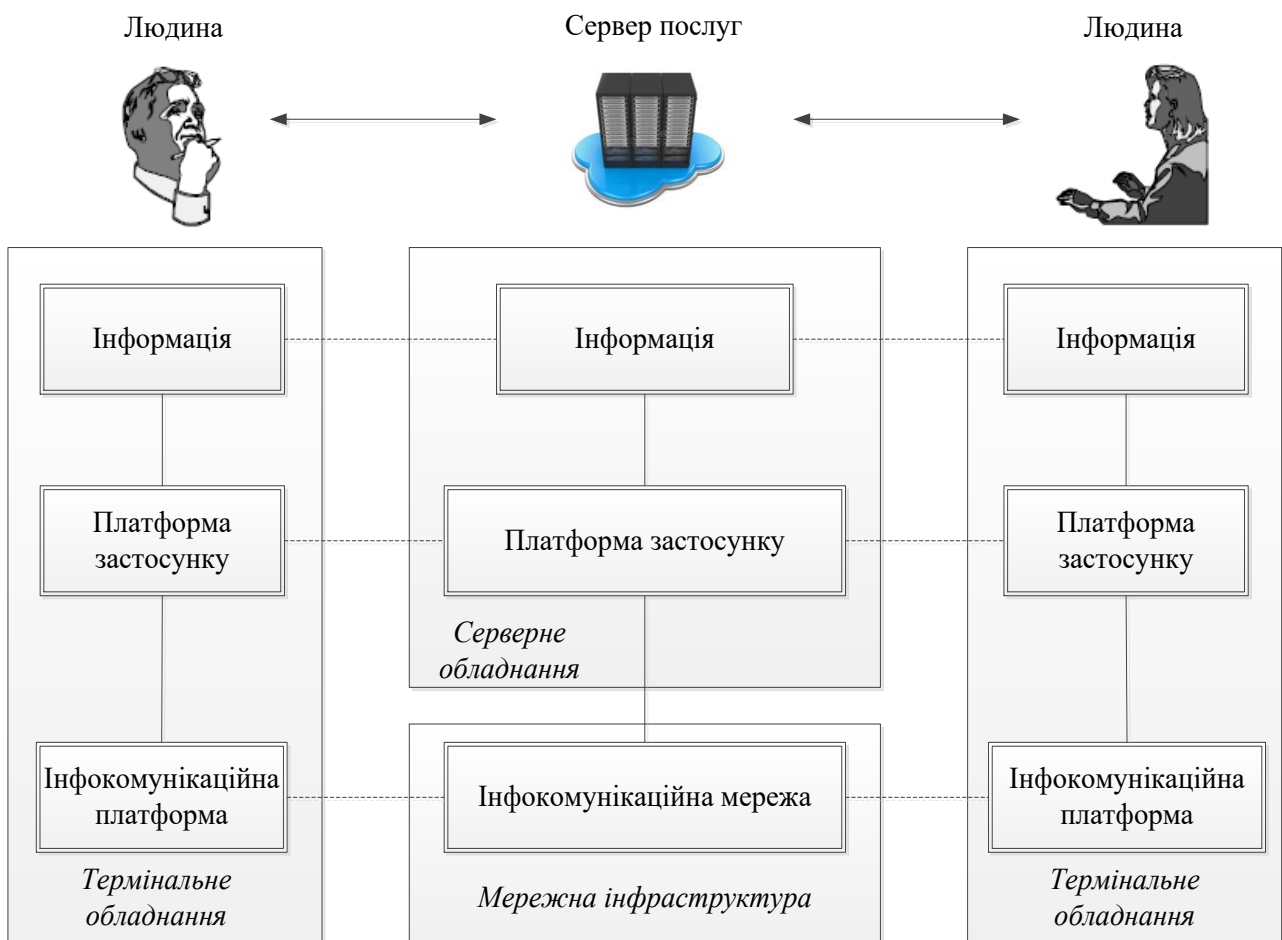


Рис. 1.1. Основні складники ГП (рекомендація ITU-T Y.110)

- взаємодія з наявними мережами зв'язку (телефонні мережі загального користування, мережі передачі даних, мережі рухомого зв'язку) за допомогою відкритих інтерфейсів і шлюзів;

- забезпечення відкритого та вільного доступу до мереж і постачальників послуг, що конкурують;

– підтримка універсальної мобільності, що дозволяє окремим абонентам користуватися й управляти послугами незалежно від технології доступу та типу застосовуваного терміналу;

– забезпечення надання множини інфокомунікаційних послуг (мультисервісу) із заданими показниками якості обслуговування (QoS);

– інтеграція послуг фіксованого та рухомого зв'язку;

– підтримка як вже наявного, так і нового термінального обладнання та пристроїв, зокрема аналогових телефонних апаратів, факсимільних апаратів, обладнання ISDN (Integrated Services Digital Network), стільникових телефонів різних стандартів, терміналів IP-телефонії, кабельних модемів тощо.

Відповідно до особливостей структурної та функціональної побудови NGN належать до складних організаційно-технічних систем, тому для забезпечення максимально можливих показників продуктивності та масштабованості вони будуються за принципами ієрархічності та багаторівневості. З огляду на рекомендації ITU-T у NGN виділяється два основних функціональних рівні – транспорту та послуг. Однак на практиці також застосовується більш детальна архітектура, що розширює тлумачення ITU та складається з чотирьох рівнів (рис. 1.2) [36, 63, 64].

Нульовий рівень – рівень термінальних пристроїв – містить множину терміналів, за допомогою яких користувачі взаємодіють з інфокомунікаційним середовищем, запитуючи та отримуючи ту чи іншу послугу. На першому рівні за допомогою інфокомунікаційних технологій рівня доступу термінали можуть обмінюватися інформацією один з одним напряму або через комутатори локальних мереж (Local Area Network, LAN). Для забезпечення територіально віддаленої інформаційної взаємодії користувачів або звернення до різних серверів послуг використовуються рішення другого рівня – рівня транспорту, основаного на технологіях транспортних мереж IP/MPLS. Саме на рівні транспорту функціонують територіально розподілені мережі (Wide Area Network, WAN), у межах яких здебільшого і визначається рівень якості обслуговування. Технологічні та протокольні засоби третього та четвертого рівнів NGN (рис. 1.2) відповідають за адміністративне управління мережними процесами, пов'язаними з наданням послуг, технічною експлуатацією, ремонтом, адмініструванням та плануванням мережі тощо.

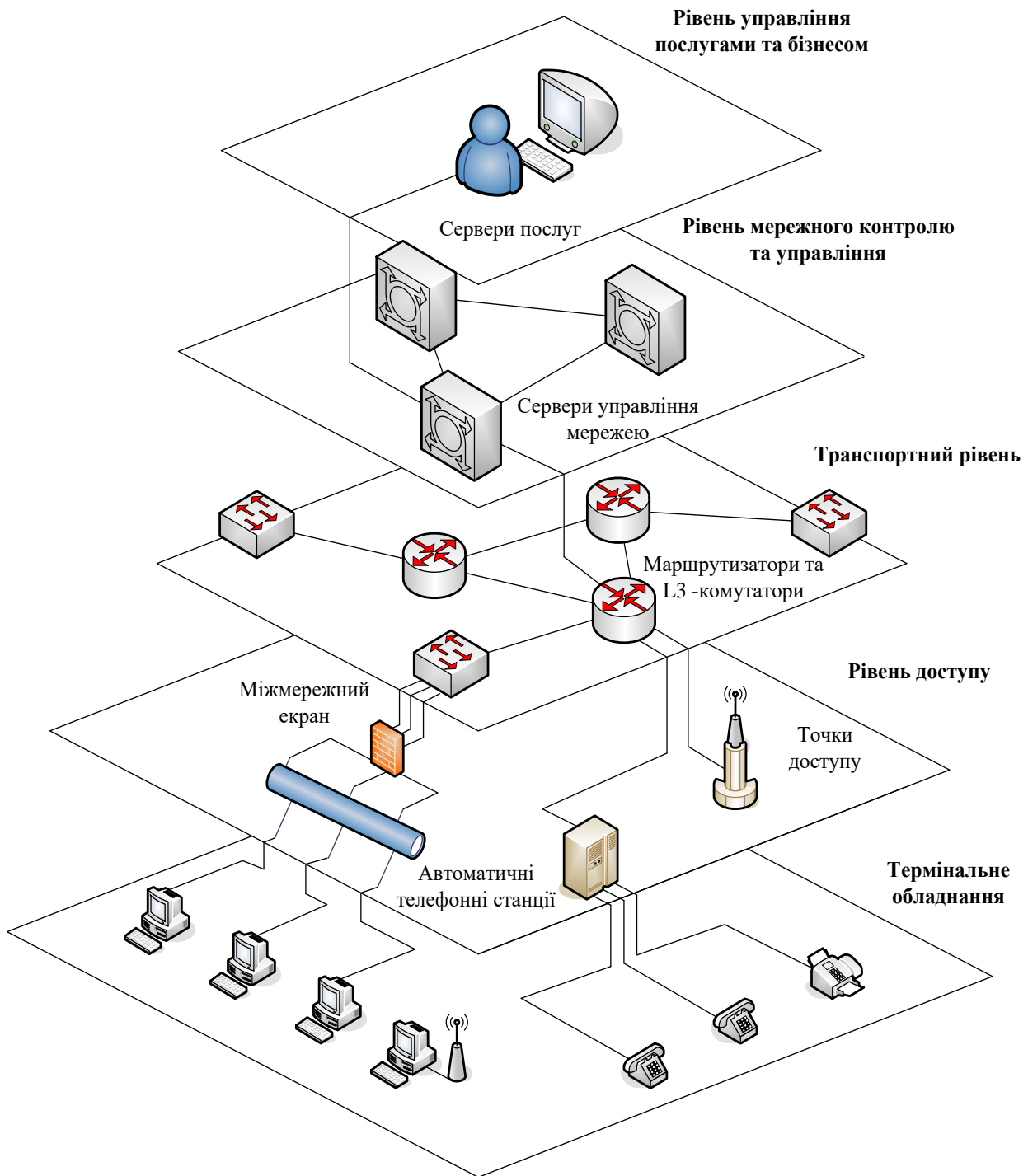


Рис. 1.2. Варіант багаторівневої архітектури NGN

1.2. Огляд технологічних засобів забезпечення якості обслуговування в ІКМ

Основним завданням сучасних ІКМ є надання широкого спектру послуг із забезпеченням необхідного рівня якості обслуговування. У сучасних ІКМ функції щодо забезпечення якості обслуговування реалізуються, як правило,

у межах тієї чи іншої мережної архітектури. До подібного роду архітектур, які застосовуються в IP/MPLS-мережах, належать такі [19–21, 25, 36, 63–65]:

- архітектура інтегрованих послуг (Integrated Services, IntServ), орієнтована насамперед на забезпечення гарантій якості обслуговування;
- архітектура диференційованих послуг (Differentiated Services, DiffServ), основана на пріоритетному обробленні пакетів різних служб і застосунків;
- архітектура MPLS DiffServ Aware Traffic Engineering, заснована на інтеграції DiffServ і концепції Traffic Engineering для MPLS-мереж [66];
- обслуговування «за можливістю» – best effort (BE) services.

Для кількісної оцінки рівня якості обслуговування вводяться числові характеристики, які в подальшому будуть називатися QoS-показниками. Залежно від того, між якими точками мережі вимірюються ці показники, їх поділяють на показники якості обслуговування, що сприймається на рівні користувача (Quality of Experience, QoE), та показники мережної продуктивності (Network Performance, NP), що оцінюються, як правило, на рівні границь транспортної мережі.

Показники мережної продуктивності умовно поділяються на три типи: показники пропускної здатності (швидкісні показники), часові показники та показники надійності. До швидкісних показників належить мінімальна, середня та максимальна швидкість передачі пакетів, часові показники представлені середньою затримкою та джитером (варіацією затримки) пакетів, а показники надійності, як правило, пов'язані з рівнем (імовірністю) втрат пакетів. На числові значення показників QoE, які представлені відповідними оцінками MOS (Mean Opinion Score) [29, 67–69], крім показників мережної продуктивності, також впливають характеристики мереж доступу та термінального обладнання.

Важливо зазначити, що трафік, який циркулює в інтересах того чи іншого мережного застосунку, по-різному чутливий до значень перелічених QoS-показників (табл. 1.1). Проте, як видно з табл. 1.1, для надання більшості послуг необхідно забезпечувати заданий рівень якості обслуговування одночасно за декількома різнотипними QoS-показниками.

Відповідно до змісту рекомендації ITU-T Y.1540 у табл. 1.2 наведені гранично допустимі значення основних QoS-показників, визначених для IP-мереж, залежно від типу використовуваного мережного застосунку. Варто зазначити, що ці QoS-вимоги стали основою для створення восьми класів мережної якості обслуговування (табл. 1.2). Зокрема клас 5, наприклад, не містить жодного граничного значення, що передбачає можливість їх динамічного формування на основі поточного запиту [27, 28].

Таблиця 1.1

Чутливість трафіку різних застосунків до значень QoS-показників

Застосунок	Надійність	Середня затримка	Джитер	Пропускна здатність
Електронна пошта	Висока	Низька	Низька	Низька
Передача файлів	Висока	Низька	Низька	Середня
Web-доступ	Висока	Середня	Низька	Середня
Аудіо за вимогою	Низька	Низька	Низька	Середня
Відео за вимогою	Низька	Низька	Висока	Висока
Телефонія	Низька	Висока	Висока	Низька
Відеоконференція	Низька	Висока	Висока	Висока

Таблиця 1.2

Гранично допустимі значення основних QoS-показників в IP-мережах
(відповідно до рекомендації ITU-T Y.1540)

Класи QoS	Застосунки (приклади)	Показник QoS				
		IPTD	IPDV	IPLR	IPER	IPRR
Клас 0	Застосунки реального часу, чутливі до джитеру, з високою взаємодією (VoIP)	100 мс	50 мс	10^{-3}	10^{-4}	<i>H</i>
Клас 1	Застосунки реального часу, чутливі до джитеру, інтерактивні (VoIP)	400 мс	50 мс	10^{-3}	10^{-4}	<i>H</i>
Клас 2	Дані транзакцій, високоінтерактивні застосунки (сигналізація)	100 мс	<i>H</i>	10^{-3}	10^{-4}	<i>H</i>
Клас 3	Дані транзакцій, інтерактивні застосунки	400 мс	<i>H</i>	10^{-3}	10^{-4}	<i>H</i>
Клас 4	Застосунки з низькими втратами (короткі транзакції, об'ємні дані, потокове відео)	1 с	<i>H</i>	10^{-3}	10^{-4}	<i>H</i>
Клас 5	Традиційні застосунки типових IP-мереж	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>H</i>
Клас 6	—	100 мс	50 мс	10^{-5}	10^{-6}	10^{-6}
Клас 7	—	400 мс	50 мс	10^{-5}	10^{-6}	10^{-6}

IPTD – затримка передачі IP-пакета, яка містить затримки поширення та оброблення в черзі; IPDV – міжкінцева варіація затримки (джитер); IPLR – допустима ймовірність втрат IP-пакетів; IPER – допустима ймовірність прийому пакетів з помилками; IPRR – допустима ймовірність зміни порядку надходження IP-пакетів; *H* – параметр не визначено.

Важливо зазначити, що в табл. 1.2 йдеться про вимоги до міжкінцевих (end-to-end) показників якості обслуговування, значення яких традиційно залежить від ефективності вирішення завдань щодо управління трафіком та розподілу мережного ресурсу. Основні мережні ресурси ІКМ можна класифікувати так [36, 63–65]:

- *канальний ресурс*, до якого насамперед належить пропускна здатність каналів зв'язку мережі;
- *буферний ресурс*, основу якого становить буферна ємність черг на інтерфейсах маршрутизаторів мережі;
- *обчислювальний ресурс* (обчислювальна потужність) мережних вузлів (комутаторів, маршрутизаторів тощо) і серверів послуг;
- *інформаційний ресурс*, до якого належить мережний трафік, що циркулює в ІКМ, зміст баз даних про стан мережі, різномірна керівна інформація, наприклад, маршрутні таблиці;
- *програмний ресурс*, основу якого становлять безпосередньо мережні протоколи та інші програми, що входять до складу спеціального програмного забезпечення мережних вузлів.

З точки зору практики, реалізацією функцій щодо забезпечення якості обслуговування та управління трафіком у процесі розподілу зазначеного вище мережного ресурсу займаються технологічні засоби класифікації та маркування пакетів, управління доступом, профілювання трафіку, механізми управління чергами на маршрутизаторах мережі, а також протоколи маршрутизації, сигналізації та резервування мережних ресурсів.

З огляду на підтримку мультисервісності в ІКМ завдання щодо маркування пакетів пов'язані з призначенням пріоритету пакетів відповідно до запитуваного рівня якості обслуговування. Зокрема значення пріоритету відіграє ключову роль у вирішенні інших важливих завдань управління трафіком. Так, наприклад, в управлінні чергами (з точки зору їх організації, обслуговування та обмеження довжини) пріоритет обслуговування впливає на обсяг виділеного кожній з них канального ресурсу [65]. Для забезпечення гарантій якості обслуговування необхідно задіяти технологічні засоби резервування мережних ресурсів, до основних з яких належать протоколи RSVP (в IP-мережах) і LDP (у MPLS-мережах) [40, 41].

Виходячи з того, що нині особливо затребувані гарантії якості обслуговування «з кінця в кінець» (end-to-end) [24, 25], то ключова роль в управлінні трафіком, звичайно ж, відводиться маршрутизації, що як процес мережного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем (EMBCC)

відповідає за розрахунок і використання одного або множини шляхів від відправника до отримувача пакетів, оптимальних у межах обраних критеріїв (метрик).

1.3. Класифікація маршрутних рішень в ІКМ

На цей час існує досить широка множина маршрутних рішень, які відрізняються принципами роботи, рівнем ефективності та сферою ймовірного використання. Зважаючи на наявність деяких спільних рис у цих рішеннях, у загальному випадку має місце така класифікація маршрутних протоколів та методів (рис. 1.3):

- за рівнем адаптивності маршрутних рішень (частотою оновлення маршрутних таблиць) виокремлюють статичну, квазістатичну та динамічну маршрутизацію;
- за способом збирання інформації про стан мережі – дистанційно-векторну маршрутизацію та маршрутизацію на основі стану каналів (зв'язків);
- за місцем формування маршрутів – маршрутизацію покрокову (hop-by-hop) та «від джерела» (on source);
- за типом використаної маршрутної метрики – маршрутизацію за структурною метрикою та маршрутизацію за функціональною метрикою;
- за кількістю врахованих параметрів мережі – маршрутизацію на основі скалярної, композитної (складної) або векторної метрики;
- за типом врахованих параметрів мережі – маршрутизацію за показниками якості обслуговування та маршрутизацію за показниками мережної безпеки;
- за кількістю отримувачів пакетів – одноадресну, багатоадресну та широкомовну маршрутизацію;
- за кількістю використаних шляхів – одно- та багатошляхову маршрутизацію;
- за способом формування маршрутних таблиць (маршрутів) – централізовану, розподілену та змішану маршрутизацію;
- за способом обчислення шляхів – маршрутизацію з попереднім обчисленням шляхів або без передобчислення маршрутів;
- за рівнем забезпечення відмовостійкості мережі – із захистом та без захисту (резервування) елементів мережі (каналу, вузла, шляху, мережного сегмента) та/або її пропускної здатності.

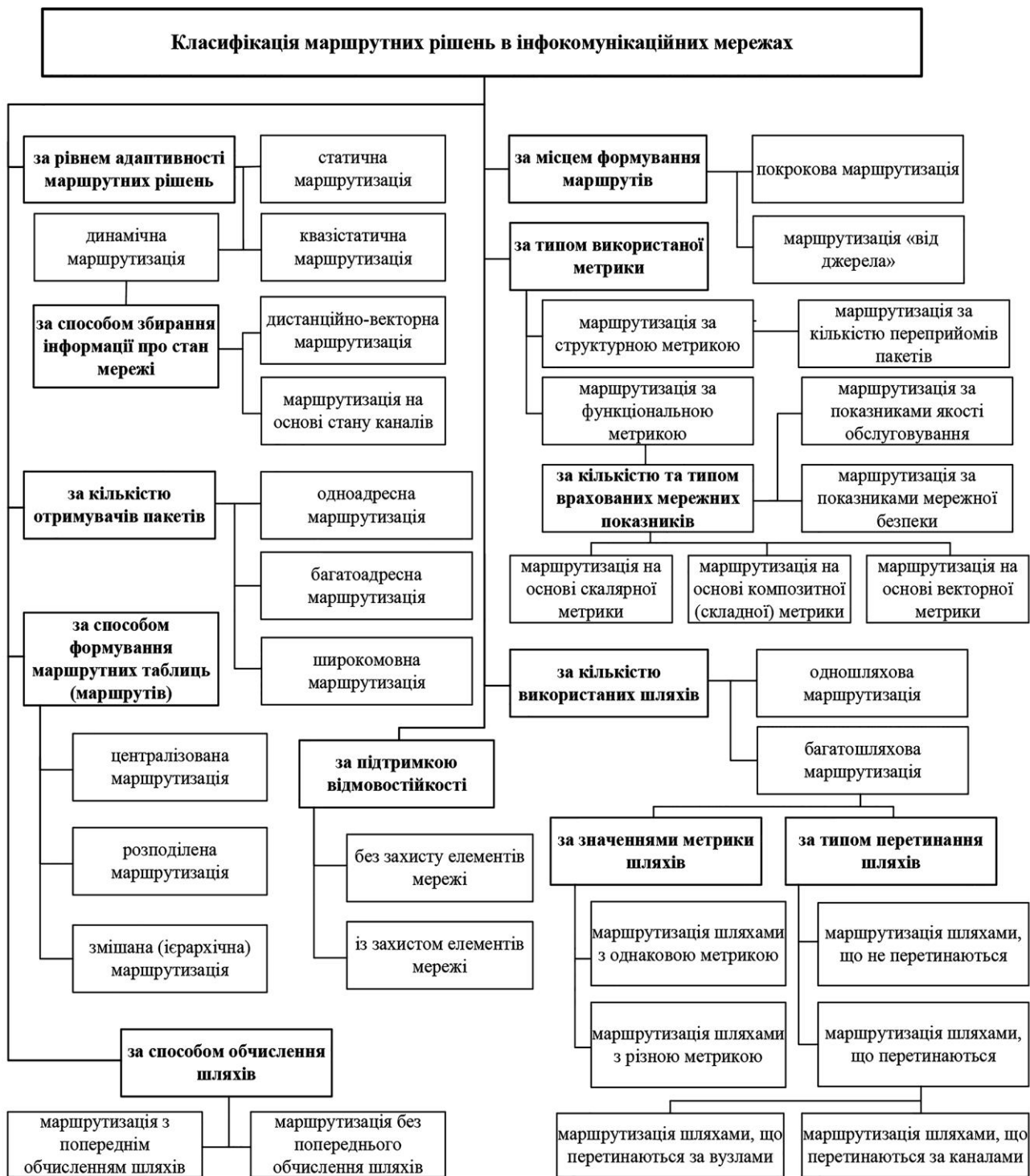


Рис. 1.3. Класифікація маршрутних рішень в ІКМ

За частотою оновлення маршрутних таблиць, спричиненого адаптацією до зміни стану мережі, виокремлюють статичну, квазістатичну та динамічну маршрутизацію. За умови статичної маршрутизації автоматична адаптація маршрутних рішень до зміни як структурних, так і функціональних параметрів ІКМ практично не можлива, оскільки зміст маршрутних таблиць визначається адміністративно та вноситься до маршрутизаторів переважно вручну.

Відсутність необхідності в збиранні інформації про стан мережі призводить до втрати оперативності реакції системи маршрутизації на можливе перевантаження чи вихід з ладу мережного обладнання, проте мінімізує обсяг створеного службового навантаження та не потребує високої обчислювальної потужності маршрутизаторів, оскільки не потрібно перераховувати маршрути. За умови квазістатичної маршрутизації передбачається зміна маршрутів та, відповідно, маршрутних таблиць, але не в реальному часі, а, як правило, також під час адміністративних налаштувань.

У сучасних умовах функціонування ІКМ лише динамічна маршрутизація може забезпечити найбільш високий рівень адаптації маршрутних рішень, які реалізуються за допомогою відповідних протоколів, здатних автоматично збирати та аналізувати інформацію про стан мережі та розраховувати маршрути в реальному часі (десятки секунд). Переважна більшість наявних протоколів динамічної маршрутизації [37, 43], наприклад, IGRP/EIGRP, OSPF, IS-IS, PNNI тощо, здатні адаптуватися до зміни як топологічних параметрів мережі (кількості маршрутизаторів та каналів зв'язку, порядку їх з'єднання), так і функціональних (пропускної здатності каналів зв'язку, затримок та рівня втрат пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів). Протокол маршрутизації RIP під час розрахунку шляхів може враховувати оновлену інформацію лише про топологію ІКМ.

У свою чергу протоколи динамічної маршрутизації умовно поділяються на два класи, що відрізняються за способом збирання інформації про стан ІКМ. Для дистанційно-векторної маршрутизації, відповідно до якої працюють, наприклад, протоколи RIP (Routing Information Protocol), IGRP (Interior Gateway Routing Protocol) та BGP (Border Gateway Protocol), характерно, що в процесі оновлення інформації про стан мережі сусідні маршрутизатори періодично (30–90 с) обмінюються повними копіями своїх маршрутних таблиць. Однак вважається, що більш доцільним є використання протоколів маршрутизації на основі стану каналів [37, 43], за допомогою яких мінімізується обсяг переданої службової інформації про стан ІКМ, тому що на вимогу розсилаються лише зміни у змісті маршрутних таблиць за принципом «кожен з кожним». Це сприяє оперативному формуванню більш адекватної карти мережі на кожному з маршрутизаторів і зниженню ймовірності зациклення пакетів, що характерно для протоколів дистанційно векторної маршрутизації. До маршрутних протоколів стану каналів класу належать OSPF (Open Shortest Path First), IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System) та PNNI (Private Network – to – Network Interface) [37, 43]. Варто зазначити, що в

дистанційно-векторних протоколах маршрутизації для розрахунку шуканого оптимального шляху, як правило, використовується алгоритм Беллмана–Форда, а в протоколах стану каналів – алгоритм Дейкстри. У протоколі EIGRP (Enhanced IGRP), що поєднує в собі принципи як дистанційно-векторної маршрутизації, так і стану каналів, використовується алгоритм DUAL [65].

У сучасних IP-мережах, основаних на дейтаграмному режимі пакетної комутації, використовуються переважно протоколи покрокової маршрутизації. У разі покрокової маршрутизації кожен маршрутизатор ІКМ наділений функціями розрахунку шляху проходження пакетів, тобто шлях, який розрахував приграничний маршрутизатор, може бути змінений (уточнений) кожним наступним транзитним маршрутизатором. Реалізація покрокової маршрутизації сприяє більш ефективній адаптації маршрутних рішень під зміни стану мережі, але в низці випадків може призвести до створення циклів (петель) у маршрутах проходження пакетів. За умови маршрутизації «від джерела», яка переважно використовується в АТМ і MPLS-мережах, орієнтованих на віртуальні з'єднання, функціями формування шляхів наділені лише приграничні маршрутизатори. Тобто всі пакети передаються до маршрутизатора-отримувача пакетів лише тим маршрутом (віртуальним шляхом), який визначив приграничний маршрутизатор. Усі транзитні маршрутизатори тільки проводять комутацію пакетів відповідно до шляхів, розрахованих на приграничних маршрутизаторах. Хоча маршрутизація «від джерела» менш оперативно реагує на зміни в структурі та завантаженості мережі, проте істотно знижує ймовірність зациклення пакетів і спрощує функції щодо контролю за міжкінцевими показниками якості обслуговування.

Залежно від кількості отримувачів пакетів розрізняють одноадресну, багатоадресну та широкомовну маршрутизацію. У разі одноадресної маршрутизації пакети передаються між заданою парою вузлів «джерело–отримувач». На рис. 1.4, а показано приклад одноадресного шляху, коли перший маршрутизатор – відправник, а п'ятий – отримувач пакетів. За умови широкомовної маршрутизації пакети одного і того ж потоку передаються від маршрутизатора-джерела відразу до всіх інших маршрутизаторів мережі (рис. 1.4, б). У випадку багатоадресної маршрутизації пакети передаються одночасно декільком, але, на відміну від широкомовної маршрутизації, не всім маршрутизаторам ІКМ. На рис. 1.4, в продемонстровано приклад багатоадресного шляху від першого маршрутизатора до другого та п'ятого маршрутизаторів ІКМ. На практиці використання того чи іншого виду маршрутизації загалом визначається типом наданої інфокомунікаційної послуги.

Сучасні маршрутні протоколи обирають шлях, оптимальний у межах обраних критеріїв, які в цьому випадку називаються маршрутними метриками. Маршрутні рішення можуть класифікуватися за типом використаної маршрутної метрики, значення якої вздовж обраного шляху має бути мінімальним. У загальному випадку під час маршрутизації може застосовуватися структурна або функціональна метрика. Структурна метрика визначається особливостями топологічної побудови ІКМ. Найпростішим випадком маршрутизації є використання структурної метрики, пов'язаної з мінімізацією кількості переприйомів (hops) пакетів, як, наприклад, реалізовано в протоколі RIP. Застосування функціональної метрики ґрунтується на врахуванні функціональних параметрів елементів мережі. За умови маршрутизації за показниками якості обслуговування (QoS-маршрутизації) метрикою може бути функція від пропускної здатності та завантаженості каналів зв'язку, маршрутизаторів і шляхів загалом, а також від значень затримок і втрат пакетів у них. У разі безпечної маршрутизації метрика має враховувати показники мережної безпеки, наприклад, імовірність компрометації пакета, вузла, каналу та шляху.

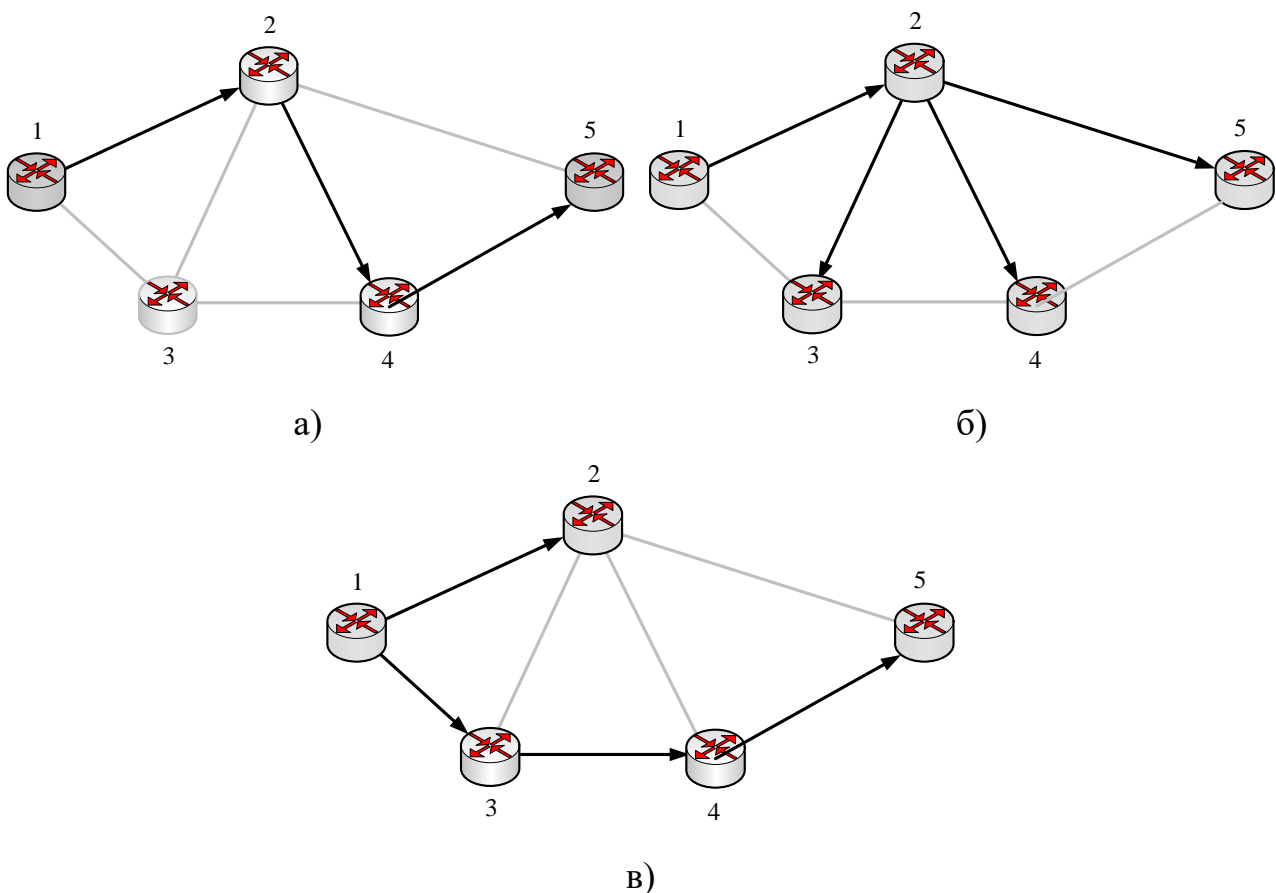


Рис. 1.4. Приклади маршрутизації в мережі:
а – одноадресної; б – широкомовної; в – багатоадресної

За кількістю врахованих параметрів мережі виокремлюють маршрутизацію на основі скалярної, композитної (складної) або векторної метрики. Більшість наявних рішень, представлених протоколами маршрутизації, використовують скалярні метрики. Частіше за все скалярні метрики характеризують функцію від одного з QoS-показників, як, наприклад, у протоколі OSPF, або показника мережної безпеки. Якщо маршрутна метрика є згорткою множини показників, то така метрика називається композитною (складною). Композитна метрика використовується, наприклад, у протоколах IGRP/EIGRP або IS-IS. Проте застосування композитної метрики лише сприяє поліпшенню значень множини QoS-показників, які згортаються, але гарантій щодо числових значень цих показників та їх відповідності встановленим вимогам (табл. 1.2) не надається. Тому більш перспективними є маршрутні рішення, які використовують векторний підхід, коли з кожним каналом та маршрутизатором, а в результаті й маршрутом, пов'язано одночасно декілька метрик (вектор метрик). Це дозволить забезпечити виконання вимог одночасно за множиною QoS-показників та показників мережної безпеки вздовж розрахованого оптимального шляху.

За умови одношляхової маршрутизації всі пакети одного й того ж потоку передаються за одним єдиним маршрутом, що, як правило, визначається на приграничному маршрутизаторі. На рис. 1.5, а подано приклад маршрутизації цього типу, коли між першим та п'ятим маршрутизаторами використовується один шлях: 1→2→5. Однак практично всі наявні протоколи маршрутизації в IP, ATM та MPLS-мережах [37, 43] підсилили свій функціонал з точки зору підтримки функцій балансування навантаження одночасно за множиною шляхів. На маршрутизаторах компанії Cisco навіть у разі статичної маршрутизації підтримується багатошляхова маршрутизація.

Реалізація багатошляхової маршрутизації хоча і призводить до ускладнення процесу розрахунку, але сприяє забезпеченню більш збалансованого навантаження каналів і підвищенню якості обслуговування в ІКМ загалом. Так, на рис. 1.5, б показано приклад багатошляхової маршрутизації, коли між першим та п'ятим маршрутизаторами використовуються вже два шляхи: 1→2→5 та 1→3→4→5.

У свою чергу багатошляхова маршрутизація може бути різних типів. Вона, наприклад, поділяється на маршрутизацію за шляхами з однаковою або різною метрикою. Наприклад, протокол RIP підтримує балансування навантаження за шляхами з однаковою метрикою, а протоколи IGRP та EIGRP – за шляхами з різними значеннями метрики, проте це потребує

додаткових адміністративних налаштувань. Крім того, у випадку багатошляхової маршрутизації використані шляхи можуть перетинатись або не перетинатись. Два шляхи не перетинаються, якщо вони не містять спільних мережних елементів (маршрутизаторів і каналів), крім маршрутизаторів джерела та отримувача пакетів. Наприклад, маршрути $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5$ та $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ (рис. 1.5, б) не перетинаються.

Маршрути, що перетинаються, можуть мати спільні маршрутизатори та (або) канали зв'язку. У першому випадку маршрути перетинаються за вузлами, а в другому – за каналами. Так маршрути $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5$ та $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ (рис. 1.5, в) перетинаються за вузлом, яким є другий маршрутизатор, а маршрути $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5$ та $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ (рис. 1.5, г) перетинаються за каналом, що з'єднує перший та другий маршрутизатори. Як показано на наведених прикладах, маршрути, що перетинаються за каналами, завжди перетинаються і за вузлами, оскільки шляхи $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5$ та $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5$, крім спільного каналу, мають і спільний вузол – другий маршрутизатор.

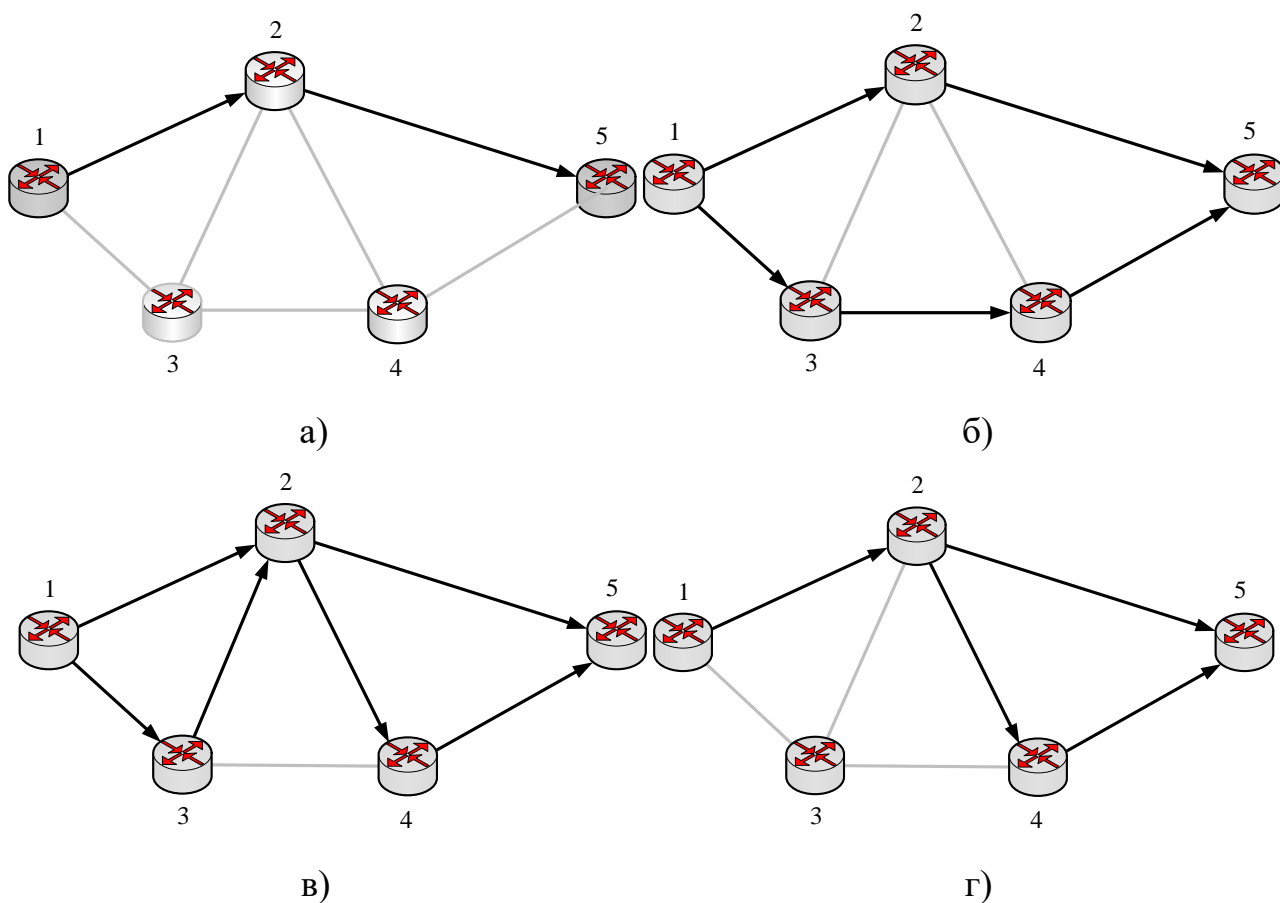


Рис. 1.5. Приклади маршрутизації в мережі:
а – одношляхової; б, в, г – багатошляхової

За способом формування маршрутних таблиць розрізняють централізовану, розподілену (децентралізовану) та змішану маршрутизацію. За умови централізованої маршрутизації за розрахунок маршрутів і формування маршрутних таблиць для всіх вузлів мережі відповідає один центральний маршрутизатор, який ще може називатися сервером або контролером маршрутів (рис. 1.6). Яскравим прикладом централізованої маршрутизації є використання технології SDN, коли вирішення завдань щодо збирання, оброблення інформації про стан мережі та розрахунок маршрутів покладається на контролер мережної операційної системи [39, 45, 50, 54]. Функціональна централізація сприяє підвищенню якості розрахованих маршрутів з точки зору запобігання можливого перевантаження мережі, але негативно впливає на рівень надійності (відмовостійкості) та масштабованості маршрутних рішень в ІКМ великої розмірності, а також сприяє підвищенню вимог до обчислювальної потужності сервера (контролера) маршрутів.

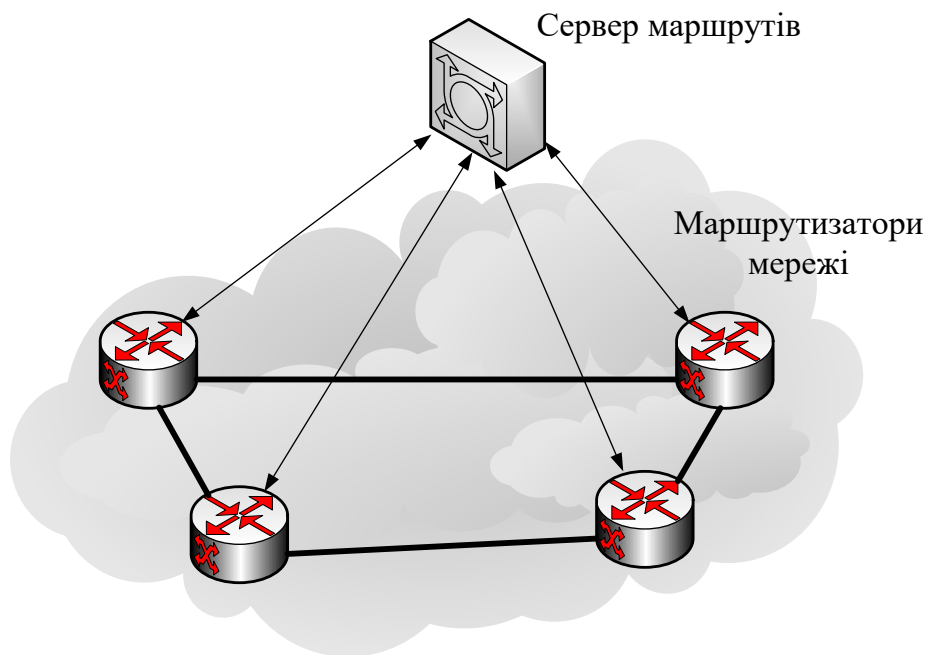


Рис. 1.6. Приклад організації централізованої маршрутизації

У процесі децентралізованої маршрутизації (рис. 1.7) функції визначення маршрутів розподіляються між множиною маршрутних серверів, у ролі яких можуть бути й маршрутизатори ІКМ. В архітектурі SDN, наприклад, кожен із множини маршрутних серверів може відповідати за розрахунок маршрутів в окремих підмережах ІКМ (рис. 1.8). У MPLS-мережі за розрахунок шляхів «з кінця в кінець» (Label Switching Path, LSP) відповідають лише приграничні маршрутизатори (Label Edge Router, LER), а транзитні вузли

(Label Switching Router, LSR) лише пересилають пакети вздовж цих шляхів, не змінюючи їх. Граничним випадком децентралізації подібних рішень є реалізація IP-маршрутизації, під час якої кожен IP-маршрутизатор сам для себе формує маршрутну таблицю.

Децентралізація маршрутних рішень, як правило, сприяє суттєвому підвищенню масштабованості та надійності мережі, проте негативно позначається на рівні якості обслуговування. Так, відсутність координованості в роботі різних приграничних маршрутизаторів LER у MPLS-мережі в процесі розрахунку шляхів може призвести до перевантаження каналного та буферного ресурсу, а у випадку реалізації IP-маршрутизації підвищується ймовірність зациклення пакетів (count to infinity), що спричинить зростання міжкінцевих затримок та ймовірності втрат пакетів.

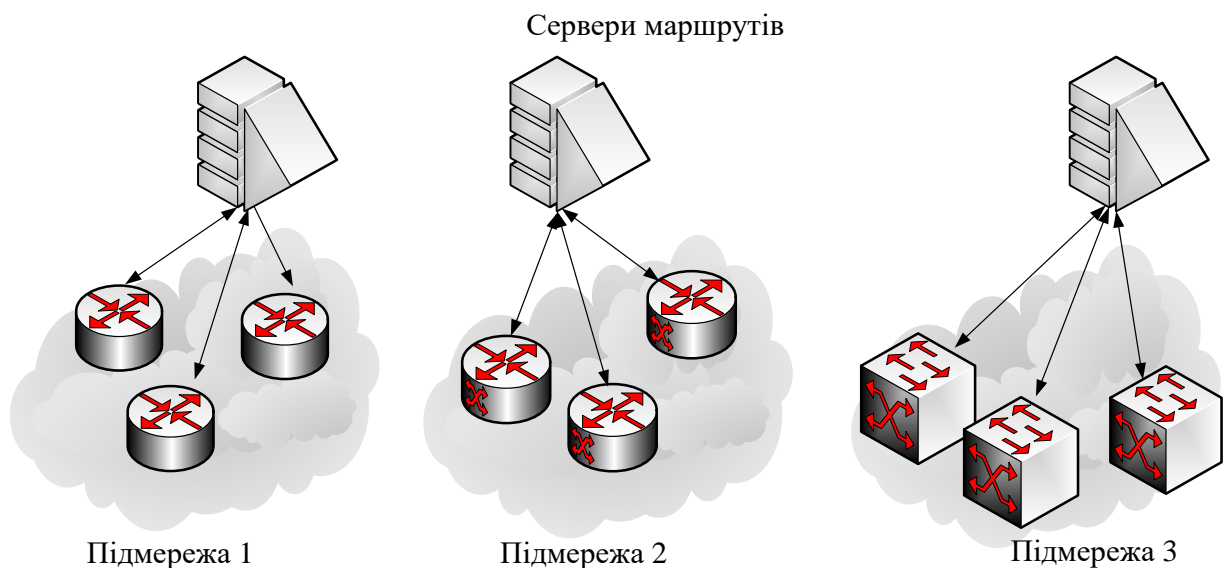


Рис. 1.7. Приклад організації розподіленої (децентралізованої) маршрутизації

Для мінімізації недоліків і реалізації основних переваг централізованої та децентралізованої (розподіленої) маршрутизації на практиці все частіше застосовуються принципи змішаної маршрутизації, що, як правило, матеріалізуються у вигляді протоколів ієрархічної маршрутизації. Для подібних протоколів, до яких належать EGP/BGP, OSPF, IS-IS і PNNI, характерна, по-перше, декомпозиція ІКМ на підмережі, а по-друге, введення структурної та функціональної ієрархії маршрутизаторів, що відповідають за маршрутизацію як безпосередньо всередині підмереж, так і між підмережами (рис. 1.8).

Залежно від типу використаної в мережі інфокомунікаційної технології підмережі можуть називатися автономними системами (Autonomous System, AS), доменами або кластерами.

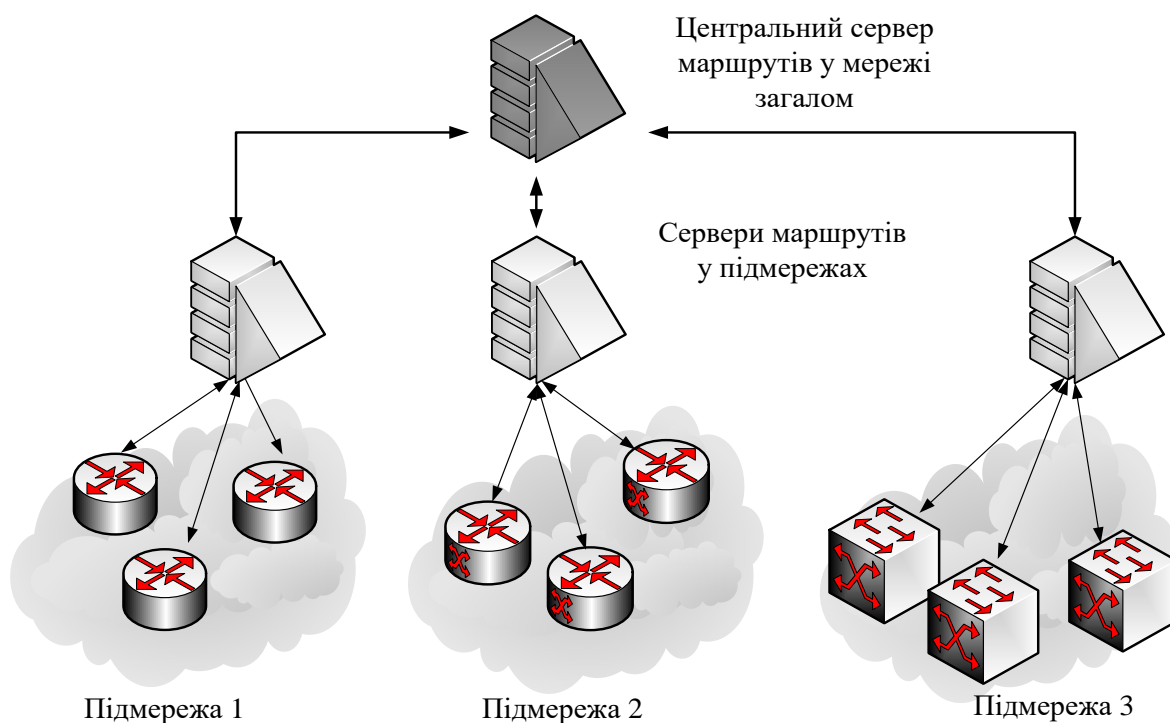


Рис. 1.8. Приклад організації ієрархічної маршрутизації

За способом обчислення шляхів розрізняють маршрутизацію з їх попереднім обчисленням (precomputation routing) і без попереднього визначення маршрутів. У першому випадку на маршрутизаторі шляхи можуть обчислюватися завчасно, тобто до надходження самих пакетів, які потребують маршрутизації. У цьому випадку для пакетів, що надійшли на маршрутизатор, може обиратися вже наявний шлях або шляхи, які відповідають установленим вимогам, зокрема і щодо рівня QoS. У другому випадку необхідний шлях (шляхи) розраховується на маршрутизаторі під потреби конкретного потоку пакетів, які на нього надходять.

Перспективною тенденцією в розвитку маршрутних рішень є забезпечення їх відмовостійкості. Це обумовлено тим, що сучасні протоколи маршрутизації здатні реагувати на зміни в стані мережі протягом десятків секунд, тому що таймер перерахунку маршрутних таблиць міститься в цих межах. Однак в ядрі мережі використовуються гігабітні або навіть терабітні швидкості передачі, тому за умови виходу з ладу або перевантаження елемента мережі перерахунок шляху, елемент якого відмовив, призведе до досить великих втрат пакетів. Тому в межах відмовостійкої маршрутизації

передбачається введення та використання ресурсної надлишковості, коли одночасно з основним розраховується й резервний маршрут (маршрути). Зокрема резервний маршрут не повинен перетинатися з основним за тим елементом мережі (маршрутизатором або каналом зв'язку), який у процесі відмовостійкої маршрутизації підлягає захисту. Реалізація відмовостійкої маршрутизації дозволяє в реальному часі (десятки мілісекунд) реагувати на можливий вихід з ладу мережного обладнання, тоді як у звичайних маршрутних протоколах час реагування відповідає десяткам секунд.

1.4. Вимоги, які висуваються до перспективних маршрутних рішень

Як показав проведений аналіз, до маршрутних рішень, що застосовуються або плануються до використання на практиці, висувається низка системних вимог (рис. 1.9), перелічених нижче.

1. Оптимальність. Протокол маршрутизації має визначити оптимальний, тобто «найкращий» маршрут у межах обраного критерію оптимальності (метрики), що, як правило, пов'язаний з рівнем QoS та ефективністю мережі загалом. Крім того, збіжність до оптимального рішення повинна бути максимально швидкою.

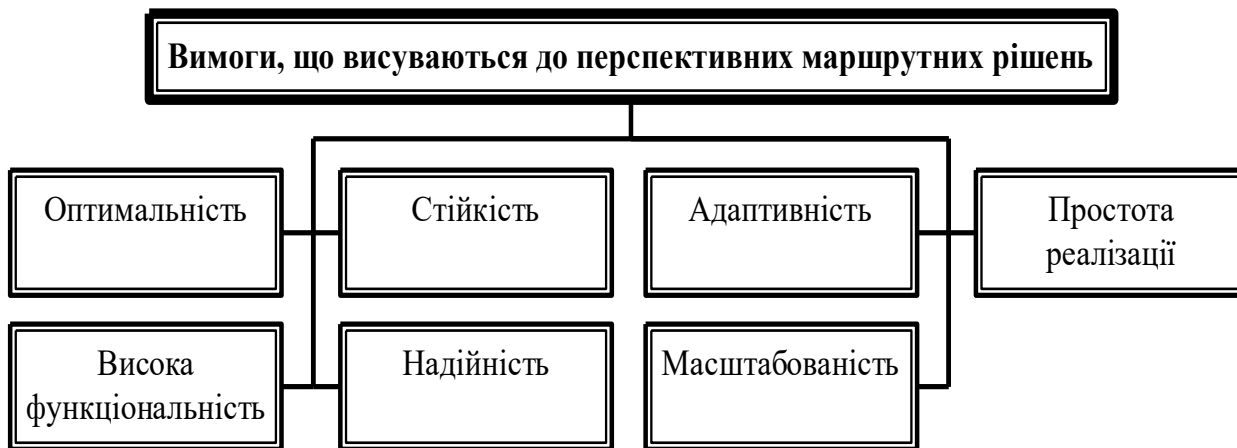


Рис. 1.9. Вимоги, що висуваються до перспективних маршрутних рішень

2. Стійкість. Маршрутне рішення має забезпечувати задану ефективність мережі в умовах невеликих коливань як її внутрішніх параметрів – структурних та (або) функціональних показників, так і характеристик зовнішніх впливів, наприклад, параметрів трафіку, що надходить до ІКМ.

3. Адаптивність. Протокол маршрутизації має оперативно адаптуватися (автоматично переналаштовуватися) до зміни стану мережі – її топології,

пропускної здатності каналів, завантаженості черг маршрутизаторів, характеристик трафіку та QoS-вимог.

4. Надійність. Протокольні рішення повинні гарантувати доступність маршрутів навіть в умовах відмов мережного обладнання, перевантаження, збоїв програмного забезпечення маршрутизаторів тощо.

5. Висока функціональність. У перспективні протокольні рішення мають бути закладені широкі функціональні можливості щодо їхнього налаштування під конкретний тип наданої інфокомунікаційної послуги та стан мережі. Це може проявлятися, наприклад, в обґрунтованому визначенні кількості та типів використаних шляхів і маршрутних метрик.

6. Масштабованість. Під масштабованістю в подальшому буде розумітися властивість маршрутного рішення забезпечувати задану ефективність функціонування мережі в умовах розширення її територіальної розподіленості та переліку наданих послуг, зростання кількості мережних елементів (маршрутизаторів і каналів зв'язку), збільшення загальної кількості користувачів і відповідної кількості й типів потоків пакетів.

7. Простота алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації. Упровадження перспективного маршрутного протоколу не має призводити до створення надто великого обсягу службового трафіку та обчислювального навантаження на процесор маршрутизатора.

Перелічені вимоги мають суперечливий характер, оскільки, наприклад, забезпечення високого рівня функціональності маршрутних рішень обов'язково призведе до ускладнення програмної реалізації того чи іншого маршрутного рішення. У свою чергу розширення переліку структурних і функціональних параметрів, щодо яких здійснюється адаптація процесу маршрутизації, неодмінно викличе зростання обсягу службового навантаження про стан мережі. У зв'язку з цим на теперішній час не існує єдиного універсального маршрутного протоколу, який би повною мірою задовольняв зазначеним вище вимогам. Тому залежно від структури мережі, її завантаженості та рівня QoS-вимог вибір того чи іншого протоколу маршрутизації здійснюється адміністративно.

1.5. Напрями вдосконалення протоколів маршрутизації в ІКМ

У процесі вдосконалення того чи іншого протоколу маршрутизації варто враховувати таку функціональну трирівневу ієрархію маршрутних рішень: модель, метод (алгоритм) і протокол маршрутизації. У цьому випадку основою довільного маршрутного рішення є адекватна математична модель

маршрутизації, яка може бути представлена математичними виразами, наприклад, алгебраїчними [70–73], диференціальними [74–80], інтегральними [80, 81], тензорними [82–85] рівняннями стану мережі. На виході тієї чи іншої математичної моделі, як правило, формулюється оптимізаційна задача щодо розрахунку шляху (шляхів) і балансування навантаження. Для розв’язання поставленої оптимізаційної задачі використовується обґрунтований з точки зору обраного показника ефективності (наприклад, обчислювальної складності) математичний метод (алгоритм). У свою чергу програмна реалізація послідовності дій, визначених у межах обраного математичного методу, є основою відповідного протоколу маршрутизації.

Так, наприклад, якщо математичну модель ІКМ представити зваженим орієнтованим графом, то технологічна задача маршрутизації може бути зведена до оптимізаційної задачі пошуку найкоротшого шляху на графі (рис. 1.10). Для розв’язання цієї задачі можуть бути використані, наприклад, математичні методи (алгоритми) Дейкстри, Беллмана–Форда, Флойда–Уоршелла [36–38]. На практиці алгоритми Дейкстри покладені в основу більшості маршрутних протоколів стану каналів – OSPF, IS-IS, PNNI, а алгоритм Беллмана–Форда застосовується дистанційно-векторними протоколами RIP та IGRP.

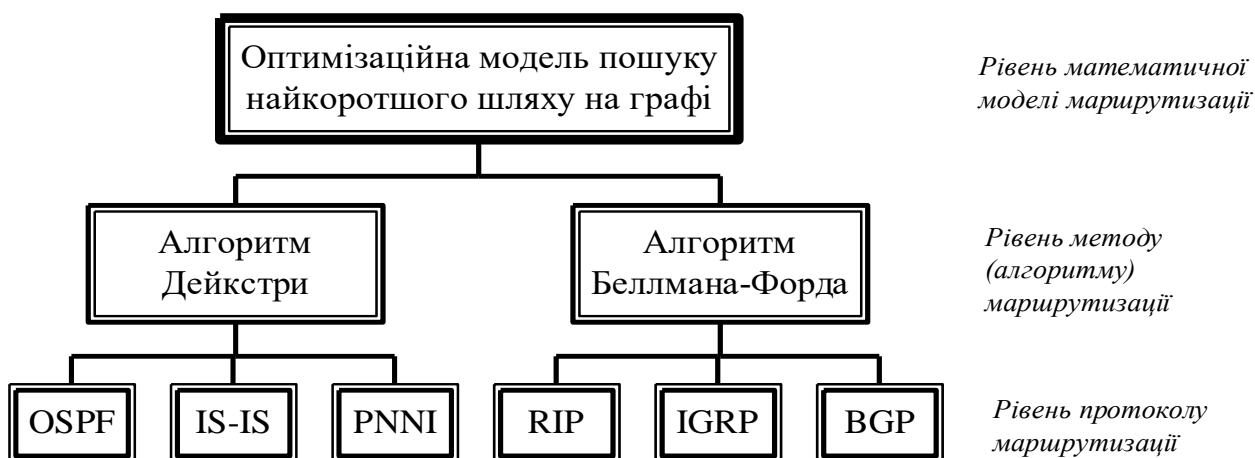


Рис. 1.10. Приклад трирівневої ієрархії маршрутних рішень

Відомі приклади, коли протокол маршрутизації вдосконалювався без перегляду чи модифікації обчислювального методу (алгоритму), на якому він ґрунтувався. Це, як правило, супроводжується зміною версії відповідного протоколу. Так, наприклад, друга версія протоколу RIP відрізняється від першої лише множиною програмних удосконалень, які стосуються зміни порядку розсилань оновлень між маршрутизаторами, підтримки масок змінної довжини тощо. Ключові ж моменти, пов’язані з типом використаної метрики та обраним алгоритмом маршрутизації, у цих версіях залишилися незмінними.

У свою чергу зміна методу (алгоритму) маршрутизації завжди веде до істотної модифікації наявного або навіть створення нового маршрутного протоколу. Так, наприклад, удосконалення протоколу дистанційно-векторної маршрутизації IGRP, яке супроводжувалося зміною алгоритму маршрутизації (з алгоритму Беллмана–Форда на DUAL), привело фактично до створення нового протоколу EIGRP змішаного типу, у якому частина функцій характерна для дистанційно-векторної маршрутизації, а частина – для протоколів стану каналів. Варто зазначити, що найбільш істотне вдосконалення протоколу маршрутизації можливо забезпечити лише на рівні зміни математичної моделі маршрутизації, що призведе також і до обов'язкового перегляду типу використаного методу маршрутизації.

Проте графові моделі та комбінаторні алгоритми пошуку найкоротшого шляху, які покладені в переважну більшість наявних протоколів маршрутизації, не відповідають сучасним вимогам. Це насамперед стосується таких обмежень:

- у формуванні маршрутної метрики переважно враховуються лише номінальні значення параметрів ІКМ, а не реально доступні обсяги мережного ресурсу, наприклад, пропускної здатності каналів зв'язку;

- для розрахунку найкоротшого шляху використовується скалярна метрика, яка, у кращому випадку, є згортою декількох параметрів мережі, функціонально пов'язаних з основними QoS-показниками. Це значно ускладнює забезпечення якості обслуговування одночасно за декількома різнорідними QoS-показниками, що є нагальною вимогою для надання сучасних, насамперед мультимедійних, сервісів;

- під час визначення шуканого маршруту не враховуються характеристики потоків (їхня кількість, інтенсивність, довжина пакетів та ін.), що значно ускладнює подальше балансування навантаження в мережі та в кінцевому випадку може спричинити перевантаження каналів зв'язку. Тому в сучасних ІКМ фактично рішення проблеми перевантаження каналів і мережі загалом перекладається на протоколи транспортного рівня EMBVC.

У зв'язку з цим усе більше уваги науковців різних країн світу приділяється синтезу та дослідженню поточкових моделей і методів маршрутизації, що використовують теорію графів, як правило, на етапі структурного опису ІКМ, а для моделювання безпосередньо процесів маршрутизації та балансування навантаження застосовують той чи інший математичний апарат, який з різним рівнем адекватності здатний урахувати статистичні параметри потоків пакетів, дисципліни їх обслуговування на маршрутизаторах та оптимального розподілу за каналами мережі. Для цього під

час досліджень активно використовується функціонал теорії диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії марковських випадкових процесів і систем (мереж) масового обслуговування (теорії черг), методів фрактального аналізу, теорії оптимального управління та методів дослідження операцій тощо [78–80].

1.6. Узагальнена структура потокової моделі маршрутизації в ІКМ

За результатами проведеного аналізу основних підходів до математичного моделювання маршрутних задач [86–88] була визначена узагальнена структура потокової моделі маршрутизації в ІКМ (рис. 1.11), яка представлена множиною умов 1÷9.

Основою більшості поточкових моделей маршрутизації є умови збереження потоку в мережних вузлах (маршрутизаторах) та в ІКМ загалом (умови першого типу). Зміст цих умов стосується того, що інтенсивність потоку на вході в мережу і на виході з мережі повинна залишатися незмінною. Форма подібних умов багато в чому залежить від типу стратегії маршрутизації – одно- або багатошляхової, одно- або багатоадресної. Умови другого типу, доповнюючи попередні умови, відповідають за забезпечення зв'язності кожного конкретного одно- або багатоадресного маршруту, щоб пакети того чи іншого потоку могли передаватися від маршрутизатора-джерела до маршрутизатора-отримувача (отримувачів).

Для підвищення рівня якості обслуговування в ІКМ, забезпечення керованості процесом боротьби з її перевантаженням та подекуди надання узгодженості вирішень завдань маршрутизації та управління каналним ресурсом маршрутну модель необхідно доповнити умовами відсутності перевантаження каналів зв'язку мережі (умови третього типу). Відсутність у структурі графових моделей маршрутизації подібних умов на практиці нерідко призводило до перевантаження каналів зв'язку, які утворюють так званий «найкоротший шлях» в обраній метриці, що особливо характерно у випадку зростання навантаження на мережу.

Залежно від вимог щодо стратегії маршрутизації, що використовується в ІКМ, модель може містити умови реалізації одно- або багатошляхової маршрутизації пакетів (умови четвертого типу). Окремим випадком є умови реалізації *K*-шляхової стратегії маршрутизації [89], коли кількість використаних шляхів наперед відома та задається у вихідних даних. Проте загальна кількість розрахованих шляхів може визначатися й адаптивно – залежно від навантаження мережі та вимог щодо рівня якості обслуговування.

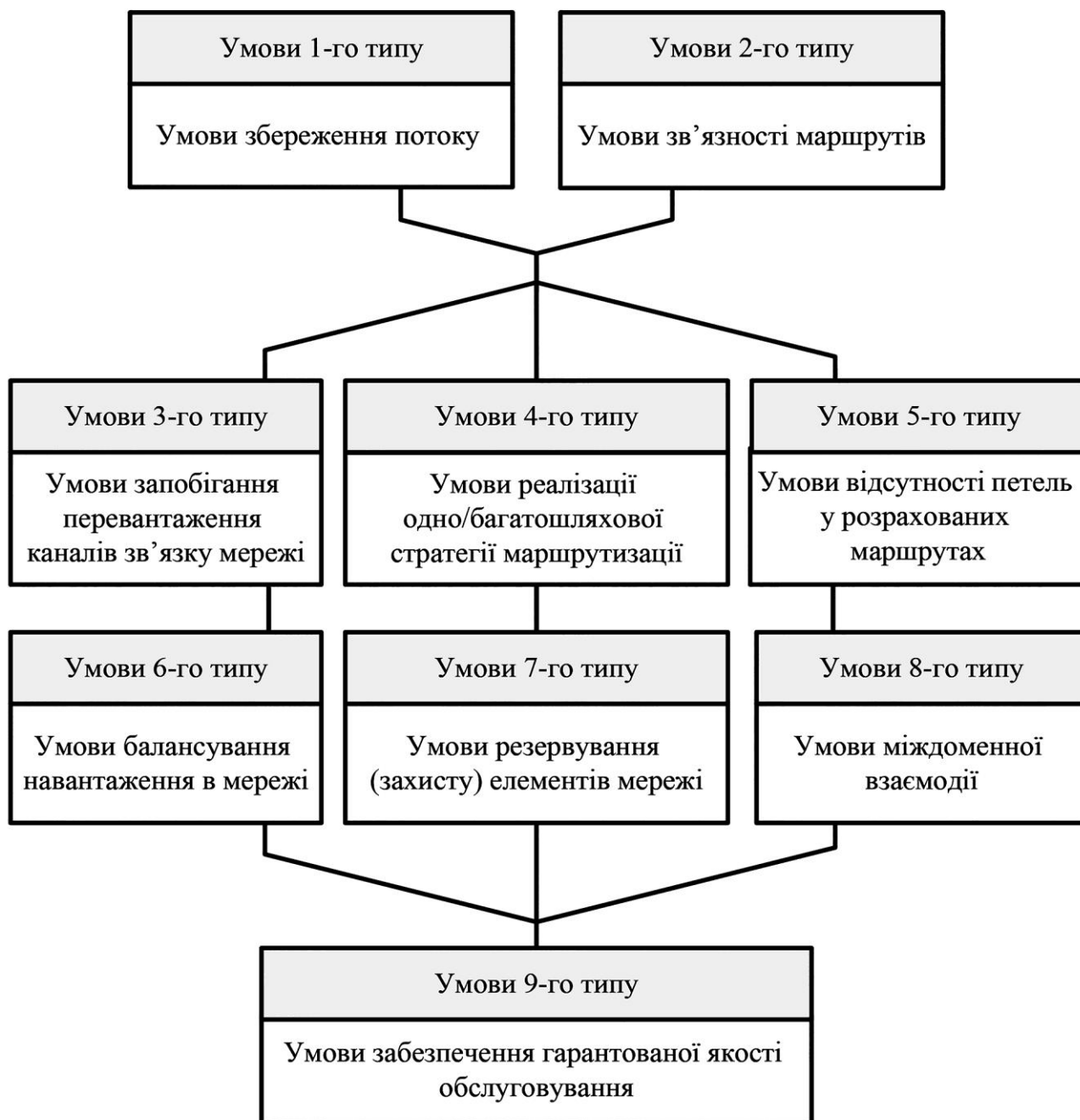


Рис. 1.11. Узагальнена структура потокової моделі маршрутизації в ІКМ

У загальному випадку в потоковій моделі маршрутизації має бути передбачене місце умовам відсутності петель у розрахованих маршрутах (умови п'ятого типу), щоб на протокольному рівні не перекладати функції щодо їх усунення на додаткові засоби боротьби із зацикленням пакетів, основаних, наприклад, на методах «розщеплення горизонту», тимчасової відмови від прийому повідомлень, примусових оголошень або на методі корегування скасування маршруту [65]. Подібні умови можуть задаватися в явній або неявній формі.

Для забезпечення збалансованого завантаження (використання) доступних мережних (буферного та каналного) ресурсів, згідно з вимогами концепції Traffic Engineering, до структури потокової моделі вводяться умови шостого типу. Їх виконання, як правило, також орієнтує на покращення значень основних QoS-показників – середнього затримання пакетів, джитеру, імовірності втрат пакетів та продуктивності ІКМ загалом.

Важливе місце в реалізації відмовостійкої маршрутизації в потоковій моделі займають умови резервування (захисту) елементів мережі та її пропускної здатності (умови сьомого типу). Як правило, виконання цих умов передбачає розрахунок шляхів, що не перетинаються за одним або множиною елементів мережі, які захищаються. Граничним випадком є варіант пошуку маршрутів, що не містять спільних каналів і маршрутизаторів, крім маршрутизаторів відправника та отримувача (отримувачів).

У математичному описі процесів ієрархічної маршрутизації в мультидоменних мережах до структури потокової моделі вводяться умови міждоменної взаємодії (умови восьмого типу), що відповідають за погоджене використання мережного ресурсу, який розміщуються або між сусідніми доменами, або належить одночасно декільком мережним доменам. Так, наприклад, у використанні протоколу маршрутизації OSPF границя між доменами проходить через маршрутизатори, які є спільними для двох сусідніх доменів, а в протоколі IS-IS – через канали зв'язку, що з'єднують приграничні маршрутизатори різних доменів.

Ключове місце в структурі математичної моделі маршрутизації мають умови забезпечення гарантованої якості обслуговування (умови дев'ятого типу), виконання яких дозволяє не тільки покращити той чи інший QoS-показник, але й гарантувати, що числове значення цього показника буде міститися у наперед заданому діапазоні. У процесі досліджень можливі декілька основних варіантів формулювання подібних умов. Ці умови можуть вводитись як для оцінки міжкінцевих QoS-показників для кожного з потоків пакетів окремо, так і для аналізу усереднених значень для мережі загалом. Крім того, умови дев'ятого типу можуть бути сформульовані для кожного окремого QoS-показника, а можуть функціонально пов'язувати між собою декілька основних показників якості обслуговування. Варто зазначити, що в загальному випадку отримання в аналітичному вигляді умов забезпечення гарантованої якості обслуговування одночасно за кількома показниками QoS є досить складною науковою задачею. У відомих рішеннях цієї задачі [82–85] подібні умови вдалося отримати в нелінійному вигляді,

що критично позначається на обчислювальній складності та масштабованості кінцевих рішень.

Запропонований на рис. 1.11 перелік умов у структурі математичної моделі маршрутизації не є вичерпним і може бути доповнений низкою інших умов, пов'язаних, наприклад, з підвищенням стійкості та (або) робастності маршрутних рішень до можливих стохастичних змін структури ІКМ, характеристик мережного трафіку тощо. Наведені умови залежно від особливостей визначення оптимізаційної задачі маршрутизації можуть становити основу як критерію (критеріїв) оптимальності кінцевих рішень, так і обмежень, що накладаються на маршрутні змінні. Відповідно до особливостей постановки задачі маршрутизації та вимог до рівня адекватності їх математичного опису умови 1÷9 приймають форму рівнянь або нерівностей, які у свою чергу можуть бути представлені як лінійними, так і нелінійними виразами. Подібний підхід загалом відповідає змісту концепції маршрутизації на основі обмежень (Constraint-based Routing).

1.7. Опис базових потокових моделей маршрутизації в ІКМ

У цьому підрозділі будуть представлені потокові моделі одноадресної, багатоадресної та ширококомовної маршрутизації в ІКМ, які в наступних розділах роботи використовуватимуться як базові для синтезу нових і вдосконалення наявних моделей і методів відмовостійкої (у другому розділі), безпечної (у третьому розділі) та ієрархічної (у четвертому розділі) маршрутизації.

1.7.1. Потокова модель одноадресної маршрутизації в ІКМ

Нехай структура мережі описується графом $\Gamma = (R, E)$, у якому $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$ – це множина вершин, що моделюють маршрутизатори, а $E = \{E_{i, j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина дуг, що представляють канали зв'язку в ІКМ. Тоді $|E| = n$ визначає кількість каналів зв'язку в ІКМ. Зокрема кожній дузі $E_{i, j} \in E$ поставимо у відповідність її пропускну здатність $\varphi_{i, j}$.

Позначимо через K^o підмножину одноадресних потоків. Тоді, як показано в роботах [70, 71], присвячених моделюванню задач одноадресної маршрутизації, для кожного k -го потоку відомі такі вихідні дані:

λ^k – середня пакетна швидкість (інтенсивність), яка вимірюється в пакетах за секунду ($1/c$);

s_k та d_k – вузол-відправник та вузол-отримувач пакетів k -го одноадресного потоку відповідно.

Тоді порядок одноадресної маршрутизації в мережі визначають маршрутні змінні $x_{i,j}^k$, кожна з яких характеризує долю (частину) k -го потоку, що протікає в каналі зв'язку (КЗ) між i -м та j -м вузлами (маршрутизаторами) мережі. Виходячи з фізичного змісту введених маршрутних змінних, залежно від реалізованої стратегії маршрутизації на них накладаються умови виду

$$x_{i,j}^k \in \{0;1\} \quad (1.1)$$

або

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (1.2)$$

Уведення умов (1.1) відповідає за реалізацію в ІКМ одношляхової стратегії маршрутизації. Для виконання умови (1.2) буде підтримуватися багатошляхова маршрутизація (не забороняючи одночасно використання й одношляхових рішень), за якої змінні $x_{i,j}^k$ можуть приймати крайні зі своїх можливих значень – нуль або одиницю (1.1). Множина застосованих шляхів надалі буде називатися мультишляхом.

Крім того, під час розрахунку маршрутних змінних мають виконуватися умови збереження потоку на маршрутизаторах мережі [70, 71]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 1, k \in K^o, R_i = s_k, \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 0, k \in K^o, R_i \neq s_k, d_k, \\ \sum_{j:E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = -1, k \in K^o, R_i = d_k. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

У разі виконання умов (1.3) гарантується відсутність втрат пакетів на кожному маршрутизаторі та в мережі загалом, а також забезпечується зв'язність розрахованих маршрутів між відправником та отримувачем пакетів k -го потоку.

Для запобігання перевантаження каналів зв'язку ІКМ необхідно забезпечити виконання таких умов [70, 71]:

$$\sum_{k \in K^o} \lambda^k x_{i,j}^k \leq \varphi_{i,j}, \quad E_{i,j} \in E, \quad (1.4)$$

кількість яких відповідає кількості каналів зв'язку в мережі.

1.7.2. Потокова модель багатоадресної та ширококомовної маршрутизації в ІКМ

Позначимо через $K^{\bar{o}}$ підмножину багатоадресних потоків, тоді з кожним k -м багатоадресним потоком також будуть пов'язані параметри λ^k та s_k , а також

$$d_k^* = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^{m_k}\}, \quad (1.5)$$

що є множиною вузлів-отримувачів, де m_k – їхня загальна кількість для k -го багатоадресного потоку. Наприклад, на рис. 1.12 вершиною-відправником s_1 багатоадресного потоку є перша вершина (R_1), а множина $d_1^* = \{d_1^1, d_1^2, d_1^3\}$ представлена вершинами R_5 , R_8 та R_9 .

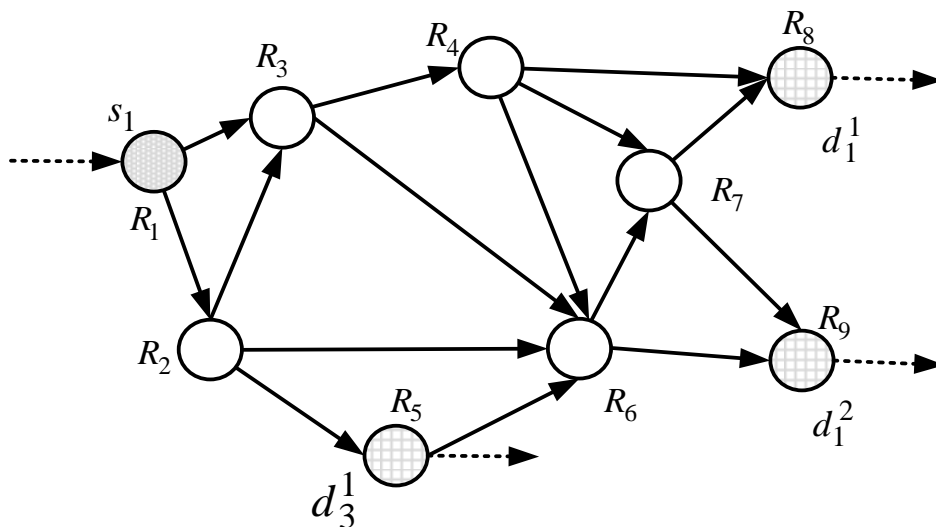


Рис. 1.12. Приклад графового опису вихідних даних для задачі багатоадресної маршрутизації

В описі поточної моделі ширококомовної маршрутизації множина вузлів-отримувачів пакетів дещо розширяється порівняно з (1.5)

$$d_k^{**} = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^{m-1}\}, \quad (1.6)$$

тобто вона містить усі вершини, крім s_k .

Тоді внаслідок розв'язання задачі багатоадресної маршрутизації необхідно розрахувати множину булевих змінних, вид яких збігається з формою (1.1), але за умови $k \in K^{\bar{o}}$. Загальна кількість маршрутних змінних, що відповідають за реалізацію багатоадресної маршрутизації, визначається добутком кількості каналів зв'язку на кількість потоків в ІКМ.

У разі багатоадресної маршрутизації на маршрутні змінні (1.1) накладається низка обмежень, пов'язаних з реалізацією умов збереження потоку в мережі [90–92]:

$$\sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k \geq 1, \text{ якщо } k \in K^{\bar{b}}, R_i = s_k, \quad (1.7)$$

а також

$$\sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k = 1, \text{ якщо } k \in K^{\bar{b}}; R_j \in d_k^*. \quad (1.8)$$

Умова (1.7) вводиться для вузла-відправника, а її виконання орієнтує на те, що від цього вузла потік, який надходить до мережі на обслуговування, буде переданий хоча б одному суміжному вузлу. Умови (1.8) спрямовані на забезпечення доставки пакетів потоку на кожний вузол-отримувач, зокрема відповідно до фізики процесу багатоадресної маршрутизації потік має надходити на ці вузли лише від одного суміжного вузла.

Для кожного транзитного вузла $R_j \in R$, яким може бути довільний маршрутизатор, крім вузла-відправника, додатково вводяться такі умови:

$$\sum_{i: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k \geq x_{j,p}^k \text{ якщо } k \in K^{\bar{b}}; R_j \notin s_k, \quad (1.9)$$

виконання яких робить можливим появу пакетів на будь-якому з вихідних від транзитного вузла інтерфейсів ($E_{j,p} \in E$) лише в тому випадку, коли цей потік надходить на цей вузол хоча б через один вхідний інтерфейс ($E_{i,j} \in E$).

Якщо на структурі мережі можливе утворення контурів (циклів), то в разі виконання умов (1.7)–(1.9) не завжди буде забезпечуватися зв'язність окремих каналів у багатоадресний маршрут. Для запобігання утворенню контурів у модель вводяться умови (за кількістю базисних контурів у мережі) вигляду [90–92]:

$$\sum_{E_{i,j} \in E_{\pi}^q} x_{i,j}^k < |E_{\pi}^q|, \quad (1.10)$$

де E_{π}^q – множина дуг графа, які створюють відповідно до своєї орієнтації q -й контур (π);

$|E_{\pi}^q|$ – потужність множини базисних контурів E_{π}^q , яка дорівнює цикломатичному числу графа $\Gamma = (R, E)$, що описує структуру ІКМ.

Виконання умов (1.10) гарантує, що кількість задіяних у процес багатоадресної маршрутизації дуг, які створюють той чи інший контур, завжди менша від загальної кількості дуг у цьому контурі, тобто розрахований маршрут не містить контурів. Для недопущення перевантаження каналів зв'язку багатоадресними потоками необхідно виконати умови (1.4), але якщо $k \in K^{\bar{o}}$.

Унаслідок розв'язання задачі ширококомовної маршрутизації також необхідно розрахувати множину булевих маршрутних змінних $x_{i,j}^k$ (1.1), на які накладаються обмеження, аналогічні до (1.4), (1.7), (1.8) та (1.10), зі збереженням раніше вкладеного в них фізичного змісту. Водночас варто врахувати, оскільки умова (1.8) стосується всіх вузлів мережі (крім вузла-відправника), тобто $R_j \in d_k^{**}$, то в разі моделювання процесу ширококомовної маршрутизації відсутня необхідність у додатковому введенні умов (1.9), тому що в кожному вузол мережі (1.6) за замовчуванням надходить потік заданої інтенсивності λ^k .

1.7.3. Основні варіанти критеріїв оптимальності маршрутних рішень в ІКМ

Важливо зазначити, що в загальному випадку ІКМ має змішану топологію, яка допускає декілька можливих варіантів розв'язання маршрутних задач. Тому актуальним є вибір найбільш ефективного рішення, оптимального в межах обраного критерію. Вибір критерію оптимальності маршрутних рішень є ключовим моментом у завершенні формалізації моделей як одно-, так і багатоадресної маршрутизації. Від його форми та змісту безпосередньо залежить ефективність організації процесу маршрутизації з точки зору, по-перше, підвищення якості обслуговування за показниками середньої затримки, джитеру та ймовірності втрат пакетів; по-друге, визначення порядку використання та завантаженості каналів мережі в розрахованих маршрутах; і, по-третє, забезпечення збалансованого завантаження каналів і буферних ресурсів мережі. Крім того, традиційно вибір критерію оптимальності має повністю відповідати фізичному змісту розв'язуваної оптимізаційної задачі, меті проведеного дослідження, а також бути достатньо простим для отримання шуканих рішень у числовому вигляді. Для розрахунку оптимальних шляхів як приклад може використовуватися лінійний критерій [86–88]

$$\sum_{k \in K^o \cup K^{\bar{o}}} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k \Rightarrow \min, \quad (1.11)$$

де $c_{i,j}^k$ – маршрутна метрика, яка характеризує структурно-функціональні параметри каналу зв'язку $E_{i,j} \in E$ та кількісно відображає умовну вартість використання даного КЗ. Чим вище числове значення зазначеної метрики, тим нижча ймовірність включення цього каналу в шуканий одноадресний та (або) багатоадресний маршрут.

Наприклад, якщо $c_{i,j}^k = 1$, то оптимальний шлях буде складатися з мінімальної кількості каналів зв'язку. У випадку, коли $c_{i,j}^k = 1/\varphi_{i,j}$, перевага у виборі оптимального шляху (шляхів) буде надаватися каналам з максимальною пропускнуою здатністю.

Використання критерію (1.11) з умовами-обмеженнями (1.1)–(1.4) у разі одноадресної маршрутизації та (1.1), (1.4), (1.7)–(1.10) у випадку багатоадресної маршрутизації дозволяє сформулювати задачу маршрутизації в оптимізаційному вигляді. Лінійність критерію та обмежень дає змогу використовувати для отримання шуканих рішень досить ефективно з обчислювальної точки зору методи лінійного програмування [80]. Окремо варто зауважити, що для розв'язання задачі одношляхової маршрутизації, коли маршрутні змінні мають булевий характер (1.1), оптимізаційна задача набуває форми задачі класу булевого програмування.

У роботах [93, 94] пропонується квадратичний критерій оптимальності, який має такий вигляд

$$\sum_{k \in K^o \cup K^b} \sum_{E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k c_{i,j}^k x_{i,j}^k \Rightarrow \min. \quad (1.12)$$

Його застосування, на відміну від лінійного аналога (1.11), сприяє більш збалансованому використанню каналів зв'язку мережі, хоча й дещо підвищує обчислювальну складність алгоритмічної реалізації маршрутних рішень.

Проте для забезпечення балансування навантаження відповідно до вимог концепції Traffic Engineering, як показано в роботах [70–73], пропонується змінити форму запису умов запобігання перевантаження каналів зв'язку (1.4) на вирази, що мають вигляд:

$$\sum_{k \in K^o} \lambda^k x_{i,j}^k \leq \alpha \varphi_{i,j}, \quad E_{i,j} \in E, \quad (1.13)$$

де α – додатково введена керуюча змінна, яка характеризує верхній динамічно керований поріг завантаженості каналів зв'язку. На неї відповідно до її фізичного змісту накладається таке обмеження:

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (1.14)$$

Для підвищення якості обслуговування в ІКМ цю змінну необхідно мінімізувати, визначаючи тим самим вид критерію оптимальності рішень щодо маршрутизації та балансування навантаження в мережі [70–73]

$$\alpha \rightarrow \min. \quad (1.15)$$

У розв'язанні сформульованої оптимізаційної задачі отримане мінімальне значення змінної α відповідно до умов (1.13) і (1.14) кількісно відповідає коефіцієнту використання найбільш завантаженого каналу. Як показано в роботах [73, 95], незаперечною перевагою моделі (1.13)–(1.15) також є те, що за умови збільшення навантаження на мережу значення змінної α зростає лінійно, сприяючи тим самим прогнозованій (без різких коливань) зміні основних показників якості обслуговування – середньої затримки, джитеру та ймовірності втрат пакетів.

У використанні критерію (1.15) і модифікованих умов запобігання перевантаження (1.13) технологічна задача багатошляхової маршрутизації (1.2) приймає вигляд оптимізаційної задачі лінійного програмування. Але у разі одношляхової (1.1) та багатоадресної/широкомовної маршрутизації оптимізація вже зводиться до розв'язання задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування (Mixed integer linear programming, MILP). Клас оптимізаційної задачі змінився, тому що необхідно розрахувати не тільки множину булевих змінних (1.1), але й одну додатково введену керуючу змінну α , яка є позитивним дійсним числом (1.14). Критерій оптимальності (1.15) та додатково введені обмеження (1.13) і (1.14) мають лінійний характер.

Висновки до першого розділу

1. Як показав проведений у розділі аналіз, ключовою проблемою в сучасних мультисервісних ІКМ, що розвиваються в напрямі створення мереж наступного покоління, є проблема забезпечення якості обслуговування. Зокрема з розширенням переліку наданих інфокомунікаційних послуг, постійним зростанням гетерогенності мереж і різнорідності трафіку, що циркулює в мережі, ця проблема стає все гострішою, потребуючи теоретично обґрунтованого й узгодженого опрацювання множини мережних задач щодо управління трафіком в ІКМ. У зв'язку із затребуваністю якості обслуговування «з кінця в кінець» усе більше уваги приділяється саме протоколам маршрутизації, які, крім того, повинні забезпечувати оптимальність, адаптивність, надійність, стійкість, масштабованість і простоту реалізації маршрутних рішень в ІКМ (рис. 1.9).

2. Установлено, що вдосконалення того чи іншого маршрутного рішення може здійснюватися на рівні протоколу, використаного обчислювального методу (алгоритму) розрахунку або математичної моделі маршрутизації. У цьому випадку найбільш обґрунтоване та ефективне вдосконалення протоколу маршрутизації можна забезпечити лише на рівні заміни математичної моделі або методу маршрутизації. Графові моделі та комбінаторні алгоритми пошуку найкоротшого шляху, які покладені в основу більшості наявних протоколів маршрутизації, мають досить обмежені функціональні можливості щодо одночасного врахування декількох метрик, підтримки балансування навантаження за множиною шляхів тощо. У зв'язку з цим актуальним науковим і прикладним напрямом дослідження є розроблення та вдосконалення потокових моделей і методів маршрутизації, які порівняно з графовими рішеннями більш повно враховують як топологічні параметри мережі, так і характеристики потоків – їхню інтенсивність, нестационарність, довжину пакета тощо.

3. Для реалізації принципів системного підходу під час синтезу нових або вдосконалення наявних маршрутних рішень на рівні математичної моделі запропонована їй узагальнена структура (рис. 1.11). Структура потокової моделі маршрутизації представлена системою умов, що враховують як особливості структурно-функціональної побудови самої ІКМ, так і ключові аспекти та атрибути стратегій маршрутизації, які описуються за допомогою цієї моделі. Подібна система умов, які становлять основу обраної потокової моделі, повністю визначає фізичний зміст і математичну форму оптимізаційної задачі щодо маршрутизації в ІКМ як на рівні виду використаного критерію оптимальності маршрутних рішень, так і типу врахованих обмежень на керуючі (маршрутні) змінні.

4. Відповідно до описаної узагальненої структури потокової моделі маршрутизації у розділі представлені базові математичні моделі одноадресної, багатоадресної та ширококомовної маршрутизації в ІКМ, які в наступних розділах роботи використовуватимуться як основа для синтезу нових і вдосконалення наявних моделей і методів відмовостійкої (у другому розділі), безпечної (у третьому розділі) та ієрархічної (у четвертому розділі) маршрутизації.

Перелік джерел посилання до вступу та першого розділу

1. ITU-T Rec. Y.3001. Future Network Vision: Objectives and Design Goals. May 2011. 26 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3001-201105-I>.

2. ITU-T Rec. Y.3031. Identification framework in future networks. May 2012. 24 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3031-201205-I/en>.
3. ITU-T Rec. Y.3015. Functional architecture of network virtualization for future networks. April 2016. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3015-201604-I/en>.
4. Hutchison D., Galis A., Gavras, A. The Future Internet-LNCS 7858. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013. 401 p. DOI: 10.1007/978-3-642-38082-2.
5. ETSI TS 103 195-2 V1.1.1. Autonomic network engineering for the self-managing Future Internet (AFI); Generic Autonomic Network Architecture; Part 2: An Architectural Reference Model for Autonomic Networking, Cognitive Networking and Self-Management. May 2018. 149 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103100_103199/10319502/01.01.01_60/ts_10319502v010101p.pdf.
6. ETSI TS 103 194 V1.1.1. Network Technologies (NTECH); Autonomic network engineering for the self-managing Future Internet (AFI); Scenarios, Use Cases and Requirements for Autonomic/Self-Managing Future Internet. October 2014. 67 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103100_103199/103194/01.01.01_60/ts_103194v010101p.pdf.
7. Про телекомунікації: Закон України від 18.11.2003 № 1280-IV. Відомості Верховної Ради України. 2004. № 12. Ст. 155.
8. Про інформацію: Закон України від 02.10.1992 № 2657-XII. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 48. Ст. 650.
9. Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: Закон України від 05.07.1994. № 80/94-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1994. № 31. Ст. 286.
10. Про схвалення Концепції розвитку телекомунікацій в Україні: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07.06.2006 № 316-р. Дата оновлення: 27.12.2008. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/316-2006-%D1%80/page> (дата звернення: 14.03.2018).
11. Про схвалення Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.05.2013 № 386-р. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/386-2013-%D1%80> (дата звернення: 14.03.2018).
12. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.01.2018 № 67-р. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80> (дата звернення: 14.03.2018).
13. Про Рекомендації парламентських слухань на тему: «Реформи галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвиток інформаційного простору

України»: Постанова Верховної Ради України від 31.03.2016 № 1073-VIII. Відомості Верховної Ради. 2016. № 17. Ст. 191.

14. ITU-T Rec. Y.3051. The basic principles of trusted environment in information and communication technology infrastructure. March 2017. 16 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3051-201703-I/en>.

15. Chaparadza R., Wodczak M., Meriem T.B., De Lutiis P., Tcholtchev N., Ciavaglia L. Standardization of resilience & survivability, and autonomic fault-management, in evolving and future networks: an ongoing initiative recently launched in ETSI. Design of Reliable Communication Networks (DRCN) 2013: Proceedings of the 9th International Conference. Budapest, Hungary, 4–7 March, 2013. IEEE, 2013. P. 331–341.

16. ITU-T Rec. Y. 2614. Network reliability in public telecommunication data networks. August 2008. 20 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2614-201108-I/en>.

17. ITU-T Rec. Y.2701. Security requirements for NGN release 1. April 2007. 44 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2701-200704-I/en>.

18. ITU-T Rec. Y.2704. Security mechanisms and procedures for NGN. January 2010. 58 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2704-201001-I/en>.

19. ITU-T Rec. Y.2705. Minimum security requirements for the interconnection of the Emergency Telecommunications Service (ETS). March 2013. 24 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2705-201303-I/en>.

20. ITU-T Rec. E.800. Definition of terms related to Quality of Service. September 2008. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>.

21. ITU-T Rec. G.1000. Communications Quality of Service: A framework and definitions. January 2001. 16 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1000-200111-I/en>.

22. ITU-T Rec. E.802. Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters. February 2007. 38 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.802-200702-I>.

23. ITU-T Rec. E.860. Framework of a service level agreement. June 2002. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.860-200206-I/en>.

24. ITU-T Rec. Y.1542. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. June 2010. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1542-201006-I/en>.

25. ITU-T Rec. Y.1291. An architectural framework for support of Quality of Service in packet networks. May 2004. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1291-200405-I/en>.

26. ITU-T Rec. E.803. Quality of service parameters for supporting service aspects. December 2011. 52 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.803-201112-I/en>.
27. ITU-T Rec. Y.1540. Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters. July 2016. 57 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1540-201607-I/en>.
28. ITU-T Rec. Y.1541. Network performance objective for IP-based services. December 2011. 66 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I/en>.
29. ITU-T Rec. G.1011. Reference guide to quality of experience assessment methodologies. July 2016. 26 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1011-201607-I/en>.
30. ITU-T Rec. E.804. Quality of service aspects for popular services in mobile networks. February 2014. 446 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.804-201402-I/en>.
31. ITU-T Rec. 1545.1. Framework for Monitoring the Quality of Service of Internet Protocol network services. March 2017. 24 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1545.1-201703-I/en>.
32. Cholda P., Tapolcai J., Cinkler T., Wajda K., Jajszczyk A. Quality of resilience as a network reliability characterization tool. *IEEE network*. 2009. Vol. 23, No. 2. P. 11–19. DOI: 10.1109/MNET.2009.4804331.
33. Tipper D. Resilient network design: challenges and future directions. *Telecommunication Systems*. 2014. Vol. 56, No. 1. P. 5–16. DOI: 10.1007/s11235-013-9815-x.
34. Rak J. *Resilient Routing in Communication Networks (Computer Communications and Networks)*, 1st edition. Springer, 2015. 181 p.
35. Mauthe A., Hutchison D., Cetinkaya E.K., Ganchev I., Rak J., Sterbenz J.P., Gunkelk M., Smith P., Gomes T. Disaster-resilient communication networks: Principles and best practices. *Resilient Networks Design and Modeling (RNDM) 2016: Proceedings of the 8th International Workshop*. Halmstad, Sweden, 13–15 September, 2016. IEEE, 2016. P. 1–10. DOI: 10.1109/RNDM.2016.7608262.
36. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура та основні функції / В.В. Поповський та ін. Вид. 2-ге, випр. та допов. Харків: СМІТ. 2018. Т. 1. URL: <http://www.znanius.com/3534.html>.
37. Medhi D., Ramasamy K. *Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures (The Morgan Kaufmann Series in Networking)* 2nd Edition. Cambridge, MA, USA: Elsevier Inc., 2018. 1018 p.
38. Misra S., Goswami S. *Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies* 1st Edition. Wiley, 2017. 536 p.

39. White R., Tantsura J.E. Navigating Network Complexity: Next-generation routing with SDN, service virtualization, and service chaining. AddisonWesley Professional, 2015. 320 p.
40. Barreiros M., Lundqvist P. QoS-Enabled Networks: Tools and Foundations. 2nd Edition. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley, 2016. 254 p.
41. Szigeti T., Hattingh C., Barton R., Briley K. End-to-End QoS Network Design: Quality of Service for Rich-Media & Cloud Networks. 2nd Edition. Cisco Press, 2013. 1040 p.
42. Tiso J., Teare D. Designing Cisco Network Service Architectures (ARCH): Foundation Learning Guide. Cisco press. 2011. 733 p.
43. Cisco Networking Academy (Ed.). Routing Protocols Companion Guide. Pearson Education. 2014. 792 p.
44. ITU-T Rec. Y.3071. Data aware networking (information centric networking) – Requirements and capabilities. March 2017. 18 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3071-201703-I/en>.
45. ITU-T Rec. Y.3300. Framework of software-defined networking. June 2014. 22 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3300-201406-I/en>.
46. ITU-T Rec. Y.2720. NGN identity management framework. January 2009. 34 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2720-200901-I>.
47. ITU-T Rec. Y.2770. Requirements for deep packet inspection in next generation networks. December 2012. 38 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2770-201211-I/en>.
48. Quality of service regulation manual. 2017. ITU. 176 p. URL: https://www.itu.int/pub/D-PREF-BB.QOS_REG01-2017.
49. Barona López L.I., Valdivieso Caraguay Á.L., Sotelo Monge M.A., García Villalba L.J. Key technologies in the context of future networks: operational and management requirements. Future Internet. 2017. Vol. 9, No. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi9010001>.
50. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. 1st Edition. Pearson Education Inc., 2016. 510 p.
51. Monge A.S., Szarkowicz K.G. MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services. 1st ed. O'Reilly Media, 2016. 920 p.
52. Schneier B. Data and Goliath: The hidden battles to collect your data and control your world. WW Norton & Company, 2015. 398 p.
53. Stallings W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice. 7th Edition. Pearson, 2016. 768 p.

54. Xia W., Wen Y., Foh C.H., Niyato D., Xie H. A survey on software-defined networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17, No. 1. P. 27-51. DOI: 10.1109/COMST.2014.2330903.
55. Björck F., Henkel M., Stirna J., Zdravkovic J. Cyber resilience-fundamentals for a definition. *New Contributions in Information Systems and Technologies*. 2015. Vol. 353. Springer, Cham. P. 311–316. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16486-1_31.
56. Fink G.A., Griswold R.L., Beech Z.W. Quantifying cyber-resilience against resource-exhaustion attacks. *Resilient Control Systems (ISRCS) 2014: Proceedings of the 7th International Symposium, Denver, CO, USA, 19–21 August, 2014*. IEEE, 2014. P. 1–8. DOI: 10.1109/ISRCS.2014.6900093.
57. Choras M., Kozik R., Bruna M.P.T., Yautsiukhin A., Churchill A., Maciejewska I., Eguinoa I., Jomni A. Comprehensive approach to increase cyber security and resilience. *Availability, Reliability and Security (ARES) 2015: Proceedings of the 10th International Conference. Toulouse, France, 24–27 August, 2015*. IEEE, 2015. P. 686–692. DOI: 10.1109/ARES.2015.30.
58. Musman S. Assessing prescriptive improvements to a system's cyber security and resilience. *Systems Conference (SysCon) 2016: Proceedings of the Annual IEEE Conference. Orlando, FL, USA, 18–21 April, 2016*. IEEE, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/SYSCON.2016.7490660.
59. Galinec D., Steingartner W. Combining cybersecurity and cyber defense to achieve cyber resilience. *Informatics 2017: Proceedings of the IEEE 14th International Scientific Conference. Poprad, Slovakia, 14–16 November, 2017*. IEEE, 2017. P. 87-93. DOI: 10.1109/INFORMATICS.2017.8327227.
60. Rak J., Papadimitriou D., Niedermayer H., Romero P. Information-driven network resilience: Research challenges and perspectives. *Optical Switching and Networking, 2017*. Vol. 23, Part 2. P. 156–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.osn.2016.06.002>.
61. Поповский В.В. Основы теории телекоммуникационных систем. LAPLAMBERT Academical Publishing. 2018. 565 с.
62. Rec ITU. Y. 110. Global information infrastructure principles and framework architecture. 1998. 47 с.
63. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: підручник: у 2 ч. / О.В. Лемешко та ін.; за ред. В.В. Поповського. Харків: СМІТ, 2010. Ч. 1. 470 с.

64. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: підручник: у 2 ч. / О.В. Лемешко та ін.; за заг. ред. В.В. Поповського. Харків: СМІТ, 2010. Ч. 2. 482 с.
65. Vegesna S. IP Quality of Service (Cisco networking fundamentals). Cisco press. 2001. 232 p.
66. Osborne E.D., Simha A. Traffic engineering with MPLS. Cisco Press, 2002. 608 p.
67. ITU-T Recommendation G.107: The E-model: a computational model for use in transmission planning. Geneva. 2015. 30 p.
68. ITU-T Recommendation G.1030 Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications. Geneva. 2014. 30 p.
69. ITU-T Recommendation G.1070 Opinion model for video-telephony applications. Geneva. 2015. 32 p.
70. Wang Y., Wang Z. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering. Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999. P. 582–588.
71. Seok Y., Lee Y., Kim C., Choi Y. Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks. IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. 2001. №3. P. 348–353.
72. Seok Y., Lee Y., Choi Y., Kim C. Dynamic Constrained Traffic Engineering for Multicast Routing. Proc. Wired Communications and Management. 2002. Vol. 2343. P. 278–288.
73. Лемешко А.В., Вавенко Т.В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки. Проблемы телекомунікацій. 2012. № 1 (6). С. 12–29. URL: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.
74. Segall A. The modeling of adaptive routing in data communications networks. IEEE Trans. on communications. 1975. Vol. 25, № 1. P. 85–95.
75. Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеєва О.Ю. Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний. Наукові записки УНДІЗ. 2009. № 1(9). С. 3–26.
76. Лемешко О.В., Євсеєва О.Ю., Симоненко Д.В. Модель динамічного балансування мережних ресурсів у телекомунікаційній мережі. Системи обробки інформації. 2008. Вип. 5(72). С. 71–74.
77. Yeremenko O., Lemeshko O. QoS Ensuring over Probability of Timely Delivery in Multipath Routing. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018.

Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. 2018. Vol. 754. P. 244–254. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_25

78. Методи наукових досліджень в телекомунікаціях: навч. посіб.: у 2 т. / за ред. В.В. Поповського. Харків: СМІТ, 2013. Т. 1. 390 с.

79. Методи наукових досліджень в телекомунікаціях: навч. посіб.: у 2 т. / за ред. В.В. Поповського. Харків: СМІТ, 2013. Т. 2. 330 с.

80. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / за заг. ред. В.В. Поповського. Харків: СМІТ, 2006. 564 с.

81. Гуревич И.М. Динамическая модель сети связи // Теория телетрафика в системах информатики. Москва: Наука, 1989. С. 54–64.

82. Policy-based QoS management model for multiservice networks / O.V. Lemeshko, S.V. Garkusha, O.S. Yeremenko, A.M. Hailan. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21–23 May 2015, Omsk, Russia. Publisher: IEEE. P. 1–4.

83. Lemeshko A.V., Evseeva O.Yu., Garkusha S.V. Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greater Number of Indices. Telecommunications and RadioEngineering, 2014, Vol. 73. No 15. P. 1339–1360.

84. Lemeshko O., Yeremenko O. Dynamic Presentation of tensor model for multipath QoS-routing. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference TCSET'2016. – Lviv–Slavske, Ukraine, February 23–26, 2016: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. P. 601–604.

85. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Naors Y. Anad Alsaleem. Development of the tensor model of multipath QoS-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5. Issue 2 (95). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>.

86. Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях. / В.В. Поповский и др. Прикладная радиоэлектроника. 2005. Том. 4. Вып. № 4. С. 372–382.

87. Лемешко О.В., Дробот О.А., Симоненко Д.В. Результаты порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2007. Вип. 1(13). С. 66–69.

88. Евсева О.Ю., Гаркуша С.В. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания. Проблемы телекомунікацій. 2012. № 3 (8). С. 24 – 46. URL: http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_evseeva_review.pdf.

89. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. Москва: Техносфера, 2003. 512 с.

90. Lemeshko O.V., Arous K.M., Yeremenko O.S. Fault-Tolerant Unicast, Multicast and Broadcast Routing Flow-Based Models. Scholars Journal of Engineering and Technology. 2015. 3(4A). P. 343–350.

91. Лемешко А.В., Арус К.М. Модель отказоустойчивой маршрутизации многоадресных и широковещательных потоков в MPLS-сети. Системы обробки інформації. 2013. № 9 (116). С. 160–163.

92. Лемешко А.В., Арус К.М. Поточковые модели многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях. Проблемы телекомунікацій. 2013. № 1(10). С. 38–45. URL: http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_lemeshko_multicast.pdf.

93. Лемешко А.В., Ахмад М. Хайлан. Многоуровневое управление трафиком в сети MPLS–TE DiffServ на основе координационного принципа прогнозирования взаимодействий. Проблемы телекомунікацій. 2010. № 1(1). С. 35–44. URL: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_traffic.pdf.

94. Лемешко А.В., Добрышкин Ю.Н., Дробот О.А. Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многополюсного случаев. / Проблемы телекомунікацій. 2010. № 2(2). С. 33–41. URL: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_results.pdf.

95. Разработка и анализ диакоптического метода междоменной маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко и др. Проблемы телекомунікацій. 2018. № 1(22). С. 3–24. URL: http://pt.journal.kh.ua/2018/1/1/181_lemeshko_diacoptic.pdf.