

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**АРУС КІНАН МОХАМАД**

УДК 621.391

**ПОТОКОВІ МОДЕЛІ ТА МЕТОД БАГАТООАДРЕСНОЇ ТА  
ВІДМОВОСТІЙКОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В  
МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ  
МЕРЕЖАХ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
ЛЕМЕШКО Олександр Віталійович,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
професор кафедри телекомунікаційних систем.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
ГАРКУША Сергій Володимирович,  
Вищий навчальний заклад Укоопспілки  
«Полтавський університет економіки і торгівлі»,  
проректор з наукової роботи;

кандидат технічних наук,  
ЛАВРІВ Орест Андрійович,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
старший викладач кафедри телекомунікацій.

Захист відбудеться «20» січня 2016 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий « 18 » грудня 2015 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.В. Дуравкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Важливою особливістю сучасних телекомунікаційних мереж (ТКМ), що складають основу глобальної інформаційної інфраструктури, є підтримка мультисервісності. Саме ця функціональність є ключовою при реалізації концепції побудови мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN). Особлива роль в архітектурі забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS) з «кінця в кінець» (end-to-end) і особливо при впровадженні мультимедіа-сервісів відводиться засобам ширококомовної (broadcast) і багатоадресної (multicast) маршрутизації, що активно використовуються при передачі трафіка таких додатків як IPTV, дистанційного навчання, реплікації баз даних та інформації веб-сайтів, розсилки корпоративної інформації та ін., частка якого в спектрі надаваних послуг постійно зростає. З іншого боку, сучасні протоколи маршрутизації все частіше доповнюються функціоналом підвищення відмовостійкості рішень, прикладом чому може служити поява концепцій Fast ReRoute в мережах MPLS (Multiprotocol Label Switching), а також Fault-Tolerant Routing і IP resiliency technology в IP-мережах.

Проведений у роботі аналіз дозволив сформулювати наступні ключові вимоги, які першочергово висувуються до рішень щодо багатоадресної/широкомовної і відмовостійкої маршрутизації в IP/MPLS-мережах:

- ✓ узгоджене розв'язання окремих задач щодо розрахунку шляхів і розподілу за ними потоків користувачів;
- ✓ реалізація функцій балансування навантаження за множиною шляхів;
- ✓ адаптивна реалізація схем щодо резервування ресурсів (захисту вузла, каналу, маршруту та їх пропускну здатності);
- ✓ запобігання перевантаженню елементів мережі (маршрутизаторів, каналів зв'язку і шляхів в цілому) в ході реалізації запропонованих маршрутних рішень;
- ✓ висока масштабованість кінцевих рішень.

На жаль, відомі технологічні та протокольні рішення в цій області не забезпечують виконання перерахованих вимог в належному обсязі. Причина цього полягає в недосконалому математичних моделей і методів, закладених в протоколи маршрутизації. В сучасних маршрутних протоколах переважно використовуються графові моделі і методи пошуку найкоротшого шляху (мультишляху), в рамках яких досить складно, а в більшості випадків і неможливо врахувати вимоги системного характеру, що пред'являються до рішень з багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. Ці моделі не забезпечують в належній мірі врахування характеристик циркулюючих в мережі потоків пакетів та не дозволяють зробити керованим процес боротьби з перевантаженням каналів зв'язку, ускладнюють реалізацію основних схем захисту елементів мережі, спрямованих на підвищення рівня відмовостійкості маршрутних рішень.

У зв'язку з цим тематика цієї дисертаційної роботи, яка присвячена розв'язанню наукової задачі, пов'язаної з оптимізацією процесів багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах шляхом розробки відповідних математичних моделей і методів для підвищення продуктивності і масштабованості ТКМ в цілому, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності з основними положеннями «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Запропоновані поточкові моделі та методи багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації використані в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ і в ході розвитку телекомунікаційної інфраструктури науково-виробничого товариства «СОЛВЕР». Реалізацію результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами. Отримано патент на корисну модель (99837, № u201500068).

**Метою досліджень** є підвищення продуктивності та масштабованості ТКМ на основі вдосконалення потокових моделей багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. У дисертаційній роботі проведена декомпозиція наукової задачі на окремі завдання дослідження:

- аналіз теоретичних і протокольних рішень щодо багатоадресної і відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних ТКМ;
- аналіз вимог, що висуваються до перспективних рішень в області багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних ТКМ;
- розробка потокових моделей багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних ТКМ;
- розробка декомпозиційної моделі та ієрархічно-координаційного методу багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі;
- перевірка адекватності і дослідження ефективності запропонованих в дисертації рішень щодо багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в ТКМ.

**Об'єкт дослідження:** процеси багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах.

**Предмет дослідження:** моделі та метод багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах.

**Методи дослідження.** При розробці потокових моделей багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації було використано інструментарій теорії графів, теорії множин і можливості математичного апарату дослідження операцій, представлених методами математичного (лінійного, нелінійного і змішаного) програмування. При розробці декомпозиційної моделі та ієрархічно-

координаційного методу багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в ТКМ використана теорія оптимізації ієрархічних багаторівневих систем.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В ході розв'язання поставленої наукової задачі були отримані наступні нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано потокову модель багатоадресної маршрутизації в мультисервісній ТКМ, яка також охоплює випадок маршрутизації широкомовних потоків. Новизна моделі полягає в тому, що врахування потокового (мультипотокowego) характеру сучасного мережного трафіку здійснено за рахунок представлення моделі системою лінійних рівнянь стану завантаженості і запобігання перевантаженню каналів зв'язку. Використання моделі дозволило оптимізувати процес багатоадресної і широкомовної маршрутизації множини потоків на підставі розрахунку маршрутних змінних в ході розв'язання задач булевого або змішаного цілочисельного лінійного програмування.

2. Отримала подальший розвиток потокова модель відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі, в рамках якої формалізовані умови реалізації основних схем резервування елементів мережі: захисту вузла, каналу, маршруту та їх пропускних здатностей. Новизна моделі полягає, по-перше, в отриманні умов запобігання перевантаженню каналів зв'язку, за якими, в загальному випадку, одночасно можуть протікати потоки як основних, так і резервних маршрутів, що дозволило в ході реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації запобігти перевантаженню каналів зв'язку навіть у випадку, якщо тільки деякі потоки будуть перемикатися з основних шляхів на резервні. По-друге, в модифікації цільової функції, що підлягає мінімізації, шляхом введення квадратичного члена, відповідального за те, щоб резервний шлях якомога менше відрізнявся від основного за складом каналів і вузлів – в ідеалі лише на проблемний елемент мережі, що підлягає подальшому захисту. Це дозволило підвищити продуктивність і масштабованість одержаних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації.

3. Отримав подальший розвиток ієрархічно-координаційний метод багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі, заснований на декомпозиційному поданні поточкових моделей багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. Новизна методу полягає в тому, що він, ґрунтуючись на принципі цільової координації, дозволяє реалізувати ієрархічно-координаційну маршрутизацію не тільки одноадресних, але й багатоадресних, а також широкомовних потоків. Використання в методі принципу цільової координації дозволило відмовитися від централізації розрахунків, наділити функціями маршрутизації всі прикордонні маршрутизатори, і в кінцевому підсумку підвищити масштабованість рішень щодо багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації.

**Обґрунтованість та достовірність** отриманих у дисертаційній роботі нових наукових результатів забезпечувалась коректним використанням можливостей добре апробованих математичних підходів, заснованих на теорії графів, теорії множин, методах математичного програмування, теорії оптимізації ієрархічних багаторівневих систем, а також належним аналітичним і числовим обґрунтуванням прийнятих наближень і ясним фізичним трактуванням отриманих результатів дослідження

**Наукове значення результатів дисертаційної роботи** полягає в подальшому теоретичному узагальненні та розвитку моделей і методів управління трафіком і забезпечення якості обслуговування шляхом розробки та вдосконалення відповідних потокових моделей та ієрархічних методів багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. Використання запропонованих моделей і методу дозволило підвищити продуктивність, відмовостійкість і масштабованість маршрутних рішень у мультисервісних ТКМ.

**Практична значимість дисертаційної роботи** визначається тим, що запропоновані в ній математичні моделі та метод можуть бути безпосередньо використані при вирішенні важливих прикладних завдань з управління трафіком і забезпечення якості обслуговування в ТКМ, а саме задач багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. Дані моделі можуть бути покладені в основу розробки перспективних протоколів багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації у вигляді спеціального математичного та алгоритмічного забезпечення операційних систем маршрутизаторів мультисервісних мереж, що функціонують в рамках транспортних технологій IP і MPLS. Крім того, матеріали дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ і в ході розвитку телекомунікаційної інфраструктури науково-виробничого товариства «СОЛВЕР». За результатами дисертаційних досліджень також отриманий патент на корисну модель (99837, № u201500068).

**Особистий вклад здобувача.** Всі наукові результати, що запропоновані в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [1] автор запропонував потокову модель багатоадресної та широкомовної маршрутизації; в статті [2] здобувачем розроблена модель відмовостійкої маршрутизації багатоадресних та широкомовних потоків в MPLS-мережі; в публікації [3] автором проаналізовано особливості математичного опису процесів багатоадресної маршрутизації потоковими моделями; в роботі [4] автором запропоновані умови заповігання перевантаженню каналів зв'язку при реалізації відмовостійкої багатошляхової маршрутизації одночасно множини потоків; в статті [5] здобувач провів аналіз можливостей реалізації ієрархічної маршрутизації для підвищення масштабованості кінцевих рішень; в публікації [6] автором проведено аналіз потокових моделей одно- та багатоадресної відмовостійкої маршрутизації.

**Апробація.** Апробація основних положень дисертаційної роботи проводилася в ході п'ятнадцяти наукових конференцій та форумів, а саме на 23-й Міжнародній конференції "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013, Севастополь, Україна), на першій Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии» (2013, Харків, ХНУРЕ), на Міжнародних науково-технічних конференціях «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», INTERMATIC (2013-2014, Москва, МДТУ МИРЕА), на другій Міжнародній конференції «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (2013, Томськ, Томський політехнічний університет), на 12-й Міжнародній науково-технічній IEEE конференції «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference», TCSET (2014, Lviv Polytechnic), на XVIII Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті» (2014, Харків, ХНУРЕ), на першій Міжнародній IEEE конференції «Problems of Infocommunications. Science and Technology», PICS&T-2014 (2014, Kharkiv, Ukraine), на 69-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (2014, Одеса, ОНАЗ), на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014» СПТЕЛ (2014, Львів, НУ "Львівська політехніка"), на XIII Міжнародній IEEE конференції «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015 (2015, Lviv-Poljana, Lviv Polytechnic), на 19-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті». (2015, Харків, ХНУРЕ), на IX Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій», ПТ-2015 (2015, Київ, НТУУ «КПІ»), на 4-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми інформатизації" (2015, Київ, ДУТ), на 11-й науковій конференції Харківського університету повітряних сил імені Івана Кожедуба (2015, Харків, ХУПС).

**Публікації.** Основні положення дисертації викладено у 22 наукових працях. Серед праць 6 статей, з яких 5 в наукових фахових виданнях, затверджених МОН України [1-5], 1 стаття [6] в іноземному фаховому виданні. Чотири статті викладені в науко-метричну базу e-library (РІНЦ) [1, 3-5]. Крім того, матеріали дисертації опубліковані в 15 матеріалах та тезах доповідей на науково-технічних конференціях та форумах [7-21], з яких чотири конференції проходили під егідою IEEE [7, 11, 13, 17] та викладені в наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library, а три конференції проходили закордоном [9, 10, 16]. Здобувач також має патент на корисну модель [22]. Зазначені публікації повністю відображають наукові результати та висновки дисертаційної роботи.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 170 сторінок, у тому числі 152 сторінки основного тексту, 60 рисунків та 12 таблиць. Список використаних джерел містить 105 найменувань, викладених на 10 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито основний зміст і загальний стан проблеми та окремих задач щодо багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах, обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі.

У **першому розділі** в ході проведеного аналізу сучасного стану та перспектив розвитку телекомунікаційних технологій, концепцій і протокольних рішень показано, що ключовим завданням щодо забезпечення якості обслуговування в ТКМ є маршрутизація, що відповідає за числові значення міжкінцевих QoS-показників. При класифікації методів маршрутизації встановлено, що у зв'язку з широким впровадженням мультимедійних послуг підвищуються вимоги до моделей, методів та протоколів багатоадресної і широкомовної маршрутизації. До основних з них, насамперед, варто віднести врахування потокового характеру циркулюючого в мережі мультимедійного трафіка, відсутність циклів в розрахованих маршрутах, висока масштабованість, а також низька складність їх алгоритмічно-програмної та обчислювальної реалізації на практиці.

Крім того в першому розділі показано, що існуючі і перспективні мережні рішення як щодо одноадресної, так і багатоадресної маршрутизації повинні бути адаптовані до можливих відмов мережних елементів, викликаних їх невисокою експлуатаційною надійністю, можливим перевантаженням, порушенням рівня мережної безпеки і вимог до якості обслуговування в цілому. При розробці нових математичних моделей і методів відмовостійкої маршрутизації важливо забезпечити виконання основних вимог концепцій Fast IGP Convergence, Fast ReRoute та ін., пов'язаних, насамперед, з реалізацією схем захисту вузла, каналу, маршруту і їх пропускної здатності, а також підвищенням масштабованості кінцевих маршрутних рішень. У зв'язку з цим підтверджена актуальність тематики цієї дисертаційної роботи.

У **другому розділі** вперше запропонована потокова модель багатоадресної маршрутизації в ТКМ, яка також охоплює випадок маршрутизації широкомовних потоків. Структурний опис ТКМ здійснено за допомогою зваженого орієнтованого графа  $\Gamma = (M, E)$ , де  $M = \{M_i, i = \overline{1, m}\}$  – множина вершин – вузлів (маршрутизаторів) мережі,  $m$  – їх загальна кількість в ТКМ, а  $(i, j) \in E$  – множина



дуг графа, що моделюють канали зв'язку (КЗ) мережі. Як ваговий коефіцієнт для кожної дуги  $(i, j) \in E$  може виступати пропускна здатність даного КЗ  $\varphi_{(i,j)}$ , що вимірюється в пакетах за секунду (1/с). З кожним  $k$ -м потоком пов'язано також ряд параметрів:  $r_k$  – середня інтенсивність потоку на вході до мережі;  $s_k$  – вузол-відправник;

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

– множина вузлів-одержувачів пакетів, де  $m_k$  – число одержувачів для  $k$ -го багатоадресного потоку пакетів.

При описі потокової моделі ширококомовної маршрутизації множина вузлів-одержувачів пакетів дещо розширюється в порівнянні з (1)

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

тобто в нього входять всі вузли, крім  $s_k$ .

В межах запропонованої моделі багатоадресної маршрутизації необхідно розрахувати множину булевих змінних

$$x_{(i,j)}^k \in \{0;1\}, \quad (3)$$

кожна з яких характеризує долю інтенсивності  $k$ -го потоку в КЗ, представленого дугою  $(i, j) \in E$ ;  $k \in K^M$ , де  $K^M$  – множина багатоадресних потоків.

На маршрутні змінні (3) накладається ряд обмежень, пов'язаних з реалізацією умов збереження потоку в мережі:

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \geq 1 \quad \text{при } k \in K^M, M_i = s_k, \quad (4)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k = 1 \quad \text{при } k \in K^M; M_j \in d_k^*. \quad (5)$$

Обмеження (4) вводиться для вузла-відправника, а його виконання орієнтує на те, що від цього вузла потік, що надходить в мережу на обслуговування, буде переданий хоча б одному суміжному вузлу. Умова (5) націлена на забезпечення доставки пакетів потоку на кожен вузол-одержувач. Для кожного транзитного вузла додатково вводяться такі умови:

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \geq x_{(j,p)}^k \quad \text{при } k \in K^M; M_j \notin s_k, \quad (6)$$

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

Для запобігання утворення контурів в запропоновану модель вводяться умови (за числом базисних контурів в мережі) виду

$$\sum_{(i,j) \in E_{\pi}^i} x_{(i,j)}^k < |E_{\pi}^i|, \quad (7)$$

де  $E_{\pi}^i$  – множина дуг графа, що утворюють  $i$ -й контур ( $\pi$ );  $|E_{\pi}^i|$  – потужність множини базисних контурів  $E_{\pi}^i$ , яка завжди дорівнює цикломатичному числу графа  $\Gamma = (V, E)$ , що описує структуру ТКМ, яка моделюється.

З метою недопущення перевантаження каналів зв'язку багатоадресними потоками, що протікають в мережі, необхідно виконати наступні умови:

$$\sum_{k \in K^m} r_k x_{(i,j)}^k \leq \varphi_{(i,j)}, \quad (i, j) \in E. \quad (8)$$

Використання моделі (1)-(8) дозволило оптимізувати процес багатоадресної та ширококомовної маршрутизації, коли для розрахунку множини шуканих шляхів для прикладу як критерій оптимальності використано умову виду

$$\sum_{k \in K^m} \sum_{(i,j) \in E} f_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^k \Rightarrow \mathbf{min}, \quad (9)$$

де  $f_{(i,j)}^k$  – маршрутна метрика, яка характеризує структурно-функціональні параметри КЗ  $(i, j) \in E$  і кількісно відображає умовну вартість його використання.

Таким чином, в рамках запропонованої моделі (1)-(9) задача багатоадресної/широкомовної маршрутизації була зведена до задачі булевого програмування, так як шукані змінні (3) носять булевий характер, а цільова функція (9), що підлягає мінімізації, і множина обмежень (4)-(8) є лінійними. Для розв'язання сформульованих в розділі оптимізаційних задач багатоадресної та ширококомовної маршрутизації використовувався інструментарій системи MatLab, представлений пакетом Optimization Toolbox та програмами «bintprog» і «intlinprog».

У ході дослідження запропонованої моделі на множині прикладів показана її працездатність з погляду можливості обслуговування одночасно декількох потоків з різними характеристиками, а також адаптації одержуваних рішень до зміни параметрів мережі (пропускних здатностей каналів зв'язку, маршрутних метрик, стратегій маршрутизації). Модель (1)-(9) має лінійний характер, що робить їх застосування досить ефективним з точки зору обчислювальної реалізації в порівнянні з відомими нелінійними моделями багатоадресної маршрутизації

**У третьому розділі** з метою виконання вимог, що висуваються до перспективних протоколів щодо підвищення відмовостійкості мережних рішень, отримала подальший розвиток потокова модель відмовостійкої маршрутизації в ТКМ, яка спрямована на реалізацію основних схем резервування елементів мережі:

схеми захисту вузла, каналу, маршруту і їх пропускних здатностей. Пропонована математична модель відмовостійкої маршрутизації орієнтована на реалізацію як одно-, так і багатоадресної (широкомовної) маршрутизації. Поточкова модель багатоадресної маршрутизації детально розглянута у другому розділі і представлена виразами (1)-(9). Опис одноадресної маршрутизації заснований на тому, що маршрутні змінні  $x_{(i,j)}^k$  можуть залишатися булевими (3) при реалізації одношляхової маршрутизації, або на них накладаються обмеження

$$0 \leq x_{(i,j)}^k \leq 1 \quad (10)$$

для забезпечення багатошляхової одноадресної маршрутизації.

З метою недопущення втрат пакетів на маршрутизаторах і в ТКМ в цілому вводяться умови збереження потоку

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{(j,i)}^k = 0; & k \in K^o, \quad M_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{(j,i)}^k = 1; & k \in K^o, \quad M_i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{(j,i)}^k = -1; & k \in K^o, \quad M_i = d_k, \end{cases} \quad (11)$$

де  $d_k$  – єдиний вузол-одержувач пакетів;  $K^o$  – множина одноадресних потоків.

Для визначення резервного шляху з метою реалізації схем захисту вузла, каналу і шляху в цілому необхідно одночасно з невідомими  $x_{(i,j)}^k$  розрахувати додаткові маршрутні змінні  $\bar{x}_{(i,j)}^k$ , які характеризують долю  $k$ -го потоку, що протікає в каналі  $(i, j) \in E$ , але вже резервного шляху. На змінні  $\bar{x}_{(i,j)}^k$  також накладаються обмеження, які є подібними до (3), (10), (11).

При реалізації схеми захисту каналу  $(i, j) \in E$  необхідно виконати умову

$$x_{(i,j)}^k \bar{x}_{(i,j)}^k = 0, \quad (12)$$

щоб канал  $(i, j) \in E$  одночасно не використовували основний та резервний маршрути. При забезпеченні захисту  $i$ -го вузла модель доповнюється умовою

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \bar{x}_{(i,j)}^k = 0, \quad (13)$$

виконання якої гарантує використання  $i$ -го вузла (тобто інцидентних йому каналів зв'язку) або основним, або резервним маршрутом. З метою захисту шляху (шляхів) в структуру моделі вводяться умови

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \bar{x}_{(i,j)}^k = 0, \quad (14)$$

що еквівалентно виконанню вимог щодо відсутності в основному і резервному маршрутах спільних вузлів і каналів.

Новизною вдосконаленої моделі є те, що в ній запропоновані умови запобігання перевантаженню каналів зв'язку, за якими, в загальному випадку, одночасно можуть протікати потоки як основних, так і резервних маршрутів. Умови

$$\sum_{k \in K} r_k \left( \frac{x_{(i,j)}^k + \bar{x}_{(i,j)}^k}{x_{(i,j)}^k \bar{x}_{(i,j)}^k + 1} \right) \leq \varphi_{(i,j)}, \quad (i, j) \in E \quad (15)$$

варто використовувати, коли реалізується одношляхова маршрутизація і одноадресних, і багатоадресних потоків, а умови

$$\frac{1}{2} \sum_{k \in K} r_k \left( (x_{(i,j)}^k + \bar{x}_{(i,j)}^k) + \sqrt{(x_{(i,j)}^k - \bar{x}_{(i,j)}^k)^2} \right) \leq \varphi_{(i,j)}, \quad (i, j) \in E \quad (16)$$

є справедливими в т.ч. і для випадку реалізації багатошляхової маршрутизації, де  $K$  – множина всіх потоків в мережі, тобто множини  $K^M$  и  $K^O$  є підмножинами цієї множини. Використання умов (15) та (16) дозволило в ході реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації запобігти перевантаженню каналів зв'язку навіть у випадку, якщо тільки деякі потоки будуть перемикатися з основних шляхів на резервні. Фактично вирази (15) і (16) є умовами захисту (резервування) пропускної здатності елементів мережі, які органічно доповнюють умови захисту каналу (12), вузла (13) і маршруту (14).

В межах запропонованої моделі задача відмовостійкої маршрутизації була сформульована як оптимізаційна. Новизною моделі також є модифікація цільової функції, що підлягала мінімізації,

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^k + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{(i,j)}^k \bar{x}_{(i,j)}^k - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} b_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^k \bar{x}_{(i,j)}^k, \quad (17)$$

де  $c_{(i,j)}^k$  і  $\bar{c}_{(i,j)}^k$  – маршрутні метрики каналів основного и резервного маршрутів відповідно;  $b_{(i,j)}^k$  – досить великий за своєю величиною штрафний коефіцієнт ( $b_{(i,j)}^k \gg c_{(i,j)}^k$  і  $b_{(i,j)}^k \gg \bar{c}_{(i,j)}^k$ ). Функція (17) кількісно характеризує сумарні витрати на формування і використання основного і резервного маршрутів між відправниками і одержувачами пакетів. Крім того, необхідно виконати умову

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^k \leq \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \bar{c}_{(i,j)}^k \bar{x}_{(i,j)}^k, \quad (18)$$

щоб основний шлях (мультишлях) або дерево маршрутів (при багатоадресній маршрутизації) завжди був не гірше резервного в рамках обраних метрик.

Третій доданок в цільовій функції (17) відповідав за те, щоб резервний шлях якомога менше відрізнявся за складом каналів і вузлів від основного – в ідеалі лише на проблемний елемент мережі, що підлягав подальшому захисту. Це сприяло тому, що резервуванню підлягали мінімальні обсяги пропускної здатно-

сті каналів зв'язку мережі, що позитивно позначиться на її продуктивності (зростання від 15-20% до 75-125%) та показниках якості обслуговування в цілому. Використання критерію оптимальності (17) дозволило підвищити масштабованість рішень щодо відмовостійкої маршрутизації шляхом скорочення кількості задіяних каналів зв'язку в середньому від 1,2 до 1,7 разів при реалізації схеми захисту вузла і від 1,4 до 1,8 разів при реалізації схеми захисту каналу в залежності від довжини «найкоротшого» шляху, вимірюваного числом каналів, що його утворюють (рис. 1).

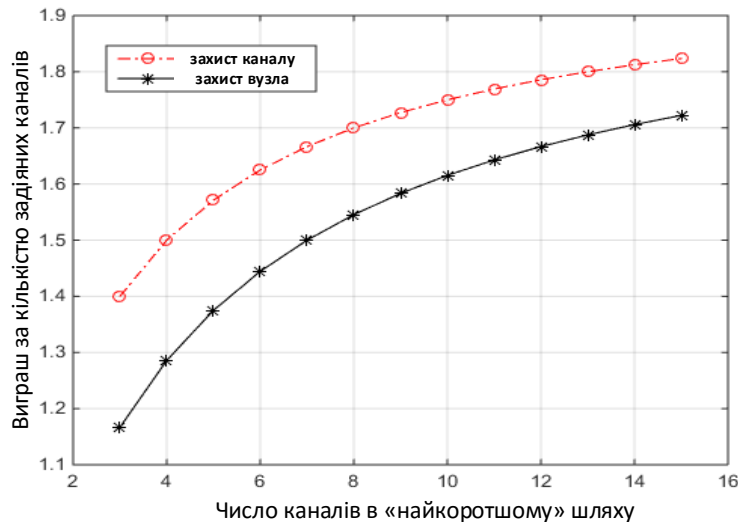


Рис. 1. Виграш за кількістю задіяних каналів, що досягається при реалізації відмовостійкої маршрутизації на основі критерію (17), залежно від числа каналів в «найкоротшому» шляху

У ході дослідження запропонованої моделі при реалізації різних стратегій маршрутизації і схем захисту для різноманітних мережних структур і числа потоків, по-перше, підтверджена її працездатність з точки зору отримання шуканих рішень в реальному часі, по-друге, на ряді числових прикладів продемонстровані переваги запропонованих удосконалень, що стосуються запобігання можливого перевантаження каналів зв'язку, підвищення масштабованості та продуктивності одержаних рішень в цілому. Запропонована модель може бути використана як основа математичного та алгоритмічного-програмного забезпечення при розробці нових протоколів відмовостійкої маршрутизації. Це стосується як реалізації вимог концепції Fast ReRoute в MPLS-мережах, так і модернізації протоколів IP-маршрутизації з погляду надання їм додаткових функцій щодо підвищення відмовостійкості кінцевих рішень.

У четвертому розділі з метою підвищення масштабованості рішень задачі багатоадресної і відмовостійкої маршрутизації запропоновано ієрархічно-координаційний метод, заснований на декомпозиційному поданні отриманих в

другому і третьому розділах поточкових моделей. Це стосувалось перш за все умов запобігання перевантаженню, які прийняли наступну форму:

$$\sum_{k_r \in K} \lambda^{k_r} x_{(i,j)}^{k_r} \leq \varphi_{(i,j)} - \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} \sum_{k_s \in K} \lambda^{k_s} x_{(i,j)}^{k_s}, \quad (19)$$

де  $x_{(i,j)}^{k_r}$  – маршрутні змінні, що характеризували долю інтенсивності  $k$ -го багатоадресного потоку пакетів, що передавався каналом  $(i, j) \in E$  та надходив у мережу через  $r$ -й приграничний маршрутизатор. У векторно-матричній формі умова (19) записувалась у формі:

$$B_r \vec{x}_r \leq D_r \vec{\varphi} - \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s, \quad (20)$$

де  $\vec{x}_r$  – вектор, координатами якого є маршрутні змінні, віднесені до  $r$ -го приграничного маршрутизатора;  $\vec{\varphi}$  – вектор пропускних здатностей каналів зв'язку ТКМ;  $B_r$ ,  $D_r$ ,  $C_{rs}$ , – узгоджуючі матриці, так як розмір векторів  $\vec{x}_r$ ,  $\vec{x}_s$  та  $\vec{\varphi}$ , а також нумерація їх координат в загальному випадку можуть не співпадати.

В основу запропонованого ієрархічно-координаційного методу багатоадресної маршрутизації покладено принцип цільової координації, в рамках якого на нижньому рівні приграничними маршрутизаторами забезпечувався розрахунок шуканих маршрутів для кожного з потоків в ході мінімізації лагранжіану

$$L_r = \vec{x}_r^t H_r \vec{x}_r + \vec{\mu}_r^t (B_r \vec{x}_r - D_r \vec{\varphi} + \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} \vec{\mu}_s^t C_{sr} \vec{x}_s), \quad (21)$$

при наявності умов-обмежень (3)-(8), (10), (11)-(14), (18), записаних в декомпозиційній формі, де  $\vec{\mu}_r$  – вектори множників Лагранжа, що віднесені до кожної з умов (20),  $H_r$  – діагональна матриця маршрутних метрик каналів зв'язку ТКМ.

Основним завданням *верхнього рівня* є координація рішень, отриманих на нижньому рівні, з метою недопущення перевантаження каналів зв'язку (20) шляхом модифікації векторів множників Лагранжа в ході виконання градієнтної ітераційної процедури:

$$\vec{\mu}_r(\alpha + 1) = \vec{\mu}_r(\alpha) + \nabla \vec{\mu}_r, \quad (22)$$

де  $\alpha$  – номер координуючої ітерації;  $\nabla \vec{\mu}_r$  – градієнт функції (22), який розраховується виходячи з отриманих на нижньому рівні результатів розв'язання задач маршрутизації  $\vec{x}_r^*$  ( $M_r \in M$ ) на кожному конкретному приграничному вузлі:

$$\left. \nabla \mu_r(x) \right|_{x = x^*} = B_r \vec{x}_r^* - D_r \vec{\varphi} + \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s^*. \quad (23)$$

Відповідно до виразів (19)-(23) на рис. 2 показано загальну схему ієрархічно-координаційного методу багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі.

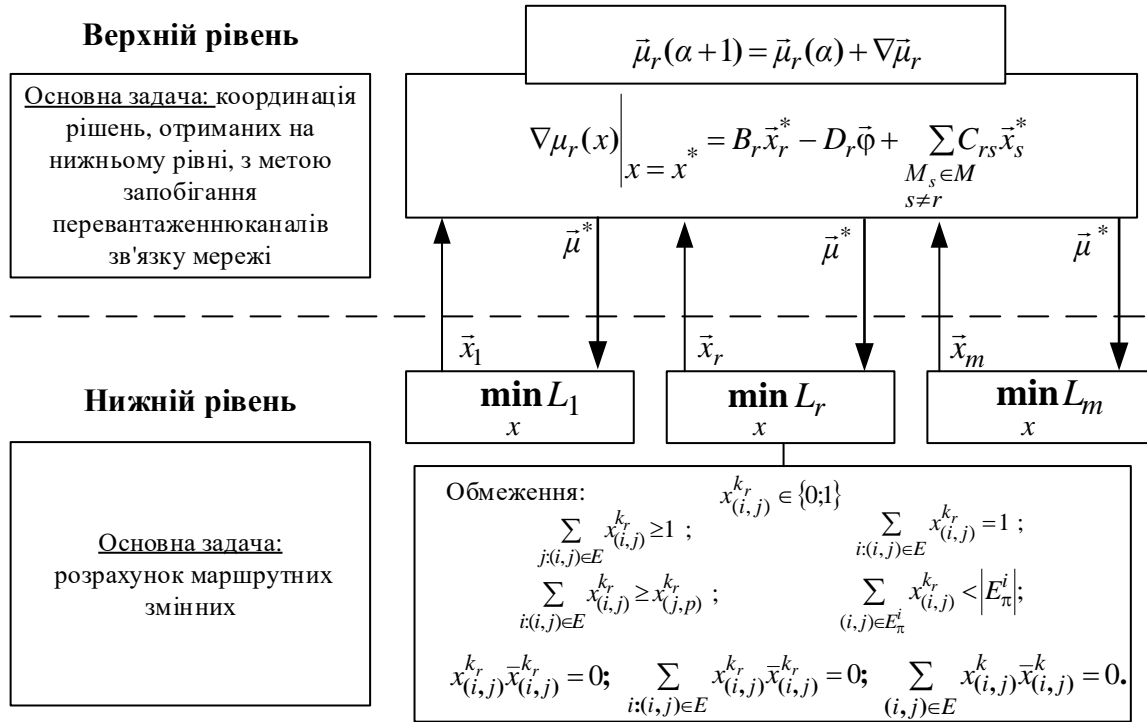


Рис. 2. Загальна схема ієрархічно-координаційного методу багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі

Проведено аналіз запропонованого методу з метою перевірки (доказу) збіжності методу до оптимального рішення, кількісної оцінки числа ітерацій координаційної процедури (22), (23) і визначення ступеня впливу структурних та функціональних параметрів мережі і характеристик циркулюючих в ній потоків на збіжність даної процедури. На числових прикладах продемонстровано роботу ієрархічно-координаційного методу багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації, що дозволило проаналізувати вплив особливостей мережної структури і завантаженості мережі на збіжність координаційної процедури (22), (23). Встановлено, що як правило, при завантаженості мережі до 70-75% координація не була потрібна, тому розподілений розрахунок багатоадресних шляхів кожним з прикордонних маршрутизаторів не призводив до перевантаження каналів зв'язку ТКМ. При більшій завантаженості мережі процес координації носив ітераційний характер і схилювався за кінцеве число кроків (від 1 до 11).

У ході дослідження встановлено, що число ітерацій координуючої процедури (22), (23) істотно залежить від числа потоків, які формують одне й те ж навантаження на мережу. З ростом кількості потоків число ітерацій скорочується в середньому в 2-3 рази, що особливо характерно для середніх і високих навантажень на мережу. Крім того, експериментальним шляхом встановлено, що ієрар-

хічно-координаційна багатоадресна маршрутизація, реалізована в рамках методу (рис. 2), забезпечувала оптимальність одержаних рішень, досить близьких (до 10-12%) до результатів централізованої багатоадресної маршрутизації. Пошук глобального оптимуму, що досягається при централізованій маршрутизації, приводив до додаткових (але не викликаних технологічними вимогами) ітерацій, число яких могло становити від 15 до 23% від мінімально необхідних.

При практичній реалізації запропонованого методу багатоадресної маршрутизації в сучасних ТКМ функції координації рішень, отриманих на прикордонних маршрутизаторах мережі, можуть бути покладені або на один з мережних маршрутизаторів (за аналогією з призначеним в IP-мережі маршрутизатором (Designated Router, DR)), або на сервер маршрутів мережної операційної системи в ході функціонування програмно-конфігурованої мережі (Software-defined Networking, SDN).

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка пов'язана з оптимізацією процесів багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах шляхом розробки відповідних математичних моделей та методів для підвищення продуктивності і масштабованості ТКМ в цілому. За результатами розв'язання поставленої задачі можна зробити ряд важливих висновків.

1. В ході проведеного аналізу встановлено, що відомі технологічні та протокольні рішення щодо багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації не забезпечують задоволення вимог, що висувуються до перспективних рішень в цій області. Тому більшість передових концепцій і технологій, таких як Traffic Engineering (TE), Fast IGP Convergence, Fast ReRoute та ін., не можуть повною мірою реалізувати потенціал закладених в них можливостей, пов'язаних з підвищенням якості обслуговування і масштабованості в ТКМ. Встановлено, що причина цього полягає в недосконалості математичних моделей та методів, закладених в протоколи маршрутизації, механізми управління чергами та ін. На жаль, в сучасних маршрутних протоколах переважно використовуються графові моделі та методи пошуку найкоротшого шляху, в рамках яких досить складно, а в більшості випадків і неможливо врахувати вимоги системного характеру, що пред'являються до рішень з багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. Ці моделі не забезпечують в належній мірі облік характеристик циркулюючих в мережі потоків пакетів, не дозволяють зробити керованим процес боротьби з перевантаженням каналів зв'язку, ускладнюють реалізацію основних схем захисту елементів мережі, спрямованих на підвищення рівня відмовостійкості маршрутних рішень.



2. Вперше запропоновано потокову модель багатоадресної маршрутизації в мультисервісній ТКМ, яка також охоплює випадок маршрутизації широкомовних потоків. Новизна моделі полягає в тому, що врахування потокового (мультипотокowego) характеру сучасного мережного трафіка здійснено за рахунок представлення моделі системою лінійних рівнянь стану завантаженості і запобігання перевантаженню каналів зв'язку. Використання моделі дозволило оптимізувати процес багатоадресної та широкомовної маршрутизації множини потоків на підставі розрахунку маршрутних змінних в ході розв'язання задач булевого або змішаного цілочисельного лінійного програмування.

3. Отримала подальший розвиток потокова модель відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі, в рамках якої формалізовані умови реалізації основних схем резервування елементів мережі: захисту вузла, каналу, маршруту та їх пропускних здатностей. Новизна моделі полягає, по-перше, в отриманні умов запобігання перевантаженню каналів зв'язку, за якими, в загальному випадку, одночасно можуть протікати потоки як основних, так і резервних маршрутів, що дозволило в ході реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації запобігти перевантаженню каналів зв'язку навіть у випадку, якщо тільки деякі потоки будуть перемикатися з основних шляхів на резервні. По-друге, в модифікації цільової функції, що підлягає мінімізації, шляхом введення квадратичного члена, відповідального за те, щоб резервний шлях якомога менше відрізнявся від основного за складом каналів і вузлів – в ідеалі лише на проблемний елемент мережі, що підлягає подальшому захисту.

4. Використання вдосконаленої моделі відмовостійкої маршрутизації сприяло тому, що резервуванню підлягали мінімальні обсяги пропускної здатності каналів зв'язку мережі, що позитивно позначиться на її продуктивності (зростання від 15-20% до 75-125%), а також дозволило підвищити масштабованість рішень щодо відмовостійкої маршрутизації шляхом скорочення числа задіяних каналів зв'язку в середньому від 1,2 до 1,7 разів при реалізації схеми захисту вузла і від 1,4 до 1,8 разів при реалізації схеми захисту каналу в залежності від довжини «найкоротшого» шляху, вимірюваного числом КЗ, що його утворюють.

5. Отримав подальший розвиток ієрархічно-координаційний метод багатоадресної і відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі, заснований на декомпозиційному поданні поточкових моделей багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. Новизна методу полягає в тому, що він, ґрунтуючись на принципі цільової координації, дозволяє реалізувати ієрархічно-координаційну маршрутизацію не тільки одноадресних, але й багатоадресних, а також широкомовних потоків. Використання в методі принципу цільової координації дозволило відмовитися від централізації розрахунків, наділити функціями маршрутизації

всі прикордонні маршрутизатори, і в кінцевому підсумку підвищити масштабованість рішень щодо багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації.

6. Результати аналізу запропонованого методу, який проводився з метою перевірки збіжності методу до оптимального рішення, підтвердили працездатність методу та його ефективність з точки зору підвищення масштабованості кінцевих рішень щодо багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації. Досліджено вплив структури мережі, кількості та характеристик потоків на збіжність методу. Встановлено, що як правило, при завантаженості мережі до 70-75% координація не була потрібна, тому розподілений розрахунок багатоадресних шляхів кожним з прикордонних маршрутизаторів не призводив до перевантаження каналів зв'язку ТКМ. При більшій завантаженості мережі процес координації носив ітераційний характер і сходився за кінцеве число кроків (від 1 до 11). З ростом кількості потоків число ітерацій скорочується в середньому в 2-3 рази, що особливо характерно для середніх і високих навантажень на мережу. Крім того, експериментальним шляхом встановлено, що ієрархічно-координаційна багатоадресна маршрутизація, реалізована в рамках запропонованого методу, забезпечувала оптимальність одержаних рішень, досить близьких (до 10-12%) до результатів централізованої багатоадресної маршрутизації.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Лемешко А.В. Поточковые модели многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях [Електронний ресурс] / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Проблеми телекомунікацій. – 2013. – № 1 (10). – С. 38 - 45. – Режим доступу до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131\\_lemeshko\\_multicast.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_lemeshko_multicast.pdf).
2. Лемешко А.В. Модель отказоустойчивой маршрутизации многоадресных и широковещательных потоков в MPLS-сети / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Системи обробки інформації. – 2013. – №9 (116). – С. 160 - 163.
3. Лемешко А.В. Особенности математического описания процессов многоадресной маршрутизации потоковыми моделями / А.В. Лемешко, К. Арус // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, часть I. – Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2014. – С. 94-98.
4. Арус К. Предотвращение перегрузки каналов связи при реализации отказоустойчивой маршрутизации в телекоммуникационной сети / К. Арус, А.С. Еременко // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, часть I. – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2015. – С. 42–46.
5. Лемешко А.В. Анализ сходимости координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации в телекоммуникационной сети [Елект-

ронний ресурс] / А.В. Лемешко, Е.С. Невзорова, К.М. Арус // Проблемы телекоммуникаций. – 2015. – № 1 (16). – С. 54-71. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151\\_lemeshko\\_coordination.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_lemeshko_coordination.pdf).

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

7. Лемешко А.В. Поточковая модель многоадресной маршрутизации / А.В. Лемешко, Кинан Моххамед Арус. // Материалы 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМи-Ко'2013), Севастополь, 8-13 сентября 2013 г., в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. Т.1. – С. 523-524.

8. Лемешко А.В. Модель отказоустойчивой маршрутизации многоадресных потоков в телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии (PIC S&T-2013): Сборник научных трудов первой международной научно-практической конференции, Харьков 9-11 октября 2013 г. / Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – С. 157-160.

9. Лемешко А.В. Повышение отказоустойчивости решений задач многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Труды Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC – 2013), часть 5, 2 – 6 декабря 2013 г. – Москва. – С. 91-94.

10. Лемешко А.В. Повышение надежности системы многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Сборник научных трудов II Международной конференции «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», в 4т. Т.1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 124-127.

11. Arous K.M. Analysis of Fast ReRoute Model For Multicast And Broadcast Flows in MPLS Network / K.M. Arous, A.A. Romanyuk, N.A. Korolyuk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference TCSET'2014. – Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 - March 1, 2014: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2014. – P. 97-99.

12. Арус К.М. Нелинейная модель отказоустойчивой маршрутизации потоков в транспортной MPLS-сети / К.М. Арус, А.К. Хасан, А.А. Романюк // Материалы XVIII Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Т.4. Международная конференция «Перспективы развития телекоммуникационных и информационно-измерительных технологий». ХНУРЭ, 14-16 апреля 2014 г. – Харьков: ХНУРЭ. – С. 13-14.

13. Lemeshko O. Fast ReRoute Model for Different Backup Schemes in MPLS-Network / O. Lemeshko, K. Arous // Proceedings of First International IEEE Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PICS&T-2014). – Kharkiv, Ukraine: 14-17 October, 2014. – PP. 39-41.

14. Лемешко О.В. Боротьба з перевантаженням телекомунікаційної мережі в умовах реалізації відмовостійкої маршрутизації мультитотокового трафіка / О.В. Лемешко, К.М. Арус, Н. Тарікі // Матеріали 69-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів. Частина II. 5 - 7 грудня 2014 року. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – С. 50-53.

15. Лемешко О.В. Модель відмовостійкої маршрутизації з реалізацією різних схем резервування ресурсів мережі в умовах мультитотокового трафіку / О.В. Лемешко, К.М. Арус // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014» СПТЕЛ – 2014. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2014. – С. 15-20.

16. Лемешко А.В. Модель отказоустойчивой маршрутизации для различных схем резервирования сетевых ресурсов / А.В. Лемешко, К.М. Арус // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, INTERMATIC-2014», 1–5 декабря 2014 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА, 2014, часть 1. – С. 221-224.

17. Lemeshko O. Multicast Fast Re-Route Schemes for Multiflow Case / O. Lemeshko, Kinan Arous, Mohammed A.jabbar A.wahhab // Proceedings of XIII<sup>th</sup> International IEEE conference «The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics», CADSM'2015, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. – P. 422-424.

18. Арус К.М. Обеспечение масштабируемости решений по отказоустойчивой маршрутизации в телекоммуникационных сетях / К.М. Арус, А.С. Еременко // 19-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Т. 4. – Харьков: ХНУРЭ. – 2015. – С. 29 – 30.

19. Лемешко А.В. Обеспечение отказоустойчивости решений по многоадресной маршрутизации в телекоммуникационной сети в условиях передачи мультитотокового трафика / А.В. Лемешко, К.М. Арус, А.С. Еременко // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: Збірник матеріалів конференції. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 146 – 148.

20. Еременко А.С. Модель отказоустойчивой маршрутизации с поддержкой масштабируемости решений в телекоммуникационных сетях / А.С. Еременко, К.М. Арус, Н. Тарики // Тези доповідей четвертої міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми інформатизації", 9-10 квітня 2015 року. – Київ: ДУТ, 2015. – С. 33.

21. Арус К.М. Підвищення масштабованості рішень щодо відмовостійкості маршрутизації в телекомунікаційних мережах військового призначення / К.М. Арус, О.С. Єременко // Тези доповідей одинадцятої наукової конференції Харківського університету повітряних сил імені Івана Кожедуба, 8-9 квітня 2015 року. – Х: ХУПС. – С. 55.

22. Патент на корисну модель 99837 Україна, МПК G06G 3/00 (2015.01). Спосіб відмовостійкої маршрутизації мультипотокowego трафіку з підтримкою різних схем резервування мережних ресурсів / О.В. Лемешко, К.М. Арус, Т.В. Вавенко; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201500068. Заявл. 05.01.2015, Опубл. 25.06.2015. Бюл. №12.

## АНОТАЦІЯ

**Арус Кінан Мохамад.** Потоківі моделі та метод багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі, яка пов'язана з оптимізацією процесів багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах шляхом розробки відповідних математичних моделей і методів для підвищення продуктивності і масштабованості ТКМ в цілому. Вперше запропоновано поточкову модель багатоадресної маршрутизації в мультисервісній ТКМ. Використання моделі дозволило оптимізувати процес багатоадресної і ширококомовної маршрутизації множини потоків. Отримала подальший розвиток потокова модель відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі. Новизна моделі полягає в отриманні умов запобігання перевантаження каналів зв'язку, за якими, в загальному випадку, одночасно можуть протікати потоки як основних, так і резервних маршрутів, що дозволило в ході реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації запобігти перевантаженню каналів зв'язку навіть у випадку, якщо тільки деякі потоки будуть перемикатися з основних шляхів на резервні. Отримав подальший розвиток ієрархічно-координаційний метод багатоадресної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційній мережі. Новизна методу полягає в тому, що він дозволяє реалізувати ієрархічно-координаційну маршрутизацію не тільки одноадресних, але й багатоадресних/широкомовних потоків та забезпечує підвищення масштабованості кінцевих рішень.

**Ключові слова:** мережа, маршрутизація, відмовостійкість, модель, метод, трафік, потік, оптимальність, пропускна здатність, масштабованість.

## АННОТАЦИЯ

**Арус Кинан Мохамад.** Поточковые модели и метод многоадресной и отказоустойчивой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи, связанной с оптимизацией процессов многоадресной и отказоустойчивой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС) путем разработки соответствующих математических моделей и методов для повышения производительности и масштабируемости ТКС в целом.

Впервые предложена потоковая модель многоадресной маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети, которая также охватывает случай маршрутизации широковещательных потоков. Новизна модели состоит в том, что учет потокового (мультипоточкового) характера современного сетевого трафика осуществлен за счет представления модели системой линейных уравнений состояния загруженности и предотвращения перегрузки каналов связи. Использование модели позволило оптимизировать процесс многоадресной и широковещательной маршрутизации множества потоков на основании расчета маршрутных переменных в ходе решения задачи булевого или смешанного целочисленного линейного программирования.

Получила дальнейшее развитие потоковая модель отказоустойчивой маршрутизации в телекоммуникационной сети, в рамках которой формализованы условия реализации основных схем резервирования элементов сети: защиты узла, канала, маршрута и их пропускных способностей. Новизна модели заключается, во-первых, в получении условий предотвращения перегрузки каналов связи, по которым, в общем случае, одновременно могут протекать потоки как основных, так и резервных маршрутов, что позволило в ходе реализации как однопутевой, так и многопутевой маршрутизации предотвратить перегрузку каналов связи даже в случае, если только некоторые потоки будут переключаться из основных путей на резервные. Во-вторых, в модификации подлежащей минимизации целевой функции путем введения квадратичного члена, отвечающего за то, чтобы резервный путь как можно меньше отличался по составу каналов и узлов от основного – в идеале лишь на проблемный элемент сети, который необходимо защитить.

Использование усовершенствованной модели отказоустойчивой маршрутизации способствовало тому, что резервированию подлежали минимальные объемы пропускной способности каналов связи сети, что положительно сказа-

лось на ее производительности (рост от 15-20% до 75-125%), а также позволило повысить масштабируемость решений по отказоустойчивой маршрутизации путем сокращения числа задействованных каналов связи в среднем от 1,2 до 1,7 раз при реализации схемы защиты узла и от 1,4 до 1,8 раз при реализации схемы защиты канала в зависимости от длины «кратчайшего» пути, измеряемого числом образующих его каналов связи.

Получил дальнейшее развитие иерархическо-координационный метод многоадресной и отказоустойчивой маршрутизации в телекоммуникационной сети, основанный на декомпозиционном представлении потоковых моделей многоадресной и отказоустойчивой маршрутизации. Новизна метода заключается в том, что он, основываясь на принципе целевой координации, позволяет реализовать иерархическо-координационную маршрутизацию не только одноадресных, но и многоадресных, а также широковещательных потоков. Использование в методе принципа целевой координации позволило отказаться от централизации расчетов, наделить функциями маршрутизации все приграничные маршрутизаторы, и в конечном итоге повысить масштабируемость решений по многоадресной и отказоустойчивой маршрутизации.

Результаты анализа предложенного метода, который проводился с целью проверки сходимости метода к оптимальному решению, подтвердили его работоспособность и эффективность с точки зрения повышения масштабируемости конечных решений по многоадресной и отказоустойчивой маршрутизации. Исследовалось влияние структуры сети, количества и характеристик потоков по сходимости метода. Установлено, что как правило, при загрузенности сети до 70-75% координация не требовалась, так как распределенный расчет многоадресных путей каждым из приграничных маршрутизаторов не приводил к перегрузке каналов связи ТКС. При большей загрузенности сети процесс координации носил итерационный характер и сходился за конечное число шагов (от 1 до 11). С ростом количества потоков число итераций сокращается в среднем в 2-3 раза, что особенно характерно для средних и высоких нагрузок на сеть. Кроме того, экспериментальным путем установлено, что иерархическо-координационная многоадресная маршрутизация, реализованная в рамках метода, обеспечивала оптимальность получаемых решений, достаточно близких (до 10-12%) к результатам централизованной многоадресной маршрутизации.

**Ключевые слова:** сеть, маршрутизация, отказоустойчивость, модель, метод, трафик, поток, оптимальность, пропускная способность, масштабируемость.

## ABSTRACT

**Arous Kinan Mohamad.** Flow-based models and method for multicast and fault-tolerant routing in multiservice telecommunication networks. – Manuscript. Dissertation for candidate of technical sciences degree in specialty 05.12.02 – telecommunication systems and network. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2015.

Dissertation is devoted to solving actual scientific problem associated with optimization process of multicast and fault-tolerant routing in multiservice telecommunication networks (TCN) by developing appropriate mathematical models and methods to improve performance and scalability of TCN as a whole. It was firstly proposed the flow-based model for multicast routing in multiservice TCN, which also includes the case for broadcast flows routing. Using the model allowed to optimize the process of multicast and broadcast routing set of flows. It was further developed the flow-based model of fault-tolerant routing in telecommunication network. The novelty of the model is in obtaining conditions for overload prevention of communication links, which, in general, can include both primary and backup paths used for flows transmission, which enabled during implementation both single path and multipath routing overload prevention of communication links even if only some of the flows will switch from primary to backup paths. It was further developed hierarchical method with coordination of multicast and fault-tolerant routing in telecommunication network. The novelty of the method is that it allows realization of hierarchical routing with coordination not only for unicast, but also for multicast/broadcast flows and provides increase of scalability final solutions.

**Keywords:** network, routing, fault tolerance, model, method, traffic, flow, optimality, bandwidth, scalability.