

О.В. Лемешко
О.С. Єременко
О.С. Невзорова

**ПОТОВОКІ МОДЕЛІ
ТА МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ
В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ:
ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ, БЕЗПЕКА,
МАСШТАБОВАНІСТЬ**



О.В. Лемешко, О.С. Єременко, О.С. Невзорова

**ПОТОКОВІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ
В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ:
ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ, БЕЗПЕКА, МАСШТАБОВАНІСТЬ**

Монографія

Харків 2020

УДК 621.391

*Рекомендовано Науково-технічною радою
Харківського національного університету радіоелектроніки
(протокол №1 від 15.02.2019)*

Рецензенти:

Кіріченко Л.О., доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки;

Василишин В.І., доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Лемешко О.В., Єременко О.С., Невзорова О.С. Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 308 с.

ISBN 978-966-659-282-1

Монографія присвячена питанням, пов'язаним із синтезом математичних моделей і методів маршрутизації, які б слугували подальшою теоретичною основою перспективних протоколів маршрутизації та технологічних засобів управління трафіком для підвищення якості обслуговування, відмовостійкості та масштабованості інфокомунікаційних мереж, а також рівня їх мережної безпеки.

Робота призначена для науково-педагогічних працівників, зокрема магістрантів, аспірантів і докторантів, які працюють у галузі інфокомунікацій та мережної безпеки.

ISBN 978-966-659-282-1

DOI: 10.30837/978-966-659-282-1

© О.В. Лемешко, О.С. Єременко,
О.С. Невзорова, 2020

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	9
Розділ 1. Роль і місце маршрутизації в сучасних інфокомунікаційних мережах.....	12
1.1. Мета та завдання інфокомунікаційних мереж у сучасному суспільстві ...	12
1.2. Огляд технологічних засобів забезпечення якості обслуговування в ІКМ	15
1.3. Класифікація маршрутних рішень в ІКМ	19
1.4. Вимоги, які висуваються до перспективних маршрутних рішень	29
1.5. Напрями вдосконалення протоколів маршрутизації в ІКМ.....	30
1.6. Узагальнена структура потокової моделі маршрутизації в ІКМ	33
1.7. Опис базових поточкових моделей маршрутизації в ІКМ.....	36
1.7.1. Поточкова модель одноадресної маршрутизації в ІКМ	36
1.7.2. Поточкова модель багатоадресної та ширококомовної маршрутизації в ІКМ	38
1.7.3. Основні варіанти критеріїв оптимальності маршрутних рішень в ІКМ	40
Висновки до першого розділу.....	42
Перелік джерел посилання до вступу та першого розділу	43
Розділ 2. Поточкові моделі та методи відмовостійкої маршрутизації в інфокомунікаційних мережах.....	52
2.1. Маршрутизація як засіб забезпечення відмовостійкості ІКМ	52
2.2. Класифікація засобів відмовостійкої маршрутизації в ІКМ	55
2.3. Аналіз моделей і методів відмовостійкої маршрутизації в ІКМ	67
2.4. Система поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів ІКМ	78
2.4.1. Синтез та дослідження потокової моделі багатошляхової маршрутизації в ІКМ шляхами, що не перетинаються	79
2.4.2. Синтез та дослідження потокової моделі багатошляхової маршрутизації в ІКМ шляхами, що перетинаються за вузлами	83
2.5. Поточкова модель швидкої перемаршрутизації в ІКМ.....	86

2.6. Формалізація умов забезпечення захисту вузла, каналу, маршруту та пропускної здатності під час швидкої перемаршрутизації в ІКМ	87
2.7. Дослідження оптимальності рішень щодо швидкої перемаршрутизації в ІКМ	90
2.7.1. Формування критерію оптимальності рішень щодо швидкої перемаршрутизації на основі метрик	90
2.7.2. Характеристика оптимізаційних задач швидкої перемаршрутизації на основі метрик та методів їх розв'язання	93
2.7.3. Обґрунтування вибору вагових коефіцієнтів у критерії оптимальності рішень щодо швидкої перемаршрутизації в ІКМ	94
2.7.4. Білінійний критерій оптимальності рішень щодо швидкої перемаршрутизації в процесі реалізації схеми захисту шляху	98
2.7.5. Приклади розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації багатоадресних потоків в ІКМ	102
2.8. Рішення щодо швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ІКМ	105
2.8.1. Синтез та дослідження дворівневого методу одношляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ІКМ	106
2.8.2. Синтез та дослідження лінійної оптимізаційної моделі багатошляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ІКМ	119
2.9. Потокова модель відмовостійкої маршрутизації із захистом шлюзу за замовчуванням	127
2.9.1. Графова модель відмовостійкої маршрутизації в ІКМ	127
2.9.2. Потокова модель відмовостійкої маршрутизації в ІКМ	129
2.9.3. Дослідження схеми захисту шлюзу за замовчуванням у разі використання різних стратегій маршрутизації в ІКМ	133
Висновки до другого розділу	136
Перелік джерел посилання до другого розділу	139
 Розділ 3. Моделі та методи безпечної маршрутизації в інфокомунікаційних мережах.....	149
3.1. Характеристика засобів мережної безпеки в інфокомунікаціях.....	149
3.2. Аналіз методів безпечної маршрутизації в ІКМ.....	154
3.3. Удосконалення методу безпечної маршрутизації повідомлень шляхами, що не перетинаються: проактивний підхід.....	156
3.3.1. Метод безпечної маршрутизації повідомлень шляхами, що не перетинаються в ІКМ	156

3.3.2. Дослідження методу безпечної маршрутизації повідомлень шляхами, що не перетинаються	159
3.4. Метод безпечної маршрутизації повідомлень шляхами, що перетинаються: проактивний підхід	164
3.5. Аналіз запропонованого методу безпечної маршрутизації повідомлень шляхами, що перетинаються	169
3.5.1. Дослідження методу безпечної маршрутизації повідомлень шляхами, що перетинаються, у разі використання єдиного композитного шляху	169
3.5.2. Дослідження методу безпечної маршрутизації повідомлень у разі використання двох різнотипних шляхів, що не перетинаються	173
3.6. Метод безпечної швидкої перемаршрутизації повідомлень композитними шляхами: проактивний і реактивний підходи	177
3.7. Дослідження методу безпечної швидкої перемаршрутизації повідомлень композитними шляхами	181
Висновки до третього розділу	184
Перелік джерел посилання до третього розділу	187
 Розділ 4. Потоків моделі та методи ієрархічної маршрутизації в інфокомунікаційних мережах	192
4.1. Аналіз відомих теоретичних і протокольних рішень щодо ієрархічної маршрутизації в ІКМ	192
4.2. Потоків модель і метод ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS	204
4.2.1. Декомпозиційна модель ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS	205
4.2.2. Розв'язання задачі ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації на основі метрик в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS	207
4.2.3. Дослідження процесів ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації одноадресних потоків на основі метрик в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS	210
4.2.4. Розв'язання задачі ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації одноадресних потоків з балансуванням навантаження в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS-TE	224

4.2.5. Дослідження процесів ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації одноадресних потоків з балансуванням навантаження в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS-TE	226
4.2.6. Дослідження процесів ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації багатоадресних потоків в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS-TE	231
4.2.7. Структура методу ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS	242
4.3. Синтез і дослідження математичної моделі та методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій ІКМ	245
4.3.1. Декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій ІКМ, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів	245
4.3.2. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій ІКМ.....	252
4.3.3. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій ІКМ	256
4.3.4. Трирівневий метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в багатодоменній ІКМ.....	266
4.4. Синтез і дослідження математичної моделі та методу ієрархічної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ІКМ	274
4.4.1. Декомпозиційна модель ієрархічної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ІКМ	275
4.4.2. Умови захисту приграничних маршрутизаторів під час ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ІКМ .	279
4.4.3. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ІКМ	281
4.4.4. Дослідження методу ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ІКМ	284
Висновки до четвертого розділу	289
Перелік джерел посилання до четвертого розділу	295
Висновки	303

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БШМ	багатошляхова маршрутизація
ГІІ	глобальна інформаційна інфраструктура
ІКМ	інфокомунікаційна мережа
КЗ	канал зв'язку
КВ	канал зв'язку
ОШМ	одношляхова маршрутизація
ОС	операційна система
ПЗ	пропускна здатність
МД	мережа доступу
ТМ	транспортна мережа
AS (Autonomous System)	автономна система
ATM (Asynchronous Transfer Mode)	асинхронний режим передачі
BGP (Border Gateway Protocol)	протокол приграничного шлюзу
BR (Border Router)	приграничний маршрутизатор
DiffServ (Differentiated Services)	диференційовані послуги
ECMP (Equal Cost Multipath)	механізм вибору маршруту залежно від його вартості
EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol)	удосконалений протокол маршрутизації внутрішнього шлюзу
EGP (Exterior Gateway Protocol)	протокол маршрутизації зовнішнього шлюзу
FRR (Fast ReRoute)	швидка перемаршрутизація
GLBP (Gateway Load Balancing Protocol)	протокол балансування навантаження шлюзу за замовчуванням
HSRP (Hot Standby Router Protocol)	протокол маршрутизатора гарячого резерву
IntServ (Integrated Services)	інтегровані послуги
IP (Internet Protocol)	протокол міжмережної взаємодії
IPDV (IP packet delay variation)	варіація затримки передачі (джитер) IP-пакета
IPER (IP packet error ratio)	коефіцієнт помилок IP-пакетів
IPLR (IP packet loss ratio)	коефіцієнт втрат IP-пакетів
IPTD (IP packet transfer delay)	середня затримка передачі IP-пакета
IGP (Interior Gateway Protocol)	протокол внутрішнього шлюзу
IGRP (Interior Gateway Routing Protocol)	протокол маршрутизації внутрішнього шлюзу

IPsec (Internet Protocol Security)	набір протоколів для забезпечення безпеки даних, які передаються за допомогою протоколу IP
IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System)	протокол маршрутизації «проміжна система – проміжна система»
ITU (International Telecommunication Union)	Міжнародний союз телекомунікацій
LAN (Local Area Network)	локальна мережа
LFA (Loop Free Alternate)	механізм запобігання створення петель уздовж резервного маршруту
MILP (Mixed integer linear programming)	змішане цілочисельне лінійне програмування
MINLP (Mixed Integer Nonlinear Programming).	змішане цілочисельне нелінійне програмування
MPLS (Multiprotocol Label Switching)	багатопротокольна комутація за мітками
MRT (Maximally Redundant Trees)	механізм побудови максимально надлишкових дерев
NGN (Next Generation Network)	мережа наступного покоління
NLP (Nonlinear Programming)	нелінійне програмування
OSI (Open Systems Interconnection)	еталонна модель взаємодії відкритих систем
OSPF (Open Shortest Path First)	відкритий протокол маршрутизації за найкоротшим шляхом
PNNI (Private Network – to – Network Interface)	приватний міжмережний інтерфейс
RIP (Routing Information Protocol)	інформаційний протокол маршрутизації
RSVP (Resource Reservation Protocol)	протокол резервування ресурсів
SDN (Software Defined Network)	програмно-конфігурована мережа
SLA (Service Level Agreement)	угода про рівень надання послуг
SCR-LDP (Signalling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol)	сигнальний протокол розподілу міток
TE (Traffic Engineering)	інжиніринг трафіку
QoE (Quality of Experience)	якість обслуговування, яка сприймається
QoS (Quality of Service)	якість обслуговування
VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol)	протокол резервування віртуального маршрутизатора
WAN (Wide Area Network)	територіально розподілена мережа

ВСТУП

Стрімкий розвиток і постійне вдосконалення інфокомунікацій у напрямку впровадження технологій мереж майбутнього (Future Networks, FN) є ключовим пріоритетом у забезпеченні конкурентоздатності національної економіки та обороноздатності України загалом [1–13], що потребує подальшої інтеграції в провідні європейські та світові інституції в галузі зв'язку, використання міжнародних інфокомунікаційних стандартів з широкою їх адаптацією під умови та потреби сьогодення нашої країни. Слід зазначити, що, крім вимог до рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS), які вже стали класичними функціями сучасних інфокомунікаційних мереж (ІКМ), на перший план виходить функціонал щодо забезпечення високого рівня відмовостійкості та мережної безпеки [14–19]. Це особливо важливо для функціонування мереж в умовах постійних деструктивних (випадкових та антагоністичних) впливів. Саме вони приводять до суттєвої зміни як структурних, так і функціональних параметрів і властивостей ІКМ: її топології, пропускну здатності, керованості, стійкості тощо.

Як показав проведений аналіз [20–43], ключовим технологічним інструментарієм забезпечення якості обслуговування, відмовостійкості та мережної безпеки є протокольні засоби маршрутизації та управління трафіком загалом в ІКМ, до рівня ефективності функціонування яких з кожним роком висуваються все більш жорсткі вимоги, особливо щодо обчислювальної складності та масштабованості отримуваних мережних рішень. У галузі управління трафіком у ІКМ наука і практика постійно накопичує, поповнює та оновлює теоретичні та технологічні рішення, які стосуються різноманітних мережних платформ, широкого спектра наданих послуг зв'язку та вимог користувачів щодо якості обслуговування, зокрема відмовостійкості, безпеки та масштабованості тощо. Найбільш перспективними рішеннями в цій галузі є програмно-конфігуровані мережі (Software-Defined Networking, SDN), кіберстійкі мережі (Technical Cyber Resilience, TCR), інжиніринг трафіку (Traffic Engineering, TE), віртуалізація мережних функцій (Network Function Virtualization, NFV), самоорганізовані мережі (Self-Organized Networks, SON), мережі на основі хмарних технологій (Cloud Networking), інформаційно орієнтовані мережі (Information-Centric Networking, ICN), маршрутизація з підтримкою якості обслуговування (QoS-based Routing), відмовостійка маршрутизація (Fault-Tolerant Routing), безпечна маршрутизація (Secure Routing) [44–61].

Значний внесок у розроблення базових мережних концепцій, їх теоретичне обґрунтування та розвиток здійснили такі іноземні фахівці, як R. Gallager, D. Tipper, T. Gomes, L. Martins, J. Rak, J. Tapolcai, Y. Seok, а також вітчизняні вчені В.В. Поповський, П.П. Воробієнко, Ю.І. Лосєв, Л.Н. Беркман, В.А. Романюк, І.В. Стрелковська, М.М. Климаш, Б.Ю. Волочій, О.І. Романов, О.Ю. Євсєєва та ін. У галузі підтримки безпеки інформаційно-комунікаційних рішень активно працюють українські науковці В.О. Хорошко, О.Г. Оксіук, С.В. Толюпа, Г.Ф. Конахович, Ю.О. Кулаков та багато інших.

Незважаючи на високий науковий та прикладний рівень досягнутих у сфері маршрутизації в ІКМ результатів, до перспективних мережних рішень усе ж висувається низка важливих концептуальних вимог, які подекуди мають суперечливий характер:

- покращення якості обслуговування в ІКМ на підставі забезпечення ефективного балансування навантаження відповідно до вимог концепції Traffic Engineering;

- комплексне врахування вимог щодо відмовостійкості мережі з підтримкою на алгоритмічно-програмному рівні наявних і новітніх схем перемаршрутизації та захисту елементів мережі, їх пропускнуої здатності та рівня QoS загалом як на рівні доступу (Fault-Tolerant Routing), так і на рівні ядра мережі (Fast ReRouting);

- підвищення рівня мережної безпеки під час передачі різноманітних конфіденційних даних, зокрема сесійних ключів, інформації щодо автентифікації, критично важливих для користувача повідомлень тощо;

- оптимізація використання доступного мережного ресурсу, підвищення масштабованості отриманих мережних рішень, оснований зокрема на реалізації стратегій ієрархічної маршрутизації та управління трафіком в ІКМ загалом.

Варто зазначити, що фундаментом наявних та перспективних протоколів маршрутизації були й залишаються відповідні математичні моделі та методи. Саме рівень їх інформативності та адекватності повністю визначає результативну ефективність технологічних рішень щодо маршрутизації в ІКМ. Отже, мета цієї монографії полягає в подальшому розвитку теорії управління трафіком шляхом удосконалення наявних та синтезу нових математичних моделей і методів маршрутизації, які б слугували подальшою теоретичною основою перспективних протоколів маршрутизації та технологічних засобів управління трафіком для підвищення якості обслуговування, відмовостійкості та мережної безпеки в ІКМ.

Основу монографії становлять результати науково-прикладних досліджень, отриманих протягом останніх п'яти років авторським колективом – співробітниками кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки. Монографія містить чотири розділи. Перший розділ присвячений питанням визначення ролі та місця завдань маршрутизації в сучасних ІКМ шляхом огляду технологічних засобів забезпечення якості обслуговування, класифікації маршрутних рішень та формулювання вимог, які висуваються до них, а також визначення основних напрямів удосконалення протоколів маршрутизації в ІКМ. Також у розділі описані базові математичні моделі одно- та багатоадресної/широкомовної маршрутизації в ІКМ, які, ґрунтуючись на запропонованій узагальненій структурі потокової моделі маршрутизації, підлягають подальшому вдосконаленню та розвитку в наступних розділах цієї роботи.

У другому розділі запропоновано теоретичні рішення щодо відмовостійкої маршрутизації, які містять відповідні поточкові моделі та методи як без резервування елементів ІКМ, так і з підтримкою основних схем захисту (резервування) елементів мережі – шлюзу за замовчуванням, каналу, вузла, шляху та пропускної здатності мережі загалом. Запропоновані рішення адаптовані під різні типи мереж (IP/MPLS або SDN) і стратегії маршрутизації – одношляхової та багатошляхової; одноадресної і багатоадресної/широкомовної маршрутизації.

У третьому розділі описані моделі та методи безпечної маршрутизації фрагментованої доставки конфіденційних повідомлень множиною шляхів, що можуть допускати певний тип перетинання. Представлені моделі та методи безпечної маршрутизації та безпечної перемаршрутизації охоплюють як проактивні, так і реактивні рішення, орієнтовані на забезпечення заданих значень імовірності компрометації конфіденційних повідомлень, що передаються в ІКМ.

У четвертому розділі наведені поточкові моделі та методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в ІКМ. Ці рішення охоплюють варіанти організації як внутрішньодоменної маршрутизації «від джерела», яка є характерною, наприклад, для MPLS-мереж, так і міждоменної маршрутизації в мережах, що для підвищення своєї масштабованості розбиваються на множину пов'язаних між собою доменів (підмереж). Крім того, у розділі запропоновано математичну модель та метод ієрархічної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ІКМ.