

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МЕРСНІ АМАЛЬ

УДК 621.391

**МОДЕЛІ ТА МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ
В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ ПРИ
РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТА
РЕЗЕРВУВАННЯ РЕСУРСІВ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
ПОШТАРЕНКО Віктор Михайлович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
доцент кафедри систем інформації.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЛЕМЕШКО Олександр Віталійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри інфокомунікаційної інженерії;

кандидат технічних наук, доцент
РВАЧОВА Наталія Володимирівна,
Validation & Commercial Grade Dedication Department
ПАО НПП «Радікс»,
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться « 4 » жовтня 2017 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

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

Автореферат розісланий « 1 » вересня 2017 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Б. Ткачова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні телекомунікаційні мережі (ТКМ) мають досить широкі можливості з точки зору підтримки мультисервісу та забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS), які, як правило, засновані на оптимальному використанні доступного мережного ресурсу: пропускну здатності каналів зв'язку та маршрутів у цілому. За розв'язання цих задач в ТКМ відповідають протоколи маршрутизації, розподілу та резервування мережних ресурсів, що є складовими архітектурних моделей диференційованих (DiffServ) та інтегрованих (IntServ) послуг.

Як показав проведений аналіз сучасні технологічні рішення в цій області мають суттєві недоліки: існуючі протоколи забезпечують реалізацію багатошляхової маршрутизації з автоматичним балансуванням навантаження лише за маршрутами з однаковою метрикою; при формуванні маршрутних метрик враховуються номінальні, а не реальні значення функціональних параметрів мережних елементів, в технологіях IP/MPLS протоколи резервування ресурсів працюють не узгоджено з протоколами маршрутизації, протокол маршрутизації обирає шлях, який не обов'язково містить необхідний об'єм мережного ресурсу.

Ефективність протокольних рішень щодо маршрутизації та резервування ресурсів багато в чому визначається змістом математичних моделей та методів, які покладені в їх основу. Проблематикою, яка присвячена вдосконаленню та розробці нових математичних моделей та методів маршрутизації та резервування ресурсів, займаються багато закордонних та вітчизняних вчених, а саме Gallager R.G., Lee G.M., Vutukury S., Seok Y., Wang Y., Wang Z., Вишневський В.М., Романов О.І., Романюк В.А., Лемешко О.В., Євсєєва О.Ю. та інші.

Виходячи з аналізу існуючого стану зазначеної проблеми, до основних вимог, що висувуються до перспективних рішень в цій галузі, перш за все відносять: забезпечення збалансованого завантаження доступного мережного ресурсу, заснованого на реалізації багатошляхової маршрутизації та орієнтованого на покращення рівня QoS; детальне врахування особливостей структурної та функціональної побудови ТКМ при формуванні маршрутних метрик; підвищення масштабованості рішень щодо резервування мережного ресурсу, направлено на мінімізацію використання пропускну здатності каналів зв'язку мережі; орієнтація на потокові методи; підвищення рівня погодженості рішень щодо маршрутизації та резервування мережного ресурсу при забезпеченні QoS.

Тому актуальною науковою задачею є оптимізація процесів балансування навантаження в телекомунікаційних мережах при розв'язанні задач маршрутизації та резервування ресурсів шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей та методів з метою підвищення якості обслуговування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження проводились у відповідності з наступними програмами та нормативними документами: Закон України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки» від 09.01.2007 р., №537-V, Закон України «Про телекомунікації» від 18.11.2003 р., №1280-IV, Державна науково-технічна програма «Створення перспективних телекомунікаційних систем і технологій», планами наукової, науково-технічної діяльності Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Мета досліджень полягає у підвищенні якості обслуговування в телекомунікаційних мережах на основі удосконалення процесів балансування навантаження. У дисертаційній роботі розв'язані такі окремі **задачі дослідження**: аналіз протокольних рішень щодо маршрутизації та резервування мережних ресурсів в ТКМ; огляд відомих теоретичних підходів, моделей та методів маршрутизації та резервування мережних ресурсів в ТКМ; розробка потокової моделі та методу багатошляхової багатоадресної маршрутизації в ТКМ; розробка математичної моделі маршрутизації багатоадресних потоків в напрямку підтримки спільного явного резервування каналного ресурсу; удосконалення моделі балансування навантаження при багатошляховій маршрутизації в телекомунікаційних мережах з неоднорідною архітектурою; дослідження ефективності запропонованих у дисертації рішень щодо маршрутизації та резервування мережних ресурсів в ТКМ; розробка рекомендацій щодо практичного використання отриманих в роботі результатів в сучасних і перспективних ТКМ.

Об'єкт дослідження: процеси маршрутизації та резервування мережних ресурсів з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах.

Предмет дослідження: моделі та метод маршрутизації та резервування мережних ресурсів з балансуванням навантаження в ТКМ.

Методи дослідження. В ході розробки та вдосконалення математичних моделей маршрутизації та резервування мережних ресурсів з балансуванням навантаження було використано елементи теорії графів, теорії множин і методи математичного програмування. При розробці дворівневого методу багатошляхової багатоадресної маршрутизації використано елементи теорії оптимальних ієрархічних багаторівневих систем. Для оцінки ефективності отриманих рішень використано пакет MatLab та методи лабораторного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримала подальший розвиток потокова модель багатоадресної маршрутизації в телекомунікаційній мережі. Новизна моделі полягає в тому, що для реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації кожен з багатоадресних потоків керовано розбивався на множину підпотоків, для кожного з яких розраховувався свій окремий багатоадресний шлях. Це дозволило зменшити заванта-

женість мережі в цілому на підставі узгодження рішень щодо розрахунку багатоадресних шляхів та балансування між ними навантаження.

2. Вперше запропоновано метод багатошляхової багатоадресної маршрутизації. Новизна методу полягає у введенні дворівневої ієрархії розрахунків: на нижньому рівні визначались маршрутні змінні, які відповідали за формування багатоадресних шляхів для кожного з підпотоків, на які розбивався вихідний потік пакетів; на верхньому рівні розраховувались потокові змінні, які визначали оптимальний порядок балансування навантаження за розрахованими на нижньому рівні багатоадресними маршрутами. Застосування методу дозволяє знизити обчислювальну складність реалізації багатошляхової багатоадресної маршрутизації на підставі переходу від розв'язання нелінійної оптимізаційної задачі до послідовності менш складних та розмірних задач лінійної оптимізації.

3. Отримала подальший розвиток математична модель маршрутизації багатоадресних потоків в напрямку підтримки спільного явного резервування каналного ресурсу. Новизна моделі полягає, по-перше, в забезпеченні погодженого розв'язання задач багатоадресної маршрутизації та резервування каналного ресурсу, а по-друге, в модифікації системи умов щодо запобігання перевантаження каналів зв'язку при здійсненні спільного явного резервування, при якому каналний ресурс виділявся одночасно декільком багатоадресним потокам, перелік яких задавався в явному вигляді. Це дозволило знизити об'єми використаної пропускної здатності каналів зв'язку при організації спільного явного резервування мережних ресурсів.

4. Удосконалено модель балансування навантаження при багатошляховій маршрутизації в телекомунікаційних мережах з неоднорідною архітектурою. Новизна моделі полягає в модифікації критерію оптимальності маршрутних рішень, який орієнтований на забезпечення як мінімальної завантаженості мережі в цілому, так і окремих каналів зв'язку. Це дозволило покращити якість обслуговування за показником середньої затримки пакетів в телекомунікаційній мережі, яка мала структурну або функціональну неоднорідність архітектури, що проявлялось в тім, що структура мережі могла бути представленою роздільним графом та (або) містила розріз, який мав значно меншу пропускну здатність, порівняно з іншими розрізами.

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, а також належним аналітичним і числовим обґрунтуванням прийнятих наближень і ясним фізичним трактуванням отриманих результатів дослідження.

Практична значимість дисертаційної роботи. Розроблені математичні моделі та метод можуть бути покладені в основу алгоритмічного та програмного забезпечення маршрутизаторів ТКМ у вигляді перспективних протоколів маршрутизації та резервування мережних ресурсів. Практична значимість отриманих результатів дисертації також підтверджується їх застосуванням у навчальному процесі кафедри систем інформації Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Особистий вклад здобувача. Всі наукові результати, що запропоновані в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [1] дисертантом розроблена та досліджена імітаційна модель мережі IP/MPLS із застосуванням середовища Network Simulator з порівнянням характеристик продуктивності мережі з традиційним розподілом навантаження в IP/MPLS мережах; в статті [2] здобувач проаналізувала рівень забезпечення якості обслуговування в MPLS-мережах з використанням технологій балансування та прогнозування трафіка в рамках пакету OPNET; в статті [3] проведено порівняльний аналіз використання різних критеріїв оптимальності процесу балансування навантаження в ТКМ з неоднорідною архітектурою та їх вплив на значення міжкінцевої затримки пакетів; в роботі [4] запропоновано комплексний критерій оптимальності процесу балансування навантаження в ТКМ з неоднорідною архітектурою, представлених роздільним графом; в статті [5] автор розробила та дослідила модель маршрутизації багатоадресних потоків з підтримкою спільного явного резервування каналного ресурсу; в роботі [6] дисертантом запропоновано метод збалансованого спільного явного резервування каналного ресурсу при реалізації багатоадресної маршрутизації; в статті [7] здобувач запропонувала та дослідила нелінійну модель багатошляхової багатоадресної маршрутизації в телекомунікаційній мережі; в роботі [8] дисертант розробила дворівневий метод багатошляхової маршрутизації багатоадресних потоків в ТКМ.

Апробація. Основні результати дисертації доповідалися та були схвалені на четвертій Міжнародній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (Полтава-Баку-Белгород-Кіровоград-Харків, 2013); Міжнародній науковій конференції MicroCAD (НТУ "ХПИ", 2014-2015); 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (Polyana-Svalyava, Ukraine 2017); II Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2017); науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика» (Суми: Сумський державний університет, 2017); IX Міжнародній науково-технічній конференції студентів та аспірантів «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем» ПРІТС

2017 (Київ, НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2017); конференції «Перспективи розвитку телекомунікаційних та інформаційно-вимірювальних технологій» 21-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка у XXI столітті», ММФ2017 (Харків, ХНУРЕ, 2017); 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON (Kyiv, Ukraine, 2017).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковано у 19 наукових працях: одна стаття у закордонному фаховому журналі [6], сім статей у фахових науково-технічних журналах та збірках наукових праць [1-5, 7, 8]. Апробація результатів дисертації проходила в ході одинадцяти доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях [9-19], з них дві апробації на конференціях [14, 19], які проходили під егідою IEEE та індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та одного додатку. Загальний обсяг роботи становить 160 сторінок, у тому числі 150 сторінки основного тексту, 35 рисунків та 19 таблиць. Список використаних джерел містить 105 найменувань, викладених на 11 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** проведено загальний аналіз стану проблеми щодо балансування навантаження в ТКМ при розв'язанні задач маршрутизації та резервування ресурсів, обґрунтовано актуальність теми дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, зазначено мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення результатів, які отримані у дисертаційній роботі.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу основ побудови та функціонування сучасних мультисервісних ТКМ зазначено, що при забезпеченні заданого рівня QoS особлива увага приділяється підвищенню ефективності процесів балансування навантаження при розв'язанні задач маршрутизації та резервування мережних ресурсів. Встановлено, що до основних недоліків існуючих технологічних рішень щодо маршрутизації та резервування ресурсів варто віднести досить обмежені можливості щодо автоматичного балансування навантаження, особливо за шляхами з різними метриками; низький рівень врахування особливостей структурної побудови ТКМ; відсутність погодженості в розв'язанні зазначених мережних задач, що призводить до зниження ефективності використання мережних ресурсів та рівня QoS.

Зазначено, що найбільш дієвим напрямком підвищення ефективності протокольних рішень щодо балансування навантаження є вдосконалення математичних моделей маршрутизації та резервування мережних ресурсів. При цьому перспективні моделі та методи повинні носити потоковий характер, більш пов-

но враховувати особливості структури ТКМ, а також бути націленими на оптимізацію та погоджене розв'язання задач щодо маршрутизації та резервування мережних ресурсів з метою підвищення рівня якості обслуговування. Сформульовано до розв'язання актуальну наукову задачу щодо оптимізації процесів балансування навантаження в телекомунікаційних мережах при розв'язанні задач маршрутизації та резервування ресурсів шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей та методів з метою підвищення рівня QoS.

У **другому розділі** з метою забезпечення оптимального балансування навантаження в телекомунікаційній мережі вдосконалена потокова модель багатоадресної маршрутизації в напрямку реалізації багатошляхової стратегії передачі пакетів. Структура ТКМ була представлена орієнтованим зваженим графом $G = (V, E)$. Тоді $V = \{v_1, \dots, v_i, \dots, v_m\}$ – множина вершин, яка моделює маршрутизатори ТКМ; E – множина дуг графа, що описує канали зв'язку мережі. Для кожної дуги вводиться її вага $\varphi(i, j)$, яка характеризує пропускну здатність відповідного каналу зв'язку. Тоді число каналів в мережі визначається як $|E| = n$. Нехай K – множина багатоадресних потоків пакетів, що циркулюють в мережі; $|K| = \bar{K}$ – загальна кількість потоків в мережі; r_k – середня пакетна швидкість (інтенсивність) k -го потоку на вході до мережі, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с); s_k – маршрутизатор-джерело пакетів k -го потоку ($k \in K$);

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

– множина маршрутизаторів-одержувачів пакетів для k -го потоку; m_k – загальне число таких маршрутизаторів-одержувачів.

Новизною моделі є те, що для реалізації багатошляхової маршрутизації пропонується вихідний багатоадресний потік розбивати на множину підпотоків, для кожного з яких будується оптимальне дерево – багатоадресний маршрут. Тобто на прикордонному маршрутизаторі s_k кожен з багатоадресних потоків буде керовано розділено на ряд підпотоків загальною кількістю w_k . Тоді кожен p -й підпотік k -го потоку буде мати середню інтенсивність (1/с)

$$z_k^p = y_k^p \cdot r_k, \quad (2)$$

де y_k^p – множина керуючих поточкових змінних, кожна з яких характеризує долю k -го потоку, яка створює p -й підпотік. На ці змінні накладаються умови:

$$0 \leq y_k^p \leq 1, \quad (3)$$

$$\sum_{p=1}^{w_p} y_k^p = 1. \quad (4)$$

Потокові змінні визначають порядок балансування навантаження за множиною багатоадресних шляхів. Для визначення маршруту для кожного p -го підпотіку k -го потоку необхідно розрахувати множину булевих змінних виду

$$x_{(i,j)}^{p,k} \in \{0;1\}. \quad (5)$$

При цьому маршрутна змінна $x_{(i,j)}^{p,k}$ дорівнює одиниці, якщо p -й підпотік k -го потоку протікає каналом $(i,j) \in E$, і нулю – в іншому випадку. Для забезпечення доставки пакетів p -го підпотіку k -го багатоадресного потоку до всіх маршрутизаторів-одержувачів вводяться умови виду

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^{p,k} = 1 \quad \text{при } v_j \in d_k^*. \quad (6)$$

Для маршрутизатора-джерела k -го потоку також необхідно ввести умову

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^{p,k} \geq 1 \quad \text{при } v_i = s_k, \quad (7)$$

виконання якого дозволяє джерелу відправляти пакети p -го підпотіку k -го потоку на декілька сусідніх маршрутизаторів, але не менше, ніж на один.

З метою забезпечення зв'язності багатоадресних маршрутів для кожного g -го інтерфейсу транзитного маршрутизатора $v_j \in V$ вводяться такі умови:

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^{p,k} \geq x_{(j,g)}^{p,k} \quad \text{при } v_j \notin s_k. \quad (8)$$

Для виключення можливості створення петель вводяться умови

$$\sum_{(i,j) \in E_\pi^q} x_{(i,j)}^{p,k} < |E_\pi^q|, \quad (9)$$

де E_π^q – множина дуг графа, що створюють q -й контур (π); $|E_\pi^q|$ – кількість дуг в q -м контурі графа. З метою запобігання перевантаженню каналів зв'язку ТКМ в модель введені умови наступного вигляду:

$$\sum_{k \in K} \sum_{p=1}^{w_k} x_{(i,j)}^{p,k} \cdot r_k \cdot y_k^p \leq \alpha \cdot \varphi(i,j). \quad (10)$$

В лівій частині нерівностей (10) представлена білінійна форма від введених керуючих змінних, а в правій частині введена ще одна змінна

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad (11)$$

яка характеризує верхній поріг використання пропускної здатності каналів зв'язку мережі в цілому. Для забезпечення оптимального балансування наван-

таження при багатошляховій маршрутизації багатоадресних потоків саме мінімум значення цієї змінної виступає як критерій оптимальності, тобто

$$\alpha \rightarrow \min . \quad (12)$$

В рамках представленої моделі (1)-(12) задача багатошляхової багатоадресної маршрутизації була зведена до задачі змішаного нелінійного цілочисельного програмування (MINLP). В ході досліджень ця задача була розв'язана за допомогою програми `fminconset` пакету `MatLab`. Як показали результати проведеного дослідження застосування запропонованої моделі багатошляхової багатоадресної маршрутизації дозволило покращити верхній поріг завантаженості каналів мережі в середньому від 17 до 25%, а подекуди й до 36% в порівнянні з одношляховими рішеннями, що в залежності від завантаженості мережі сприяло зниженню середньої затримки пакетів від 10-12% до 22-27%.

Також у **другому розділі** розроблено дворівневий метод багатошляхової багатоадресної маршрутизації в ТКМ. Метод заснований на потоковій моделі маршрутизації (1)-(12). В рамках запропонованого методу з метою збереження лінійності моделі маршрутизації введена дворівнева ієрархія розрахунків, заснована на принципі прогнозування взаємодій.

На *нижньому ієрархічному рівні* відбувається розрахунок шуканих багатоадресних маршрутів спочатку для довільно заданих початкових значень змінних y_k^P , але які відповідають умовам (3) та (4), під час мінімізації цільової функції (12) лише за змінними $x_{(i,j)}^{P,k}$ у відповідності до обмежень (5)-(11). Тоді оптимізаційна задача нижнього рівня, яка пов'язана з розрахунком маршрутних змінних за фіксованими та заданими на верхньому рівні поточковими змінними, вже відноситься до класу задач булевого програмування, так як критерій оптимальності (12) і всі обмеження (5)-(11) лінійні. Це стосується й умов (10), які також стають лійними, бо на нижньому рівні змінними, що підлягають розрахунку, є лише маршрутні змінні, а поточкові змінні є константами. Результати розрахунку, представлені змінними $x_{(i,j)}^{P,k}$, передаються на верхній рівень для визначення порядку формування підпотоків та балансування навантаження за множиною розрахованих на нижньому рівні багатоадресних маршрутів.

На *верхньому рівні* методу при фіксованих значеннях змінних $x_{(i,j)}^{P,k}$, які розраховані на нижньому рівні, для кожного з потоків здійснюється формування підпотоків шляхом визначення (прогнозування) значень змінних y_k^P на підставі мінімізації функції (12) тільки за цими змінними у відповідності до обмежень (3), (4), (10), (11). Оптимізаційна задача, що розв'язується на верхньому рівні, відноситься до класу задач лінійного програмування: умови (10) стають також

лінійними, бо на верхньому рівні змінні $x_{(i,j)}^{p,k}$ є константами. Результати розрахунків знову спускаються на нижній рівень для наступної координації та уточнення маршрутних змінних $x_{(i,j)}^{p,k}$. Таким чином, процес розв'язання сформульованої задачі багатошляхової маршрутизації багатоадресних потоків набуває ітераційного характеру. При цьому критерієм закінчення розрахунків є досягнення оптимума (12), що проявляється в близькості значень цільової функції (12), розрахованої на сусідніх ітераціях, але на різних ієрархічних рівнях.

До переваг запропонованого методу слід віднести те, що вдалось знизити обчислювальну складність проведених розрахунків шляхом переходу від розв'язання досить складної задачі класу MINLP і розмірності $w\bar{K}(n+1)+1$ до ітераційного розв'язання оптимізаційних задач булевого (на нижньому рівні) та лінійного (на верхньому рівні) програмування розмірності $w\bar{K}n+1$ та $w\bar{K}+1$ відповідно, де w – середнє число підпотоків, на які розбивається кожен з багатоадресних потоків. У ході дослідження встановлено, що в залежності від розміру мережі та числа потоків запропонований метод забезпечував отримання оптимальних рішень за показником (12) в середньому за 2-4 координуючі ітерації, які відповідали рівню централізованих розрахунків.

У третьому розділі отримала подальший розвиток математична модель маршрутизації багатоадресних потоків в напрямку підтримки спільного явного (Shared Explicit, SE) резервування каналного ресурсу. В межах моделі K_s^{SE} – s -та SE-група, що об'єднує множину багатоадресних потоків, які, як правило, мають різні маршрутизатори-джерела та для яких здійснюється спільне явне резервування каналного ресурсу в ТКМ, $K_s^{SE} \in K$; $\gamma_{(i,j)}^s$ – частка пропускнуої здатності каналу зв'язку, що моделюється дугою $(i,j) \in E$, яка підлягає резервуванню для багатоадресних потоків, що належать s -й SE-групі, тобто $k \in K_s^{SE}$.

Модель ґрунтується на виразах (1)-(9) та доповнена умовами забезпечення спільного явного резервування каналного ресурсу при маршрутизації багатоадресних потоків. Тобто на змінні $\gamma_{(i,j)}^s$ накладено наступні умови-обмеження:

$$\sum_{s=1}^S \gamma_{(i,j)}^s \leq 1. \quad (13)$$

Виконання умов (13) гарантує те, що в ході резервування використовувався лише доступний каналний ресурс. Крім того, враховано, що при спільному явному резервуванні, як правило, каналний ресурс виділяється в об'ємі, щоб задовольнити вимоги найбільш швидкісного багатоадресного потоку, що входить до SE-групи. Тому, наприклад, при використанні в ТКМ багатошляхової багатоад-

ресної маршрутизації умови запобігання перевантаження зарезервованої під багатоадресні потоки SE-групи пропускної каналів зв'язку мають наступний вид:

$$r_k \sum_{p=1}^{w_p} x_{(i,j)}^{p,k} \cdot y_k^p \leq \gamma_{(i,j)}^s \cdot \varphi_{(i,j)}^{SE}, \quad k \in K_s^{SE}, \quad (14)$$

де $\varphi_{(i,j)}^{SE}$ – пропускна здатність каналу $(i, j) \in E$, виділена для всіх потоків, для яких здійснюється спільне явне резервування. Умови (14) є білінійними.

При реалізації одношляхової багатоадресної маршрутизації в ТКМ умови запобігання перевантаження вже будуть мати лінійний вид:

$$r_k \cdot x_{(i,j)}^k \leq \gamma_{(i,j)}^s \cdot \varphi_{(i,j)}^{SE}, \quad k \in K_s^{SE}, \quad (15)$$

де $x_{(i,j)}^k \in \{0;1\}$ – маршрутна змінна, яка використовується при одношляховій маршрутизації, дорівнює одиниці, якщо k -й потік протікає каналом $(i, j) \in E$, або дорівнює нулю – в протилежному випадку.

Новизна моделі полягає в модифікації умов щодо запобігання перевантаження каналів зв'язку при здійсненні спільного явного резервування (13)-(15), при якому каналний ресурс виділявся одночасно декільком багатоадресним потокам. Фізичний зміст умов (14) та (15) полягає в тому, що інтенсивність довільного k -го багатоадресного потоку, що належить s -ї SE-групі та протікає в каналі зв'язку $(i, j) \in E$, не буде перевищувати величину пропускної здатності, зарезервовану для потоків s -ї SE-групи. Крім того, новизна моделі полягає також в забезпеченні погодженого розв'язання задач одно/багатошляхової багатоадресної маршрутизації та резервування каналного ресурсу, так як використання умов (14) та (15) дозволяє встановити однозначний взаємозв'язок між потоковими, маршрутними змінними та змінними резервування.

Запропоновано систему критеріїв оптимальності процесів маршрутизації та резервування каналного ресурсу в телекомунікаційній мережі. Перший критерій визначав мінімум наступної лінійної цільової функції

$$J_1 = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} f_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^k + \sum_{s=1}^S g_{(i,j)}^s \gamma_{(i,j)}^s, \quad (16)$$

в якій $f_{(i,j)}^k$ – маршрутна метрика каналу зв'язку $(i, j) \in E$; $g_{(i,j)}^s$ – умовна вартість (метрика) забезпечення спільного явного резервування пропускної здатності каналу зв'язку $(i, j) \in E$ для багатоадресних потоків s -ї SE-групи.

Другий критерій оптимальності орієнтований на мінімізацію змінної β , яка характеризує верхній поріг величини зарезервованої пропускної здатності каналів зв'язку в мережі в цілому, тобто

$$J_2 = \beta. \quad (17)$$

При цьому мають місце наступні умови

$$\sum_{s=1}^S \gamma_{(i,j)}^s \leq \beta, \quad (i,j) \in E, \quad (18)$$

$$0 \leq \beta \leq 1, \quad (19)$$

які в цьому випадку фактично замінюють умови (13).

Як третій критерій виступав мінімум комплексної цільової функції виду

$$J_3 = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} f_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^k + \sum_{s=1}^S g_{(i,j)}^s \gamma_{(i,j)}^s + w\beta, \quad (20)$$

де w – ваговий коефіцієнт, що визначає важливість третього доданка (β) в функції (20). Використання цільової функції (20) сприяє не тільки забезпеченню збалансованого резервування каналного ресурсу мережі в цілому, але й мінімізації використання даного ресурсу потоками кожної s -ї SE-групи. За результатами використання запропонованих критеріїв оптимальності технологічна задача щодо маршрутизації багатоадресних потоків з підтримкою спільного явного резервування каналного ресурсу в ТКМ була зведена до оптимізаційної.

Проводився аналіз ефективності пропонованого рішення задач маршрутизації багатоадресних потоків з підтримкою спільного явного резервування (1)-(9), (13)-(20) на множині мережних структур, які відрізнялись числом маршрутизаторів, каналів зв'язку та їх пропускними здатностями. Ефективність використання запропонованої моделі, орієнтованої на узгоджене та оптимальне розв'язання задач багатоадресної маршрутизації і спільного явного резервування каналного ресурсу за критеріями (16), (17) та (20), порівнювалася з рішеннями, в рамках яких ці завдання вирішувалися окремо. Ефективність використання пропускної здатності каналів зв'язку мережі оцінювалася за допомогою показника

$$P = \left[1 - \frac{\sum_{(i,j) \in E} \varphi_{(i,j)} \sum_{s=1}^S \gamma_{(i,j)}^s}{\sum_{(i,j) \in E} \varphi_{(i,j)}} \right] 100\%, \quad (21)$$

який чисельно характеризував відсоток каналного ресурсу, який залишився незадіяним після проведеного спільного явного резервування. Ступінь збалансованості використання каналного ресурсу в ході його резервування оцінювався за показником β (19).

Так, для прикладу, на рис. 1 показана вихідна структура мережі, де в розривах каналів зв'язку вказані їх пропускні здатності ($1/c$). Розв'язувалась задача багатоадресної маршрутизації зі спільним явним резервуванням для двох багатоадресних потоків. Перший потік мав інтенсивність λ_1 , джерелом виступав маршру-

тизатор v_1 , а одержувачами $d_1^* = \{v_4, v_5\}$. Другий потік мав інтенсивність r_2 , джерелом виступав маршрутизатор v_3 , а одержувачами $d_2^* = \{v_2, v_4, v_5\}$. Дані потоки в рамках розглянутого прикладу належали одній спільній SE-групі.

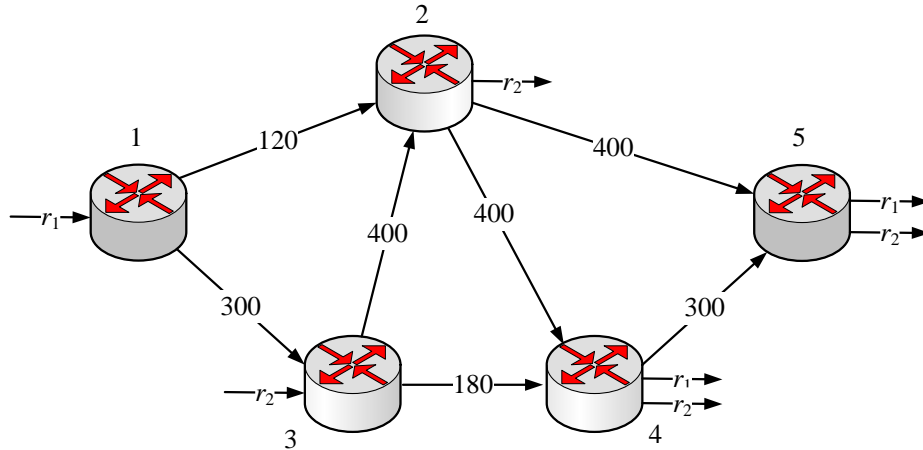


Рис. 1. Приклад вихідної структури мережі, що підлягала дослідженню

Результати розрахунку показників (19) і (21) при зміні інтенсивностей двох потоків представлені для семи обраних варіантів вихідних даних у табл. 1. Таким чином, застосування критерію (20) в переважній більшості випадків (табл. 1) призводило як до покращення показника (21) в середньому від 3,5 до 11%, так і рівня збалансованого використання пропускної здатності каналів зв'язку (19).

Таблиця 1

Результати розрахунку показників (19) і (21) при зміні інтенсивностей двох потоків для множини варіантів вихідних даних

№	Інтенсивності потоків (1/с)		При використанні критерію (16)		При використанні критерію (17)		При використанні критерію (20)	
	r_1	r_2	β	$P, \%$	β	$P, \%$	β	$P, \%$
1	50	100	0,3333	80,95	0,25	77,62	0,25	83,33
2	50	150	0,3750	71,43	0,375	68,45	0,375	76,19
3	100	100	0,5556	80,95	0,3333	78,1	0,3333	80,95
4	100	150	0,5556	69,05	0,3750	69,05	0,3750	73,81
5	150	150	0,8333	71,43	0,5	71,43	0,5	71,43
6	200	200	0,6667	61,90	0,6667	61,90	0,6667	61,90

У роботі показано, що використання моделі розрахунків (1)-(9), (13)-(15) та критерію (20) забезпечило покращення одержуваних результатів як за показником (21), так і за показником (19) в середньому на 28-35% в порівнянні з неузго-

дженням розв'язанням задач багатоадресної маршрутизації та резервування каналних ресурсів, що використовується в сучасних мережних протоколах.

У четвертому розділі проведено дослідження потокової моделі балансування навантаження в ТКМ зі структурною та функціональною неоднорідністю архітектури. Під структурною неоднорідністю ТКМ розумілося те, що її структура могла бути представлена роздільним графом або близьким до нього, тобто мережа містила маршрутизатори та канали, що моделювались точками зчленування та мостами відповідно. Функціональна неоднорідність ТКМ виявлялася, зокрема, в тому, що мережа могла містити мінімальний розріз, пропускна здатність якого була набагато менша за пропускну здатність інших розрізів мережі.

Наявність структурної та функціональної неоднорідності ТКМ, як показали дослідження, призводить до утворення т.зв. «вузьких місць» в мережі, що негативно позначається на забезпеченні максимальних значень показників QoS. У зв'язку з цим в розділі запропоновано удосконалення математичної моделі балансування навантаження в ТКМ, яка задовольняє вимогам концепції Traffic Engineering. В базовій моделі порядок одноадресної багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ визначають маршрутні змінні $x_{(i,j)}^k$, кожна з яких характеризує долю k -го потоку, що протікає в каналі $(i, j) \in E$. На маршрутні змінні накладаються умови виду

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (22)$$

Крім того, в ході розрахунку маршрутних змінних повинні виконуватися умови збереження потоку на маршрутизаторах ТКМ:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{(j,i)}^k = 1, k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{(j,i)}^k = 0, k \in K, i \neq s_k, d_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{(j,i)}^k = -1, k \in K, i = d_k. \end{cases} \quad (23)$$

Для запобігання перевантаження каналів ТКМ необхідно виконати такі умови:

$$\sum_{k \in K} r_k \cdot x_{(i,j)}^k \leq \alpha \cdot \varphi_{(i,j)}, \quad (i, j) \in E. \quad (24)$$

В умовах (24) невідомий параметр $0 \leq \alpha \leq 1$ – додатково введена керуюча змінна, яка фактично характеризує максимальне значення порога завантаженості (коефіцієнта використання) каналів зв'язку мережі. Відповідно до вимог концепції Traffic Engineering критерій оптимальності рішень щодо маршрутизації в мережі має такий вигляд

$$\alpha \rightarrow \min . \quad (25)$$

Удосконалення та новизна моделі полягає у перегляді використаного критерію оптимальності маршрутних рішень. Як правило, для підвищення чутливості критерію оптимальності до завантаженості не тільки «вузького місця» мережі, але і інших каналів зв'язку в критерій вводять складові, чисельно пов'язані також з коефіцієнтами використання всіх каналів ТКМ. При цьому цільова функція, що підлягає мінімізації, може зберігати свій лінійний вид

$$J_l = \vec{f}^t \cdot \vec{x} + g \cdot \alpha \rightarrow \min , \quad (26)$$

де \vec{x} – вектор маршрутних змінних $x_{(i,j)}^k$; \vec{f} – вектор маршрутних метрик, координатами якого є величини $1/\varphi_{(i,j)}$, що орієнтує на включення в оптимальний шлях (мультишлях) каналів зв'язку з найвищою пропускнуою здатністю; g – додатній ваговий коефіцієнт, величина якого визначає важливість другого доданка в критерії (26); $[\cdot]^t$ – операція транспонування матриці (вектору).

Крім того в роботі пропонується лінійно-квадратичний критерій оптимальності, який модифікує вираз (26) та набуває вигляду:

$$J_{lq} = \vec{x}^t \cdot H_x \cdot \vec{x} + g \cdot \alpha \rightarrow \min . \quad (27)$$

де H_x – діагональна матриця, координатами якої є маршрутні метрики. Введення квадратичного доданка в критерій (27) переслідувало дві основні цілі: по-перше, забезпечення більш детального врахування завантаженості кожного каналу зв'язку мережі окремо, що сприяє вибору в ході маршрутизації шляхів з максимальною пропускнуою здатністю та мінімальним числом переприйомів; по-друге, реалізація багатошляхової стратегії маршрутизації. Щоб зберегти основну функціональну можливість моделі (22)-(27) з точки зору вимог концепції Traffic Engineering, другий доданок в критерії (27) має бути визначальним, що досягається вибором вагового коефіцієнта згідно з умовою $g \gg 1$. Це дозволило більш ефективно організувати процес балансування навантаження в ТКМ і забезпечити кращі значення такого важливого QoS-показника як середня міжкінцева затримка, яка для пакетів k -го потоку розраховувалась як:

$$\tau^k = \sum_{p \in P} x_p^k \tau_p^k, \quad (28)$$

де P – множина шляхів між парою маршрутизаторів «джерело» та «одержувач»; x_p^k – доля k -го потоку, що протікає за p -м шляхом;

$$\tau_p^k = \sum_{(i,j) \in p} \tau_{(i,j)}^k \quad (29)$$

– середня затримка пакетів k -го потоку вздовж p -го шляху; $\tau_{(i,j)}^k$ – середня затримка пакетів k -го потоку в каналі, представленого дугою (i, j) .

$$\tau_{(i,j)} = \frac{1}{\varphi(i,j)} + \rho_{(i,j)} \frac{\rho_{(i,j)}^{1/2(1-H)}}{(1-\rho_{(i,j)})^{H/(1-H)} \sum_{k \in K} r_k \cdot x_{(i,j)}^k}, \quad (30)$$

де $\rho_{(i,j)}$ – коефіцієнт використання каналу (i, j) ; $0,5 \leq H \leq 1$ – параметр самоподібності (параметр Херста), значення якого залежать від типу трафіка.

В ході досліджень встановлено, що використання запропонованого критерію (27) при організації балансування навантаження в ТКМ з неоднорідною архітектурою дозволяє знизити середню міжкінцеву затримку пакетів у порівнянні з рішеннями, заснованими на використанні критерію (25), в середньому від 20-30% до 40-60%, а в порівнянні з рішеннями, заснованими на використанні критерію (26), в середньому від 5-9% до 20-40%. Так, наприклад, для структури ТКМ, що мала як структурну, так і функціональну неоднорідність (рис. 2), на рис. 3 представлені результати порівняння середньої міжкінцевої затримки пакетів (28), одержаної при використанні критеріїв (25), (26) та (27) для різних значень параметра Херста.

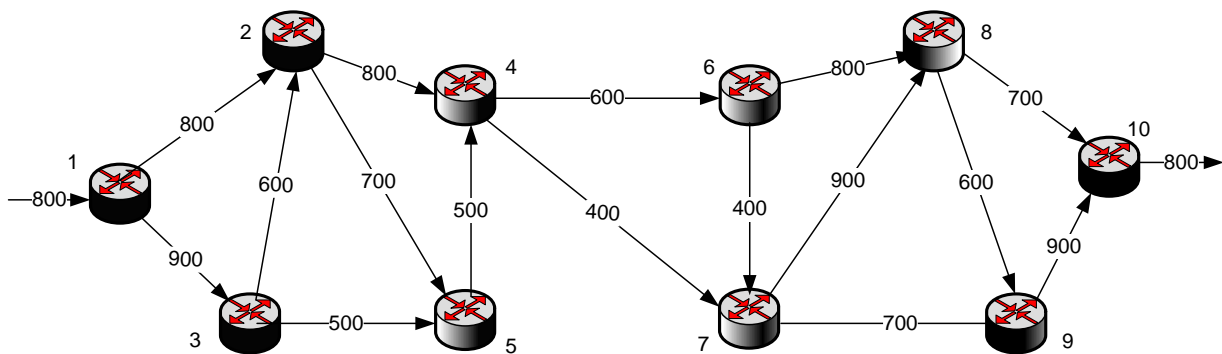


Рис. 2. Приклад ТКМ з неоднорідною архітектурою

Для даної мережної архітектури застосування запропонованого критерію (27) дозволяє покращити числові значення середньої міжкінцевої затримки пакетів на 43-63% в порівнянні з використанням критерію (25) і на 20-45% в порівнянні з використанням критерію (26). Використання критерію (27) забезпечувало найбільшу ефективність при зростанні ступеня неоднорідності архітектури ТКМ та при передачі пакетів потоків з високими значеннями параметра Херста.

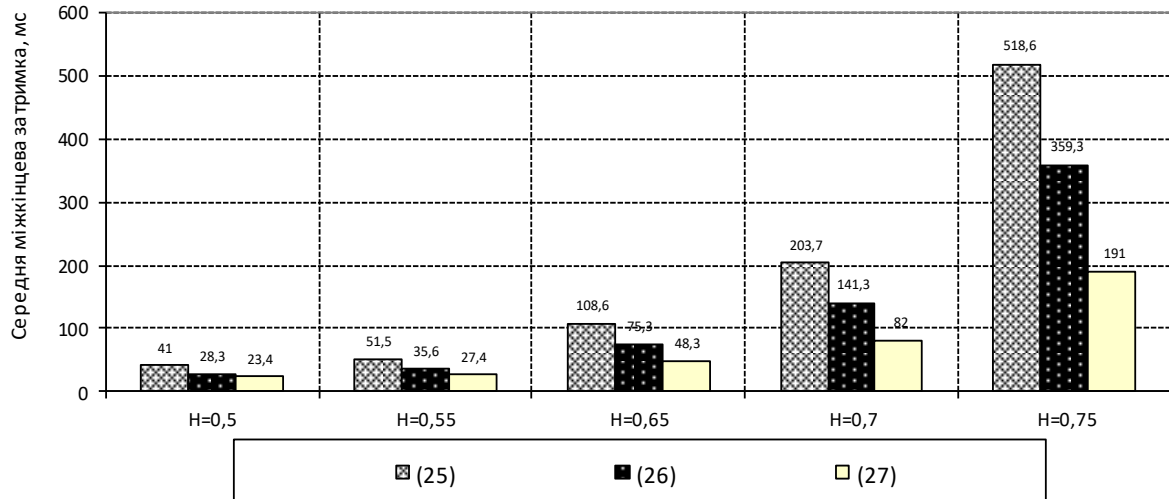


Рис. 3. Результати порівняння середньої затримки пакетів, одержаної при використанні критеріїв (25), (26) та (27) для різних значень параметра Херста

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка пов'язана з оптимізацією процесів балансування навантаження в телекомунікаційних мережах при розв'язанні задач маршрутизації та резервування ресурсів шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей та методів з метою підвищення якості обслуговування в ТКМ в цілому. За підсумками проведених досліджень та розв'язання поставленої науково-прикладної задачі можна зробити наступні висновки.

1. У ході проведеного в роботі аналізу встановлено, що дієвим засобом підвищення рівня якості обслуговування в сучасних мультисервісних телекомунікаційних мережах є балансування навантаження, яке здійснюється за результатами розв'язання задач маршрутизації та резервування мережного ресурсу. Проте обмежені можливості щодо автоматичного балансування навантаження та врахування особливостей структурної побудови ТКМ в існуючих протоколах маршрутизації значно погіршують можливості мережі щодо забезпечення QoS, а відсутність погодженості в рішеннях з протоколом RSVP досить часто призводить до надмірного використання доступного мережного ресурсу. До основних причин, що сприяють виникненню цієї проблемної ситуації варто віднести недосконалість графових моделей та комбінаторних алгоритмів, на яких ґрунтуються протоколи маршрутизації та резервування ресурсів.

2. Сформульовано перелік основних вимог, що висуваються до перспективних рішень в цій області як на рівні математичних моделей, так і мережних протоколів. До них, перш за все, відносяться забезпечення збалансованого навантаження (використання) доступного мережного ресурсу, заснованого на ре-

алізації багатошляхової маршрутизації та орієнтованого на покращення рівня QoS; більш детальне врахування особливостей структурної та функціональної побудови ТКМ при формуванні маршрутних метрик; підвищення масштабованості рішень щодо резервування мережного ресурсу, направлено на мінімізацію використання пропускну здатності каналів зв'язку мережі; орієнтація на потокові підходи та методи, в рамках яких основна увага приділяється не окремим пакетам, а їх потокам; підвищення рівня погодженості рішень щодо маршрутизації та резервування ресурсів при забезпеченні гарантованої QoS.

3. Отримала подальший розвиток потокова модель багатоадресної маршрутизації в телекомунікаційній мережі. Новизна моделі полягає в тому, що для реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації кожен з багатоадресних потоків керовано розбивався на множину підпотоків, для кожного з яких розраховувався свій окремий багатоадресний шлях. Це дозволило на підставі узгодження рішень щодо розрахунку багатоадресних шляхів та балансування між ними навантаження покращити верхній поріг завантаженості каналів мережі.

4. Вперше запропоновано метод багатошляхової багатоадресної маршрутизації. Новизна методу полягає у введенні дворівневої ієрархії розрахунків: на нижньому рівні визначались маршрутні змінні, які відповідали за формування багатоадресних шляхів для кожного з підпотоків, на які розбивався вихідний потік пакетів; а на верхньому рівні розраховувались потокові змінні, які визначали оптимальний порядок балансування навантаження за розрахованими на нижньому рівні багатоадресними маршрутами. Застосування методу дозволяє знизити обчислювальну складність реалізації багатошляхової багатоадресної маршрутизації на підставі переходу від розв'язання нелінійної оптимізаційної задачі до послідовності менш складних та розмірних задач лінійної оптимізації.

5. Отримала подальший розвиток математична модель маршрутизації багатоадресних потоків в напрямку підтримки спільного явного резервування каналного ресурсу. Новизна моделі полягає, по-перше, в забезпеченні погодженого розв'язання задач багатоадресної маршрутизації та резервування каналного ресурсу, а по-друге, в модифікації системи умов щодо запобігання переважання каналів зв'язку при здійсненні спільного явного резервування, при якому каналний ресурс виділявся одночасно декільком багатоадресним потокам, перелік яких задавався в явному вигляді.

6. Удосконалено модель балансування навантаження при багатошляховій маршрутизації в телекомунікаційних мережах з неоднорідною архітектурою. Новизна моделі полягає в модифікації критерію оптимальності маршрутних рішень, який орієнтований на забезпечення як мінімальної завантаженості мережі в цілому, так і окремих її каналів зв'язку. Це дозволило покращити якість об-

слуговування за показником середньої міжкінцевої затримки пакетів в ТКМ, яка мала структурну або функціональну неоднорідність архітектури.

7. Наведено перелік науково-методичних рекомендацій щодо практичного використання отриманих у роботі нових наукових результатів в сучасних та перспективних телекомунікаційних технологіях транспортних мереж – IP та MPLS. Рекомендації стосуються особливостей впровадження розроблених моделей та методу в перспективні протоколи одно/багатоадресної маршрутизації та резервування мережного ресурсу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поштаренко В.М. Оптимізація мереж IP/MPLS на основі імітаційного моделювання / В.М. Поштаренко, А. Мерсни // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. Тематичний випуск. Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 21. – С. 223 – 228.
2. Поштаренко В. М. Обеспечение качества обслуживания на критических участках мультисервисной сети / В. М. Поштаренко, А. Ю. Андреев, М. Амаль // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 60 (1033). – С. 94-100.
3. Мерсни А. Исследование потоковой модели балансировки нагрузки в телекоммуникационной сети с неоднородной архитектурой [Електронний ресурс] / А. Мерсни // Проблеми телекомунікацій. – 2016. – № 2 (19). – С. 59 - 80. – Режим доступу до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162_mersni_routing.pdf.
4. Мерсни А. Комплексный критерий оптимальности балансировки нагрузки при многопутевой маршрутизации в телекоммуникационной сети с неоднородной топологией / А. Мерсни, А. Ильяшенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2016. – Вып.187. – С. 25-33.
5. Мерсни А. Модель маршрутизации многоадресных потоков с поддержкой общего явного резервирования канального ресурса // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2017. - №1(54). – С.117-124.
6. Mersni A. Method of Balanced Shared Explicit Reservation for Multicast Routing in Network // Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET). – 2017. – №5(4). – P. 164-169.
7. Мерсни А. Нелинейная модель многопутевой многоадресной маршрутизации в телекоммуникационной сети / А. Мерсни, А.Е. Ильяшенко // Радиоэлектроника и информатика. – 2017. – №1(76). – С. 38-42.
8. Мерсни А. Двухуровневый метод многопутевой маршрутизации многоадресных потоков в телекоммуникационной сети // Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – №2(46). – С. 98-106.
9. Поштаренко В.М. Модель исследования характеристик качества обслуживания мультисервисной сети в условиях фрактального трафика / В.М. Пош-

- таренко, А. Мерсни // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Матеріали четвертої Міжнародної конференції, 4-5 грудня 2013 р. Полтава-Баку-Белгород-Кіровоград-Харків, 2014. – С. 56.
10. Поштаренко, В.М. Метод адаптивної маршрутизації в сетях передачі даних с учетом самоподобия трафика / В.М. Поштаренко, Ю.П. Мелешкова, М. Амаль // Международная научная конференция MicroCAD : Секція №22 - Електромагнітна стійкість - НТУ "ХПИ", 15-17 жовтня 2014. – С. 117.
11. Мерсни А. Модель управления трафиком мультисервисной сети / А. Мерсни, В.М. Поштаренко // Международная научная конференция MicroCAD : Секція №21 - Информатика і моделювання - НТУ "ХПИ", 15-17 жовтня 2014. – С. 55.
12. Поштаренко В.М. Способ мониторинга трафика мультисервисной сети / В.М. Поштаренко, Ю.И. Примшиц, А. Мерсни // Международная научная конференция MicroCAD : Секція №22 - Електромагнітна стійкість - НТУ "ХПИ", 15-17 жовтня 2014. – С. 116.
13. Мерсни А. Метод балансировки нагрузки в мультисервисных сетях с учетом самоподобия трафика / М. Амаль // Международная научная конференция MicroCAD : Секція №22 - Електромагнітна стійкість - НТУ "ХПИ", 20-22 травня 2015. – С. 114.
14. Mersni A. Complex Optimality Criterion for Load Balancing with Multipath Routing in Telecommunications Networks of Nonuniform Topology / A. Mersni, A. Pyashenko, T. Vavenko // 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM), 21-25 February 2017. – Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine. – P. 100-104.
15. Мерсни А. Дослідження процесу спільного явного резервування при маршрутизації багатоадресних потоків в телекомунікаційній мережі / А. Мерсни // Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: Збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції, 20-22 квітня 2017 року, м. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – С. 70-71.
16. Мерсни А. Оптимизация процесса общего явного резервирования при маршрутизации многоадресных потоков в телекоммуникационной сети // Информатика, математика, автоматика. Матеріали науково-технічної конференції, 17-21 квітня 2017 р. – Суми: Сумський державний університет, 2017. – С. 103.
17. Мерсни А. Метод общего явного резервирования при многоадресной маршрутизации // IX Міжнародна науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем» ПРІТС 2017: Збірник тез конференції, 18–21 квітня 2017 року. – К.: НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 476-477.
18. Мерсни А. Организация общего явного резервирования канального ресурса при маршрутизации многоадресных потоков // Перспективи розвитку телеко-

мунікаційних та інформаційно-вимірювальних технологій. Конференція 21-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка у XXI столітті»: Збірник матеріалів форуму. Том 4, 25-27 квітня 2017 р. – Х. ХНУРЕ. – С. 53-54.

19. Mersni A. Model of Multicast Routing With Support of Shared Explicit Reservation of Link Resources / A. Mersni, A. Ilyashenko, T. Vavenko // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), May 29 – June 2, 2017. – Kyiv, Ukraine. – P. 1145-1148.

АНОТАЦІЯ

Мерсні Амаль. Моделі та метод балансування навантаження в телекомунікаційних мережах при розв’язанні задач маршрутизації та резервування ресурсів. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної наукової задачі, яка пов’язана з оптимізацією процесів балансування навантаження в телекомунікаційних мережах (ТКМ) при розв’язанні задач маршрутизації та резервування ресурсів шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей та методів з метою підвищення якості обслуговування в ТКМ в цілому. Отримала подальший розвиток модель та вперше запропоновано метод багатоадресної маршрутизації в телекомунікаційній мережі. Новизна рішень полягає в тому, що для реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації кожен з багатоадресних потоків керовано розбивався на множину підпотоків, для кожного з яких розраховувався свій окремий багатоадресний шлях. Новизна також полягає у введенні дворівневої ієрархії розрахунків: на нижньому рівні формувались багатоадресні шляхи для кожного з підпотоків пакетів; а на верхньому рівні визначався оптимальний порядок балансування навантаження за розрахованими на нижньому рівні багатоадресними маршрутами. Отримала подальший розвиток математична модель маршрутизації багатоадресних потоків в напрямку підтримки спільного явного резервування каналного ресурсу. Новизна моделі полягає в забезпеченні погодженого розв’язання задач багатоадресної маршрутизації та резервування каналного ресурсу, в модифікації системи умов щодо запобігання перевантаження каналів зв’язку при здійсненні спільного явного резервування, при якому каналний ресурс виділявся одночасно декільком багатоадресним потокам, перелік яких задавався в явному вигляді. Удосконалено модель балансування навантаження при багатошляховій маршрутизації в телекомунікаційних мережах з неоднорідною архітектурою. Новизна моделі полягає в модифікації критерію оптимальності маршрутних рішень, який орієнтова-

ний на забезпечення як мінімальної завантаженості мережі в цілому, так і окремих її каналів зв'язку.

Ключові слова: модель, метод, мережа, маршрутизація, резервування, ресурс, потік, пропускна здатність, балансування.

АННОТАЦІЯ

Мерсни Амаль. Модели и метод балансировки нагрузки в телекоммуникационных сетях при решении задач маршрутизации и резервирования ресурсов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2017.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи, которая связана с оптимизацией процессов балансировки нагрузки в телекоммуникационных сетях (ТКС) при решении задач маршрутизации и резервирования ресурсов путем разработки и совершенствования соответствующих математических моделей и методов с целью повышения качества обслуживания в ТКС в целом.

Получила дальнейшее развитие потоковая модель многоадресной маршрутизации в телекоммуникационной сети. Новизна модели заключается в том, что для реализации многопутевой стратегии маршрутизации каждый из многоадресных потоков управляемо разбивался на множество подпотоков, для каждого из которых рассчитывался свой отдельный многоадресный путь. Это позволило на основании согласования решений по расчету многоадресных путей и балансировки между ними нагрузки улучшить верхний порог загруженности каналов связи сети в среднем от 17 до 25% по сравнению с однопутевым решением, что в зависимости от загруженности сети способствовало снижению средней задержки пакетов от 10-12% до 22-27%.

Впервые предложен метод многопутевой многоадресной маршрутизации. Новизна метода заключается во введении двухуровневой иерархии расчетов: на нижнем уровне определялись маршрутные переменные, которые отвечали за формирование многоадресных путей для каждого из подпотоков, на которые разбивался исходный поток пакетов; а на верхнем уровне рассчитывались потоковые переменные, которые определяли оптимальный порядок балансировки нагрузки по рассчитанным на нижнем уровне многоадресными маршрутам. Применение метода позволяет снизить вычислительную сложность реализации многопутевой многоадресной маршрутизации на основании перехода от решения нелинейной оптимизационной задачи к последовательности менее сложных и размерных задач линейной оптимизации. Причем, размерность задач нижнего уровня метода была на 2-14%, а верхнего – на 85-95% ниже, чем размерность оптимизационной задачи централизованных расчетов. Экспериментально уста-

новлено, что предложенный метод за 2-4 итерации координационной процедуры гарантированно получал оптимальное решение, соответствующее уровню централизованных расчетов.

Получила дальнейшее развитие математическая модель маршрутизации многоадресных потоков в направлении поддержки общего явного резервирования канального ресурса. Новизна модели заключается, во-первых, в обеспечении согласованного решения задач многоадресной маршрутизации и резервирования канальных ресурсов, а во-вторых, в модификации системы условий по предотвращению перегрузки каналов связи при осуществлении совместного явного резервирования, при котором канальный ресурс выделялся одновременно нескольким многоадресным потокам, перечень которых задавался в явном виде. Результаты проведенных исследований показали, что применение предложенной модели маршрутизации многоадресных потоков с поддержкой общего явного резервирования канального ресурса в телекоммуникационной сети позволило уменьшить объем использованного канального ресурса от 15 до 20% при реализации однопутевой маршрутизации, и на 24-30% – при использовании многопутевой многоадресной маршрутизации.

Усовершенствована модель балансировки нагрузки при многопутевой маршрутизации в телекоммуникационных сетях с неоднородной архитектурой. Новизна модели состоит в модификации критерия оптимальности маршрутных решений, который ориентирован на обеспечение как минимальной загруженности сети в целом, так и отдельных ее каналов связи. Это позволило улучшить качество обслуживания по показателю средней межконцевой задержки пакетов от 20-30% до 40-60% в телекоммуникационной сети, которая имела структурную или функциональную неоднородность архитектуры. Неоднородность проявлялась в том, что структура сети могла быть представлена разделимым графом и (или) содержала разрез, который имел значительно меньшую пропускную способность по сравнению с другими разрезами.

Ключевые слова: модель, метод, сеть, маршрутизация, резервирование, ресурс, поток, пропускная способность, балансировка.

ABSTRACT

Mersni Amal. Models and method of load balancing in telecommunication networks for solving problems of routing and resource reservation. – Manuscript. Dissertation for candidate of technical sciences degree in specialty 05.12.02 – telecommunication systems and network. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2017.

Dissertation is devoted to solving of the actual scientific problem, which is related to optimization of load balancing processes in telecommunication networks (TCN) in

solving routing and resource allocation tasks by developing and improving the corresponding mathematical models and methods in order to improve the quality of service in telecommunication networks as a whole. The model was further developed and the method of multicast routing in telecommunication network was firstly proposed. The novelty of the solutions is that for the implementation of the multipath routing strategy, each of the multicast flows is divided into a set of subflows, each of which was calculated for its own multicast path. The novelty is also the introduction of the two-level hierarchy of calculations: the lower level formed the multicast paths for each of the subflow of packets; and at the upper level, an optimal load balancing order was determined based on multicast routes calculated at the lower level. The mathematical model of multicast flow routing has been further developed in the direction of supporting the shared explicit reservation of the link resource. The novelty of the model is to provide an agreed solution for the problems of multicast routing and link resource reservation, to modify the system of conditions for preventing overload of communication links in implementation of a shared explicit reservation, in which the link resource was allocated simultaneously to several multicast flows, the list of which was set explicitly. The load balancing model for multipath routing in telecommunication networks with heterogeneous architecture has been improved. The novelty of the model is modification of the optimality criterion of routing solutions, which is aimed at ensuring both the minimum utilization of the network as a whole and its individual communication links.

Keywords: model, method, network, routing, reservation, resource, flow, throughput, balancing.