

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

НЕВЗОРОВА Олена Сергіївна

УДК 621.391

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ІЄРАРХІЧНО-КООРДИНАЦІЙНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ
В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

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 інфокомунікаційної інженерії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зайцев Дмитро Анатолійович,
Міжнародний гуманітарний університет МОН України,
професор кафедри комп'ютерної інженерії та інноваційних
технологій

кандидат технічних наук
Старкова Олена Володимирівна,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
МОН України,
асистент кафедри мережевих та інтернет технологій

Захист відбудеться « 4 » червня 2018 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.052.09 у 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 « 3 » травня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Б. Ткачова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найбільш результативних підходів до підвищення ефективності сучасних телекомунікаційних систем та мереж є реалізація концепції побудови програмно-конфігурованих мереж (Software Defined Networking, SDN). Впровадження SDN націлене на вдосконалення процесів управління трафіком, здешевлення комутаційного обладнання та зростання конкуренції на ринку мережного програмного забезпечення з метою покращення рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS).

Відмінною рисою програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж (ТКМ) є передача ключових функцій щодо управління трафіком від маршрутизаторів мережі на контролери мережної операційної системи. Це сприяє підвищенню централізації рішень з управління трафіком і необхідності перегляду як окремих мережних протоколів, так і покладених в їх основу математичних моделей і методів. Однак важливо розуміти, що централізація розрахунків негативно позначається на масштабованості отримання та реалізації на практиці кінцевих мережних рішень: зростають об'єми службового навантаження, знижується оперативність управління мережею, підвищуються вимоги до обчислювальної потужності контролерів SDN. В зв'язку з цим на практиці все частіше використовуються ієрархічні мережні рішення, які орієнтовані на реалізацію переваг централізованого та розподіленого управління трафіком та мінімізацію їх недоліків.

Ключову роль в архітектурі управління трафіком з підтримкою QoS відіграють протоколи як внутрішньодоменної, так і міждоменної маршрутизації, які де-факто в своїй більшості відносяться до ієрархічних рішень. Проте вони базуються, переважно, на структурній ієрархії та декомпозиції ТКМ на підмережі (області, домени), а функціональною основою маршрутних протоколів залишаються комбінаторні алгоритми. Однак ці евристичні рішення підтримують досить обмежені властивості щодо врахування ієрархічної побудови ТКМ, вимог концепції Traffic Engineering (TE) щодо балансування навантаження, характеристик сучасного мережного трафіка та параметрів самої мережі.

Проблематикою, яка присвячена вдосконаленню процесів маршрутизації займаються багато закордонних та вітчизняних вчених – Gallager R.G., Lee G. M., Vutukury S., Seok Y., Wang Y., Wang Z., Вишневський В.М., Романюк В.А., Романов О.І., Лемешко О.В., Євсєєва О.Ю. та інші. Математичною та алгоритмічною основою ієрархічної маршрутизації має стати теорія ієрархічних багаторівневих систем управління, яка запропонована М. Месаровичем, Д. Мако, І. Такахарою, а розвинута М. Сингхом та А. Тітлі. В рамках цієї теорії сформульовано ряд принципів, які регламентують форму та зміст як окремих задач ієрархічних рівнів, так і задач координації їх роботи для забезпечення оптимального розв'язання задачі, яка ставиться перед ієрархічною системою в цілому. Таким чином, актуальності набуває наукова задача, пов'язана з оптимізацією процесів ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей і методів для підвищення масштабованості та якості обслуговування в ТКМ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» та «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання наступної науково-дослідної роботи: № 299-1 «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР №0115U002432), в якій здобувач виступав виконавцем. Отримано патент на корисну модель [18].

Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні масштабованості маршрутних рішень в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах шляхом вдосконалення моделей і методів ієрархічно-координаційної маршрутизації.

У дисертаційній роботі розв'язані такі окремі задачі дослідження:

- аналіз відомих протокольних та теоретичних рішень щодо ієрархічної маршрутизації в телекомунікаційних мережах;
- розробка та дослідження потокової моделі та методу ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації;
- розробка та дослідження поточкових моделей та багаторівневих методів ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації;
- удосконалення моделі та дворівневого методу маршрутизації зі збалансованим розподілом каналного ресурсу у програмно-конфігурованій ТКМ;
- дослідження ефективності запропонованих у дисертації рішень щодо ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих ТКМ;
- розробка рекомендацій щодо практичного використання запропонованих в дисертації результатів у сучасних і перспективних ТКМ.

Об'єкт дослідження: процеси ієрархічної маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.

Предмет дослідження: моделі та методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.

Методи дослідження. В ході виконання дисертаційної роботи були використані аналітичні та імітаційні методи дослідження. При удосконаленні та розробці математичних моделей та методів ієрархічно-координаційної маршрутизації були використані елементи теорії графів, теорії множин, оптимізаційні методи математичного програмування. При розробці методів ієрархічно-координаційної маршрутизації використані принципи та постулати теорії ієрархічних багаторівневих систем. В ході дослідження запропонованих моделей і методів використано пакет MatLab та методи лабораторного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вдосконалено потокову модель та метод ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації «від джерела» в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS-TE. Новизна рішень полягає, по перше, в декомпозиційному поданні потокової моделі маршрутизації з балансуванням навантаження за принципами Traffic Engineering, по-друге, в модифікації маршрутних метрик та умов балан-

сування навантаження пропорційно віддаленості каналів зв'язку за кількістю переприйомів від маршрутизаторів відправника та отримувача, що дозволило, підвищити масштабованість маршрутних рішень: знизити об'єм службового навантаження, що циркулює у мережі, а також час розв'язання маршрутних задач в цілому. Це досягалось, по-перше, за рахунок зменшення розміру маршрутних задач пропорційно кількості приграничних маршрутизаторів та числа потоків пакетів; по-друге, на підставі підвищення збіжності методів до оптимальних рішень в середньому від 1,5-2 до 3,5-5, а в ряді випадків і до 8 разів в залежності від розміру та зв'язності мережі, а також її завантаженості.

2. Вперше запропоновано математичну модель і метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Новизна моделі полягає в тому, що на основі її декомпозиційного представлення відносно кожного окремого домену, по-перше, набули нової форми умови збереження потоку для доменів різних типів: відправників, отримувачів пакетів та транзитних доменів; по-друге, вдалось коректно сформулювати умови міждоменної взаємодії, виконання яких гарантувало зв'язність міждоменних шляхів. Новизна методу міждоменної маршрутизації полягає у використанні принципу цільової координації, що дозволило реалізувати ієрархічно-координаційну міждоменну маршрутизацію, наблизивши якість розподіленої маршрутизації за доменами до результатів централізованої маршрутизації, але суттєво знизивши при цьому розмірність маршрутної задачі, що в підсумку сприяє підвищенню масштабованості рішень щодо міждоменної маршрутизації.

3. Вперше запропоновано трирівневий метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS. Новизна методу полягає у введенні трирівневої ієрархії розрахунку маршрутних змінних з послідовною координацією отриманих рішень: нульовий та перший рівні відповідали за організацію та координацію внутрішньодоменної маршрутизації, а задача другого рівня – реалізація та координація міждоменної взаємодії. Це дозволило підвищити масштабованість рішень задачі міждоменної маршрутизації «від джерела» в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS.

4. Отримав подальший розвиток дворівневий метод маршрутизації з розподілом каналного ресурсу у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі SDN/MPLS-DiffServ-TE. Новизна методу полягає, по-перше, у застосуванні принципу прогнозування взаємодій при забезпеченні збалансованого використання каналного ресурсу, що виділяється потокам різних класів (пріоритетів) в ході їх маршрутизації. Введення дворівневої ієрархії рішень дозволило звести вихідну досить розмірну розрахункову задачу нелінійної оптимізації до ітераційного розв'язання менш розмірних задач лінійного програмування без втрати адекватності кінцевих рішень, що, в свою чергу, дозволило знизити обчислювальну складність практичної реалізації запропонованого методу на контролерах програмно-конфігурованої мережі в реальному масштабі часу.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій визначається допустимим збігом результатів аналітичного, імітаційного

моделювання та лабораторного експерименту. Крім того, достовірність забезпечувалась коректним використанням можливостей добре апробованих математичних підходів, заснованих на теорії графів, методах математичного програмування, а також належним аналітичним і числовим обґрунтуванням прийнятих наближень і ясним фізичним трактуванням отриманих результатів дослідження.

Практична цінність отриманих в дисертації результатів полягає в тому, що вони можуть бути покладені в основу алгоритмічного та програмного забезпечення маршрутизаторів у вигляді перспективних протоколів маршрутизації в програмно-конфігурованих ТКМ. Реалізація на практиці запропонованих моделей і методів дозволить підвищити масштабованість маршрутних рішень за рахунок зниження обчислювальної складності розв'язуваних маршрутних задач, а також зменшення обсягів циркулюючої службової інформації про стан мережі.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати, висвітлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [1] здобувач дослідила ієрархічно-координаційний метод внутрішньодоменної маршрутизації та запропонувала вираз щодо модифікації маршрутних метрик віддалених за кількістю переприйомів каналів зв'язку; в статті [2] здобувачем проведено аналіз можливості застосування принципу цільової координації для ієрархічної маршрутизації «від джерела» багатоадресних потоків; в статті [3] здобувачем запропоновано математичну модель і метод ієрархічно-координаційної міждоменої маршрутизації в телекомунікаційній мережі, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів; в роботі [4] автором проведено аналіз щодо особливостей застосування принципу цільової координації при ієрархічній відмовостійкій маршрутизації в ТКМ; в роботі [5] автором запропоновано трирівневий метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в ТКМ.

Апробація. Основні результати дисертації доповідалися на 24 Міжнародних наукових конференціях, форумах та семінарах [7-17], в тому числі на XVIII, XIX, XXI Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (Харків, ХНУРЕ, 2014, 2015, 2017); на XII, XIII, XIV Міжнародних IEEE-конференціях «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (Lviv-Slavske, Ukraine, 2014, 2016, 2018); на I-IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Problems of Infocommunications Science and Technology» (Kharkiv, Ukraine, 2014-2017); на I, II Міжнародних IEEE-конференціях «Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)» (Kyiv, Ukraine 2016, 2017); на 14-й Міжнародній IEEE-конференції «The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM)» (Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, 2017); на V, VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems» (Чернівці, ЧНУ імені Юрія Федьковича, 2016, 2017); на першій Міжнародній IEEE-конференції «Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON)» (Kyiv, Ukraine, 2017); на 2-й Міжнародній IEEE-конференції «Advanced Information And Communication Technologies-2017 (AICT-2017)» (Lviv, Ukraine, 2017); на першій Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку» (Харків, Україна, 2015); на

науково-практичній конференції «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно комунікаційних систем» (Київ, Україна, 2015); на науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології» (Київ, Україна, 2015); на науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика» (Суми, Україна, 2017); на ІХ Міжнародній науково-технічній конференції студентів та аспірантів «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем» (Київ, Україна, 2017).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 31 науковій праці, у тому числі 6 статей, серед яких 4 статті у наукових фахових виданнях України [1, 3, 5, 6] та 2 статті у закордонних журналах, які індексуються наукометричною базою Scopus [2, 4]. Одержані результати та висновки апробовано на 24-х Міжнародних наукових конференціях та форумах, з яких 11 на конференціях, що проходили під егідою IEEE та індексуються наукометричними базами Scopus та IEEE Xplore Digital Library [7-17]. Отримано один патент на корисну модель [18].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів та одного додатку. Загальний обсяг роботи становить 175 сторінок, у тому числі 150 сторінок основного тексту, 68 рисунків та 11 таблиць. Список використаних джерел містить 109 найменувань, викладених на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** проаналізовано загальний стан досліджуваної проблеми щодо ієрархічної маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах, обґрунтовано актуальність теми роботи, визначено мету та сформульовано наукову задачу дисертаційного дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження. Зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, які отримано в роботі. Наведено дані про публікації автора за темою дисертації.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу стану сучасних ТКМ встановлено, що ефективним напрямком їх розвитку є використання архітектури програмно-конфігурованих мереж. У розділі проаналізовано сучасні засоби управління трафіком в ТКМ. Встановлено, що важливе місце при забезпеченні необхідних значень показників якості обслуговування займають задачі маршрутизації. Проведено аналіз існуючих теоретичних та практичних рішень щодо вирішення задач маршрутизації. Встановлено переваги та недоліки існуючих маршрутних рішень, а також сформульовано вимоги, що висувуються до перспективних рішень в цій галузі. У зв'язку з цим сформульована до розв'язання актуальна наукова задача та здійснена її декомпозиції на окремі задачі дослідження.

У **другому розділі** з метою підвищення масштабованості маршрутних рішень вдосконалено потокову модель та метод ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації «від джерела» в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS-TE. Структурний опис MPLS-мережі здійснено за допомогою орієнтованого графу $G = (M, E)$, де $M = \{M_i, i = \overline{1, m}\}$ – це множина вершин графу, що моделює маршрутизатори мережі, $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина дуг графу,

що моделює канали зв'язку (КЗ) мережі. Нехай $\varphi_{i,j}$ – пропускна здатність (ПЗ) КЗ $E_{i,j} \in E$, що вимірюється в пакетах за секунду (1/с). Позначимо через K множини потоків, що циркулюють у мережі. Введемо дві підмножини K^O та K^B – підмножини одноадресних та багатоадресних потоків. Нехай K_r – множина потоків, що підлягають маршрутизації приграничним маршрутизатором M_r . Надалі під k_r -м потоком буде розумітись k -й потік пакетів, маршрутизація якого здійснюється приграничним маршрутизатором M_r . Для кожного одноадресного k_r -го потоку ($k_r \in K^O$) вводиться ряд характеристик: λ^{k_r} – середня інтенсивність (швидкість передачі) пакетів, що вимірюється в пакетах за секунду (1/с); s_{k_r} – вузол-відправник, та d_{k_r} – вузол-отримувач k_r -го потоку пакетів.

Для кожного приграничного маршрутизатора MPLS-мережі як шукані виступають маршрутні змінні $x_{i,j}^{k_r}$, що характеризують частку інтенсивності k -го потоку пакетів, що надходить до мережі через приграничний маршрутизатор M_r , та передається за КЗ $E_{i,j} \in E$. Реалізація одношляхової та багатошляхової стратегій маршрутизації передбачає введення в модель відповідних умов:

$$x_{i,j}^{k_r} \in \{0,1\}, \quad (1) \quad 0 \leq x_{i,j}^{k_r} \leq 1. \quad (2)$$

При одноадресній маршрутизації необхідно забезпечити виконання умов збереження потоку:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^{k_r} = 1, & M_i = s_{k_r}; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^{k_r} = 0, & M_i \neq s_{k_r}, d_{k_r}; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^{k_r} = -1, & M_i = d_{k_r}. \end{cases} \quad (3)$$

У роботі також наведено відповідні умови збереження потоку та зв'язності шляхів при організації багатоадресної маршрутизації ($k_r \in K^B$).

З метою запобігання перевантаження каналів зв'язку багатопотоковим трафіком важливо виконати наступні умови:

$$\sum_{k_r \in K_r} \lambda^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq \varphi_{i,j} - \sum_{\substack{M_s \in M, \\ s \neq r}} \sum_{k_s \in K_s} \lambda^{k_s} x_{i,j}^{k_s}. \quad (4)$$

Фізичний зміст виразу (4) визначається тим, що агрегований потік, який підлягає маршрутизації вузлом M_r , не повинен за своєю інтенсивністю перевищувати ПЗ каналу зв'язку, що залишилася після обслуговування потоків, які надійшли в MPLS-мережу через інші приграничні маршрутизатори.

У векторно-матричній формі умови (4) матимуть наступний вигляд:

$$B_r \vec{x}_r \leq D_r \vec{\varphi} - \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s, \quad (5)$$

де \vec{x}_r – маршрутний вектор, координатами якого виступають змінні $x_{i,j}^{k_r}$; $\vec{\varphi}$ – вектор ПЗ КЗ з координатами $\varphi_{i,j}$; B_r , D_r , C_{rs} – матриці погодження розмірності.

При розрахунку векторів \vec{x}_r на підставі використання маршрутних метрик як критерій оптимальності рішень виступав мінімум наступної цільової функції:

$$\min F, \quad F = \sum_{M_r \in M} \vec{x}_r^t H_r \vec{x}_r, \quad (6)$$

де $H_r = \|h_{i,j}^r\|$ – це діагональна матриця вагових коефіцієнтів, координати якої є маршрутні метрики $h_{i,j}^r$ КЗ MPLS-мережі; $[\cdot]^t$ – операція транспонування.

Для розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі, яка пов'язана з мінімізацією виразу (6) при наявності обмежень (2)-(5), використовувався принцип цільової координації. Тоді, переходячи до задачі на безумовний екстремум $\min_x F = \max_{\mu} L$, необхідно максимізувати за $\vec{\mu}$ лагранжیان вигляду:

$$L = \sum_{M_r \in M} \vec{x}_r^t H_r \vec{x}_r + \sum_{M_r \in M} \vec{\mu}_r^t (B_r \vec{x}_r - D_r \vec{\varphi} + \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s), \quad (7)$$

де $\vec{\mu}_r$ – це підвектори множників Лагранжу $\vec{\mu}$, віднесені до кожної з умов (5).

У рамках принципу цільової координації вводиться дворівнева ієрархія розрахунків: вектори маршрутних змінних пропонується розраховувати на нижньому рівні, розподілено на кожному з приграничних маршрутизаторів, а підвектори множників Лагранжу $\vec{\mu}_r$ – на верхньому рівні (рівні SDN-контролера). Тоді лагранжیان (7) представимо у вигляді

$$L = \sum_{M_r \in M} L_r, \quad L_r = \vec{x}_r^t H_r \vec{x}_r + \vec{\mu}_r^t (B_r \vec{x}_r - D_r \vec{\varphi} + \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} \vec{\mu}_s^t C_{sr} \vec{x}_r). \quad (8)$$

Таким чином, цільова функція (8) набуває адитивної форми, а загальна проблема ієрархічної маршрутизації підлягає декомпозиції на ряд маршрутних задач. Розв'язання задач, що пов'язані з мінімізацією за маршрутними змінними виразів (8), відбувається на нижньому рівні розрахунків. Отримані рішення визначають порядок маршрутизації «від джерела» потоків, що надходять на кожен з приграничних маршрутизаторів. Вектори \vec{x}_r передаються на верхній рівень для перевірки виконання умов (5). Основною технологічною задачею верхнього рівня є недопущення перевантаження каналів зв'язку, тобто забезпечення виконання умов (5). Тому на верхньому рівні розрахунків згідно принципу цільової координації здійснюється модифікація векторів множників Лагранжа в ході виконання ітеративної градієнтної координаційної процедури:

$$\vec{\mu}_r(a+1) = \vec{\mu}_r(a) + \nabla \vec{\mu}_r, \quad \left. \nabla \mu_r(x) \right|_{x=x^*} = B_r \vec{x}_r^* - D_r \vec{\varphi} + \sum_{\substack{M_s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s^*, \quad (9)$$

де a – номер ітерації розрахунків; $\nabla \vec{\mu}_r$ – градієнт функції, що розраховується виходячи з отриманих на верхньому рівні результатів вирішення задач маршрутизації на кожному приграничному маршрутизаторі; \vec{x}_r^* ($M_r \in M$) – результат розрахунків, отриманий нижнім рівнем ієрархії на поточній ітерації.

Нові значення підвекторів множників Лагранжа (9) передаються на нижній рівень для перерозрахунку векторів маршрутних змінних. Таким чином, процес розв'язання задачі ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в SDN/MPLS-мережі набуває ітераційного характеру. Кількість ітерацій процедури (9) визначає інерційність процесу маршрутизації в мережі і обсяг службового трафіку. Тому важливо у ході ієрархічної маршрутизації мінімізувати кількість координаційних ітерацій. Встановлено, що причина зростання числа ітерацій координаційної процедури – це перевантаження віддалених за кількістю переприйомів від маршрутизаторів відправника або отримувача КЗ. У зв'язку з цим для кожного потоку пакетів до початку розрахунків пропонується забезпечити збільшення маршрутної метрики каналів зв'язку, пропорційно віддаленості цих каналів до відповідного маршрутизатора-відправника або отримувача:

$$h_{i,j}^* = h_{i,j} + g \cdot v_{i,j}^{k_r}, \quad v_{i,j}^{k_r} = \min(\text{hop}_{i,j}^{s_{k_r}}, \text{hop}_{i,j}^{d_{k_r}}) - 1, \quad (10)$$

де g – ваговий коефіцієнт зміни метрики ($g > 0$), який регулює рівень впливу введеної модифікації на результуюче значення метрики; $\text{hop}_{i,j}^{s_{k_r}}$ та $\text{hop}_{i,j}^{d_{k_r}}$ – мінімальна кількість маршрутизаторів між КЗ $E_{i,j}$ та маршрутизатором-відправником або маршрутизатором-отримувачем відповідно.

Крім того, у роботі з метою задоволення вимог концепції Traffic Engineering при реалізації ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в мережі SDN/MPLS-TE в моделі (1)-(3) змінюється форма запису умов запобігання перевантаження КЗ (4):

$$\sum_{M_r \in M} \sum_{k_r \in K} \lambda^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq \varphi_{i,j} \alpha, \quad E_{i,j} \in E, \quad (11)$$

де α – керуюча змінна балансування, яка кількісно визначає верхній граничний поріг завантаженості КЗ мережі. На цю змінну накладається умова $0 \leq \alpha \leq 1$. Саме мінімізація цього порогового значення α є метою маршрутизації з балансуванням навантаження за ТЕ-вимогами. Однак варто врахувати, що при розподіленому розрахунку маршрутних змінних на кожному окремому приграничному маршрутизаторі вимоги умов (11) виконати досить важко. Тому кожен з умов (11) розділимо на дві умови-нерівності: на умови (4) та умови

$$\sum_{k_r \in K_r} \lambda^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq \varphi_{i,j} \alpha_r, \quad (12)$$

де α_r – верхній граничний поріг завантаженості КЗ потоками, які підлягають маршрутизації маршрутизатором M_r . На α_r також накладаються обмеження:

$$0 \leq \alpha_r \leq 1. \quad (13)$$

Умови (12) можна виконати для кожного з приграничних маршрутизаторів окремо, а от виконання умов (4), (5) потребує координації роботи множини приграничних вузлів. Важливо відзначити, що на практиці завжди буде виконуватися нерівність $\alpha \leq \sum_{M_r \in M} \alpha_r$. Тому в ході розрахунку множини шуканих маршрут-

них змінних, яка представлена векторами \vec{x}_r , як критерій оптимальності одержуваних рішень запропоновано використовувати мінімум цільової функції:

$$F = \sum_{M_r \in M} \alpha_r. \quad (14)$$

Таким чином, розв'язання задачі ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в мережі SDN/MPLS-TE було пов'язане з мінімізацією цільової функції (14) при наявності обмежень (2)-(3), (12), (13). Для цього знову використаємо принцип цільової координації, в рамках якого переходимо до двоїстої задачі, де лагранжіан має наступний вигляд:

$$L = \sum_{M_r \in M} \alpha_r + \sum_{M_r \in M} \vec{\mu}_r^t (B_r \vec{x}_r - D_r \vec{\phi} + \sum_{\substack{M_s \in M, \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s). \quad (15)$$

Тоді за аналогією з (7), (8) в рамках принципу цільової координації лагранжіан (15) представимо у вигляді:

$$L_r = \alpha_r + \vec{\mu}_r^t B_r \vec{x}_r - \vec{\mu}_r^t D_r \vec{\phi} + \sum_{\substack{M_s \in M, \\ s \neq r}} \vec{\mu}_s^t C_{sr} \vec{x}_s, \quad (16)$$

для того, щоб усі маршрутні змінні були віднесені до індексу r .

Таким чином, лагранжіан (16) набуває адитивної форми, а загальна проблема маршрутизації виявилася розділеною на ряд окремих маршрутних задач. Розв'язання задачі щодо мінімізації виразу (16) при наявності обмежень (2), (3) та (12) визначає нижній рівень розрахунків. Основна задача верхнього рівня залишилась незмінною – це координація рішень (9), отриманих на нижньому рівні, з метою запобігання перевантаження каналів зв'язку (5). Надалі робота методу (14)-(16) проходить аналогічно запропонованому вище методу (6)-(9) маршрутизації на основі використання маршрутних метрик. Для прискорення збіжності координаційної процедури (9) для кожного приграничного маршрутизатора при балансуванні потоків пакетів пропонується змінити величину пропускну здатності каналів зв'язку у виразах (12):

$$\varphi_{i,j}^r = \varphi_{i,j} v_{i,j}^{k_r}, \quad (17)$$

$$v_{i,j}^{k_r} = \frac{1}{\min(\text{hop}_{i,j}^{s_{k_r}}, \text{hop}_i^{d_{k_r}})}. \quad (18)$$

Дослідження швидкості збіжності координаційної процедури (9) було проведено на різних мережних топологіях для випадків організації як одно, так і багатоадресної маршрутизації. Наприклад, на рис. 1а представлена залежність кількості ітерацій координаційної процедури (9) від інтенсивності двох потоків пакетів при реалізації методу (7)-(9). На рис. 1б представлена залежність кількості ітерацій координаційної процедури (9) від інтенсивності потоків пакетів при реалізації методу (7)-(9) з використанням умов (10). З рис. 1б видно, що за рахунок

використання умов (10) вдалося скоротити число ітерацій в середньому від 1,5 до 7 разів залежно від інтенсивності переданих потоків пакетів.

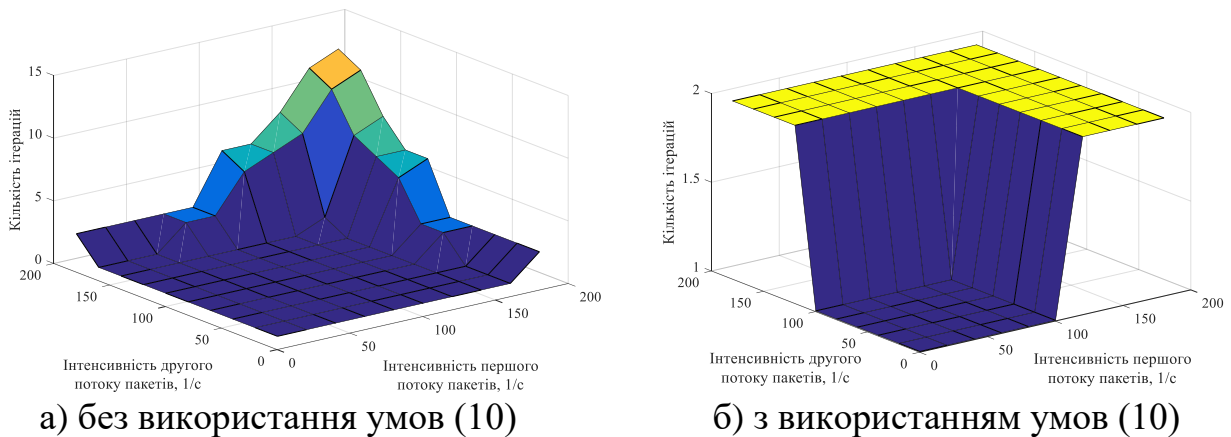


Рис. 1. Залежність кількості ітерацій координаційної процедури (9) від інтенсивностей потоків пакетів при реалізації методу (7)-(9)

В свою чергу, використання виразів (17), (18) при ієрархічно-координаційній внутрішньодоменній маршрутизації в SDN/MPLS-TE (14)-(16) дозволило знизити число ітерацій координаційної процедури (9) приблизно від 1,5 до 5 разів, що на практиці призведе до підвищення масштабованості маршрутних рішень: пропорційному зниженню обсягів службового трафіку, розміру маршрутних задач, а також часу їх розв'язання в цілому.

У **третьому розділі** розроблено математичну модель і метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій ТКМ, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів. В ході розробки декомпозиційної моделі міждоменної маршрутизації припустимо, що ТКМ складається з N підмереж – доменів. Тоді кожен окремих p -й домен описується за допомогою підграфа $G^p = (M^p, E^p)$ графу G , де $M^p = \{M_i^p; i = \overline{1, m_p}\}$ – множина маршрутизаторів p -го домену, а m_p – їх загальна кількість в домені; $E^p = \{E_{i,j}^p; i, j = \overline{1, m_p}, i \neq j\}$ – множина каналів між маршрутизаторами p -го домену. Для кожного k -го потоку була відомою його середня інтенсивність λ^k .

В ході декомпозиції ТКМ границя між доменами проходила через маршрутизатори мережі $M^p \cap M^q \neq 0$ та $E^p \cap E^q = 0$, тобто, маршрутизатори можуть належати одночасно кільком суміжним доменам. Також для кожного p -го домену визначимо множину приграничних маршрутизаторів B^p , через які потоки надходять до або виходять з даного домену. У свою чергу всю множину приграничних маршрутизаторів p -го домену можна розділити на дві підмножини: $B_{in}^{p,k}$ – підмножина маршрутизаторів, через які k -й потік надходить до p -го домену; $B_{out}^{p,k}$ – підмножина маршрутизаторів, через які k -й потік вибуває з p -го домену. Для кожного КЗ p -го домену через $\phi_{i,j}^p$ позначимо його пропускну здатність.

Тоді в результаті розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації для кожного p -го домену необхідно розрахувати маршрутні змінні $x_{i,j}^{p,k}$, які характеризують частку інтенсивності k -го потоку пакетів, що протікає в каналі $E_{i,j}^p \in E^p$. Для кожного маршрутизатора p -го домену треба виконати умови збереження потоку для забезпечення зв'язності міждоменних маршрутів в мережі. Якщо p -й домен є транзитним для k -го потоку пакетів, то подібні умови мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{B_{in}^{p,k} \in B^p} \left(\sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = 1; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 0; \\ \sum_{B_{out}^{p,k} \in B^p} \left(\sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = -1. \end{array} \right. \quad (19)$$

Система рівнянь (19) повинна виконуватися для кожного k -го потоку пакетів окремо, та перша умова системи (19) охоплює всі приграничні маршрутизатори, через які k -й потік надходить до p -го домену; друга умова вводиться для тих маршрутизаторів p -го домену, які для k -го потоку є транзитними; третя умова має виконуватися для всіх приграничних маршрутизаторів, через які k -й потік вибуває з p -го домену.

Якщо k -й потік згенеровано в p -му домені, а його джерелом виступає, наприклад, маршрутизатор M_i^p , то для цієї мережі перша умова системи (19) набуде вигляду $\sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} = 1$. Решта з рівнянь у системі (19) залишиться незмінною.

У разі, коли маршрутизатор M_i^p є отримувачем пакетів k -го потоку, то останнє рівняння системи (19) матиме вигляд $\sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 1$. Крім того, для за-

побігання перевантаження КЗ p -го домену важливо виконати наступні умови:

$$\sum_{k \in K} \lambda^k x_{i,j}^{p,k} \leq \varphi_{i,j}^p, \quad p = \overline{1, N}. \quad (20)$$

Реалізація одношляхової та багатошляхової маршрутизації призводить до введення в модель відповідних умов:

$$x_{i,j}^{p,k} \in \{0,1\}, \quad (21) \quad 0 \leq x_{i,j}^{p,k} \leq 1. \quad (22)$$

При розподіленому розрахунку векторів маршрутних змінних в межах кожного окремого p -го домену важливо забезпечити зв'язність міждоменних маршрутів. Це передбачає введення в структуру моделі (19)-(22) додаткових умов міждоменної взаємодії:

$$C_{p,q}^k \bar{x}_p^k = C_{q,p}^k \bar{x}_q^k, \quad p, q = \overline{1, n}, \quad p \neq q, \quad k \in K, \quad (23)$$

де $C_{p,q}^k$ – матриця взаємодії p -го та q -го доменів.

Грунтуючись на моделі (19)-(23) в основу методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації буде покладено розв'язок оптимізаційної задачі щодо розрахунку векторів маршрутних змінних \bar{x}_p^k ($p = \overline{1, N}, k \in K$) при дотриманні обмежень (19)-(23) в ході використання наступного критерію оптимальності отриманих рішень:

$$\mathbf{min} F, \quad F = \sum_{p \in N} \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k, \quad (24)$$

де H_p^k – діагональна матриця вагових коефіцієнтів, координатами якої, як правило, є маршрутні метрики каналів зв'язку p -го домену ТКМ.

Для додання шуканим рішенням властивостей ієрархічно-координаційної маршрутизації в ході розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі, пов'язаної з мінімізацією виразу (24) при наявності обмежень (19)-(23), буде використано принцип цільової координації. Тоді, переходячи до задачі на безумовний екстремум $\mathbf{min}_x F = \mathbf{max}_\mu L$, необхідно максимізувати по $\vec{\mu}$ лагранжіан виду:

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} \vec{\mu}_{p,q}^k (C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - C_{q,p}^k \bar{x}_q^k), \quad (25)$$

де $\vec{\mu}_{p,q}$ – підвектори вектору множників Лагранжу $\vec{\mu}$, віднесені до кожної з векторно-матричних умов взаємодії доменів (23). З причини того, що в рамках принципу цільової координації вектори множників Лагранжу $\vec{\mu}$ розраховуються на верхньому рівні та для нижнього рівня є відомими значеннями, то вираз (25) можна представити в декомпозиційній формі:

$$L = \sum_{p=1}^N L_p, \quad L_p = \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} \vec{\mu}_{p,q}^k C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} \vec{\mu}_{q,p}^k C_{p,q}^k \bar{x}_p^k, \quad (26)$$

де K_p^+ – підмножина потоків, які надходять до p -го домену з інших доменів ТКМ; K_p^- – підмножина потоків, які виходять з p -го домену ($K_p^+, K_p^- \in K$).

Якщо k -й потік генерується в p -му домені, то $k \in K_p^-$. Відповідно до проведеної функціональної декомпозиції в виразі (26) всі складові віднесені до p -го домену, а друга і третя складові (26) відповідають за узгодження порядку маршрутизації відповідно вихідних і вхідних потоків для p -го домену ТКМ.

Таким чином, загальна проблема міждоменної маршрутизації формулюється як задача ієрархічно-координаційної дворівневої оптимізації. На нижньому ієрархічному рівні (на рівні SDN-контролерів доменів) відбувається розрахунок маршрутних змінних, представлених векторами \vec{x}_p^k ($p = \overline{1, N}$, $k \in K$). На верхньому рівні (рівні SDN-серверу) запропонованого методу відбувається координація рішень, отриманих на нижньому рівні, з метою забезпечення виконання умов міждоменної взаємодії (23) шляхом модифікації векторів множників Лагранжа протягом виконання градієнтної ітераційної процедури:

$$\vec{\mu}_{p,q}^k(\alpha + 1) = \vec{\mu}_{p,q}^k(\alpha) + \nabla \vec{\mu}_{p,q}^k, \quad \nabla \vec{\mu}_{p,q}^k(x) \Big|_{x = x^*} = C_{p,q} \vec{x}_p^k - C_{q,p} \vec{x}_q^k, \quad (27)$$

де α – номер ітерації; $\nabla \vec{\mu}_{p,q}^k$ – градієнт функції, який розраховується ґрунтуючись на одержуваних на нижньому рівні результатах розв’язання задач маршрутизації \vec{x}_p^{k*} ($p = \overline{1, N}$, $k \in K$) в кожному конкретному домені.

При наближенні значень координат градієнту (27) до нуля буде забезпечуватися зв’язність міждоменних маршрутів. У роботі продемонстрована швидка збіжність процедури (27) при різній кількості доменів ТКМ та реалізованої стратегії маршрутизації (табл. 1).

Таблиця 1

Залежність кількості ітерацій координаційної процедури (27) від реалізованої стратегії маршрутизації та кількості доменів в ТКМ

Стратегія маршрутизації	Кількість доменів у мережі		
	2	3	4
Одношляхова маршрутизація (21)	1-3	2-4	3-6
Багатошляхова маршрутизація (22)	2-5	2-6	3-7

Застосування запропонованих в розділі рішень дозволяє значно знизити розмір задач маршрутизації (пропорційно кількості доменів в ТКМ) без суттєвої втрати якості балансування навантаження в мультидоменній SDN/MPLS-мережі.

Також у **третьому розділі** запропоновано трирівневий метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS. Метод заснований на потоковій моделі міждоменної маршрутизації (19)-(22), але на відміну від моделі (19)-(22), у якій в межах кожного окремого домену розрахунок маршрутних змінних відбувається централізовано на відповідному SDN-контролері, у запропонованому методі розрахунок внутрішньодоменних маршрутів носить розподілений характер та відбувається на приграничних маршрутизаторах. Запропонований метод заснований на введенні трирівневої ієрархії розрахунку згідно принципу цільової координації. Нульовий та перший рівні відповідали за організацію та координацію внутрішньодоменної маршрутизації, а задача другого рівня – реалізація та координація міждоменної взаємодії.

На нульовому ієрархічному рівні у кожному окремому домені відбувається розрахунок маршрутних змінних, що представлені векторами $\vec{x}_p^{k_r}$, які характеризують частку потоку, що надходить до p -го домену через приграничний маршрутизатор M_r у відповідності з умовами (1)-(3). Отримані рішення визначають порядок розподіленої маршрутизації потоків, що надходять на кожен з приграничних маршрутизаторів до p -го домену. Вектори $\vec{x}_p^{k_r}$ передаються на перший рівень координації для перевірки виконання умов (5).

На першому ієрархічному рівні запропонованого методу в ході мінімізації виразу (6) в рамках кожного окремого p -го домену відбувається координація рішень (9), отриманих з нульового рівня, з метою запобігання перевантажень каналів зв'язку (4) в кожному окремо взятому домені. Завдання координатора другого ієрархічного рівня полягає в забезпеченні виконання умов міждоменої взаємодії (23) шляхом модифікації векторів множників Лагранжа протягом виконання градієнтної ітераційної процедури (27).

Результати розрахунків першого та другого ієрархічних рівней у вигляді множників Лагранжу (9) та (27) спускаються на нульовий рівень для наступного перерозрахунку та уточнення векторів маршрутних змінних. Таким чином, процес розв'язання сформульованої задачі набуває ітераційного характеру. Загальний оптимум досягається, коли значення градієнтів (9) та (27) наближаються до нуля. Використання запропонованого методу дозволить значно знизити розмір вихідної задачі маршрутизації в мультидоменній ТКМ (пропорційно кількості доменів та приграничних маршрутизаторів), забезпечити зв'язність міждомених маршрутів та отримати ефективність балансування навантаження, яка є наближеною до централізованого маршрутного рішення.

У четвертому розділі отримав подальший розвиток дворівневий метод маршрутизації з розподілом каналного ресурсу у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі SDN/MPLS-DiffServ-TE. Нехай в межах моделі мережа підтримує Z класів диференційованого обслуговування (DiffServ). Тоді всю множину потоків пакетів K , що надходить від користувачів, можна декомпозиювати на підмножини $\{K^z, z = \overline{1, Z}\}$, де K^z – підмножина потоків z -го класу обслуговування (Class of Service, CoS). Кожному k -му потоку пакетів з z -м класом обслуговування (k^z -му потоку) із множини K^z відповідає ряд параметрів: s_{k^z} – маршрутизатор-відправник, через який k^z -й потік пакетів надходить до мережі; d_{k^z} – маршрутизатор-отримувач, через який k^z -й потік вибуває з мережі; λ^{k^z} – середня інтенсивність пакетів k^z -го потоку (1/с).

Тоді для розв'язання задачі маршрутизації необхідно розрахувати маршрутні змінні $x_{i,j}^{k^z}$, кожна з яких характеризує частку інтенсивності k -го потоку пакетів з z -м класом обслуговування, що протікає в каналі $E_{i,j} \in E$. Згідно з фізичним змістом маршрутних змінних, на них при реалізації багатопляхової маршрутизації накладаються обмеження виду:

$$0 \leq x_{i,j}^{k^z} \leq 1. \quad (28)$$

Необхідно забезпечити виконання системи умов збереження потоку для кожного k^z -го потоку ($k^z \in K^z$, $z = \overline{1, Z}$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{E_{i,j} \in E} x_{i,j}^{k^z} - \sum_{E_{j,i} \in E} x_{j,i}^{k^z} = 1, \text{ якщо } M_i = s_{k^z}; \\ \sum_{E_{i,j} \in E} x_{i,j}^{k^z} - \sum_{E_{j,i} \in E} x_{j,i}^{k^z} = 0, \text{ якщо } M_i \neq s_{k^z}, d_{k^z}; \\ \sum_{E_{i,j} \in E} x_{i,j}^{k^z} - \sum_{E_{j,i} \in E} x_{j,i}^{k^z} = -1, \text{ якщо } M_i = d_{k^z}. \end{array} \right. \quad (29)$$

Також в модель вводяться змінні $\beta_{i,j}^z$, що характеризують частку ПЗ каналу зв'язку $E_{i,j} \in E$, яка виділена потокам з z -м класом обслуговування. На ці змінні накладаються наступні обмеження:

$$\beta_{i,j}^z \geq 0, \quad \sum_{z=1}^Z \beta_{i,j}^z \leq 1 \quad (E_{i,j} \in E). \quad (30)$$

Виконання умов (30) гарантує, що розподілу підлягатиме лише доступний каналний ресурс ТКМ. В модель введені умови запобігання перевантаження ПЗ каналів, виділеної потокам того чи іншого CoS:

$$\sum_{k^z \in K^z} \lambda^{k^z} x_{i,j}^{k^z} \leq \beta_{i,j}^z \varphi_{i,j} \quad (E_{i,j} \in E, \quad z = \overline{1, Z}). \quad (31)$$

Новизною запропонованої моделі є введення умов балансування навантаження в каналах зв'язку мережі відповідно до їх CoS та вимог технології TE:

$$\sum_{k^z \in K^z} b_z \lambda^{k^z} x_{i,j}^{k^z} \leq \alpha \beta_{i,j}^z \varphi_{i,j} \quad (E_{i,j} \in E, \quad z = \overline{1, Z}), \quad (32)$$

де α – керуюча змінна, що додатково вводиться та характеризує верхній поріг завантаженості пропускної здатності КЗ, виділеної потокам різних CoS; b_z – коефіцієнти, які визначають відносний пріоритет (важливість) потоків з z -м CoS, та приймають значення $b_z \geq 1$. Таким чином, при одному і тому ж значенні порога α каналний ресурс, який виділено більш пріоритетним потокам, буде завантажений менше, ніж відповідний ресурс низькопріоритетних потоків.

Як критерій оптимальності одержуваних рішень обрано вираз:

$$\min_{x, \beta, \alpha} \alpha, \quad (33)$$

використання якого націлено на забезпечення збалансованого використання каналного ресурсу мережі при розв'язанні задач маршрутизації.

В основу запропонованого методу маршрутизації з розподілом каналного ресурсу у SDN/MPLS-DiffServ-TE покладено розв'язання оптимізаційної задачі нелінійного програмування з критерієм (33) та обмеженнями (28)-(30), (32), так як (32) є нелінійними, тому що присутня білінійна форма від керуючих змінних – α та $\beta_{i,j}^z$

. Для зниження обчислювальної складності рішень без зниження рівня їх адекватності було використано принцип прогнозування взаємодій, реалізація якого передбачає введення дворівневої ієрархії розрахунків: нижній рівень відповідає за розв'язання задач маршрутизації, а верхній – за розподіл каналного ресурсу ТКМ та координацію рішень нижнього рівня. Робота методу полягає в наступному:

1. Спочатку на нульовій ітерації методу на його верхньому рівні задається довільний (початковий) порядок розподілу каналного ресурсу між потоками різних класів, який представлений змінними $\beta_{i,j}^z$, що задовольняють вимогам (30). Значення цих керуючих змінних спускаються на нижній ієрархічний рівень.

2. На нижньому рівні розв'язується оптимізаційна задача маршрутизації для визначення змінних $x_{i,j}^{k^z}$, які відповідають обмеженням (28), (29) і (32), шляхом мінімізації цільової функції (33), але лише за змінними x та α , тобто:

$$\min_{x,\alpha} \alpha. \quad (34)$$

У такому формулюванні оптимізаційна задача нижнього рівня відноситься до класу задач лінійного програмування, так як критерій оптимальності (34) та всі обмеження (28), (29) та (32) є лінійними. Це стосується і умов (32), тому що значення $\beta_{i,j}^z$ попередньо задані та зафіксовані верхнім рівнем.

3. Результати розрахунків нижнього рівня ($x_{i,j}^{k^z}$) передаються на верхній рівень, який відповідає за визначення порядку розподілу ПЗ в ході обчислення змінних $\beta_{i,j}^z$ при використанні критерію:

$$\min_{\beta,\alpha} \alpha, \quad (35)$$

відповідно до обмежень (30) та (32). У такій постановці ця оптимізаційна задача залишається нелінійною. Для надання їй лінійної форми умову (32) пропонується записати у наступному вигляді:

$$\alpha^* \sum_{k^z \in K^z} b_z \lambda^{k^z} x_{i,j}^{k^z} \leq \beta_{i,j}^z \phi_{i,j}, \quad (36)$$

де модифікована керуюча змінна підпорядковується умовам $\alpha^* = 1/a$ та $0 < \alpha^*$.

З урахуванням оновленого запису нерівностей (36) в оптимізаційній задачі верхнього рівня як критерій буде виступати умова вигляду:

$$\max_{\beta,\alpha^*} \alpha^* \quad (37)$$

вже при наявності лінійних обмежень (30), (36), що дозволило перейти до розв'язання задачі лінійного програмування.

4. Результати розрахунків верхнього рівня ($\beta_{i,j}^z$) знову спускаються на нижній рівень для подальшої координації та уточнення маршрутних змінних $x_{i,j}^{k^z}$.

Результати дослідження запропонованого методу підтвердили його швидку збіжність до оптимальних рішень в середньому від 3 до 6 ітерацій. Також до пе-

реваг методу варто віднести погоджене розв'язання задач маршрутизації та розподілу каналного ресурсу у програмно-конфігурованій ТКМ; детальне врахування характеристик потоків, що циркулюють в мережі, в т.ч. класів та пріоритетів пакетів; забезпечення збалансованого використання каналного ресурсу, що виділяється потокам різних класів; зниження обчислювальної складності роботи методу.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, що пов'язана з оптимізацією процесів ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей та методів з метою підвищення масштабованості маршрутних рішень та якості обслуговування в ТКМ. За підсумками проведених досліджень та результатами розв'язання поставленої задачі можна зробити ряд важливих висновків.

1. У ході проведеного в роботі аналізу встановлено, що дієвим засобом підвищення якості обслуговування та масштабованості ТКМ є використання ієрархічної маршрутизації, яка на сьогоднішній день представлена множиною протокольних рішень. Проте існуючі протоколи ієрархічної маршрутизації засновані лише на структурній ієрархії мережі та на досить простих комбінаторних алгоритмах пошуку найкоротшого шляху на графі, за допомогою якого описується структура ТКМ. Це значно знижує ефективність функціонування ТКМ і передбачає перегляд і вдосконалення існуючих моделей і методів ієрархічної маршрутизації, на яких засновані відомі протокольні рішення.

2. Вдосконалено потокову модель та метод ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації «від джерела» в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS-TE. Новизна рішень полягає, по перше, в декомпозиційному поданні потокової моделі маршрутизації з балансуванням навантаження за принципами Traffic Engineering, по-друге, в модифікації маршрутних метрик та умов балансування навантаження пропорційно віддаленості каналів зв'язку за кількістю переприйомів від маршрутизаторів відправника та отримувача, що дозволило, підвищити масштабованість маршрутних рішень: знизити об'єм службового навантаження, що циркулює у мережі, а також час розв'язання маршрутних задач в цілому. Це досягалось, по-перше, за рахунок зменшення розміру маршрутних задач пропорційно кількості приграничних маршрутизаторів та числа потоків пакетів; по-друге, на підставі підвищення збіжності методів до оптимальних рішень в середньому від 1,5-2 до 3,5-5, а в ряді випадків і до 8 разів в залежності від розміру та зв'язності мережі, а також її завантаженості.

3. Вперше запропоновано математичну модель і метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Новизна моделі полягає в тому, що на основі її декомпозиційного представлення, відносно кожного окремого домену, по-перше, набули нової форми умови збереження потоку для доменів різних типів: відправників, отримувачів пакетів та транзитних доменів; по-друге, вдалось коректно сформулювати умови міждоменної

взаємодії, виконання яких гарантувало зв'язність міждоменних шляхів. Новизна методу міждоменної маршрутизації полягає у використанні принципу цільової координації, що дозволило реалізувати ієрархічно-координаційну міждоменну маршрутизацію, наблизивши якість розподіленої маршрутизації за доменами до результатів централізованої маршрутизації, але суттєво знизивши при цьому розмірність маршрутної задачі, що в підсумку сприяє підвищенню масштабованості рішень щодо міждоменної маршрутизації.

4. Вперше запропоновано трирівневий метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS. Новизна методу полягає у введенні трирівневої ієрархії розрахунку маршрутних змінних з послідовною координацією отриманих рішень: нульовий та перший рівні відповідали за організацію та координацію внутрішньодоменної маршрутизації, а задача другого рівня – реалізація та координація міждоменної взаємодії. Це дозволило підвищити масштабованість рішень задачі міждоменної маршрутизації в мережі SDN/MPLS.

5. Отримав подальший розвиток дворівневий метод маршрутизації з розподілом каналного ресурсу у програмно-конфігурованій мережі SDN/MPLS-DiffServ-TE. Новизна методу полягає, по-перше, у застосуванні принципу прогнозування взаємодій при забезпеченні збалансованого використання каналного ресурсу, що виділяється потокам різних класів в ході їх маршрутизації. Введення дворівневої ієрархії рішень дозволило звести вихідну досить розмірну розрахункову задачу нелінійної оптимізації до ітераційного розв'язання менш розмірних задач лінійного програмування без втрати адекватності кінцевих рішень, що, в свою чергу, дозволило знизити обчислювальну складність практичної реалізації запропонованого методу на SDN-контролерах в реальному масштабі часу.

6. Розроблено науково-методичні рекомендації щодо практичного застосування запропонованих рішень щодо ієрархічно-координаційної маршрутизації в сучасних та перспективних технологіях програмно-конфігурованих ТКМ.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лемешко А.В. Анализ сходимости координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации в телекоммуникационной сети [Електронний ресурс] / А.В. Лемешко, Е.С. Невзорова, К.М. Арус // Проблеми телекомунікацій. – 2015. – № 1 (16). – С. 54-71. – Режим доступу до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_lemeshko_coordination.pdf.

2. Nevzorova Ye.S. Method for hierarchical coordinated multicast routing in a telecommunication network / Ye.S. Nevzorova, K.M. Arous, M.T.R. Salakh // Telecommunication and Radio Engineering. – 2016. – Volume 75. – P. 1137-1151.

3. Лемешко А.В. Разработка и анализ метода иерархическо-координационной междуменной маршрутизации в телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, Е.С. Невзорова, А.Е. Ильяшенко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – №4 (44). – С. 49-67.

4. Lemeshko O. Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting / O. Lemeshko, O. Yeremenko, O. Nevzorova // *Transport and Telecommunication Journal*. – 2017 – 18(2). – P. 155-167.
5. Лемешко А.В. Разработка трехуровневого метода иерархической маршрутизации на основе принципа целевой координации / А.В. Лемешко, Е.С. Невзорова // *Радиоэлектроника и информатика*. – 2017. – №2 (77). – С. 15-19.
6. Невзорова О.С. Розробка та дослідження методу ієрархічно-координаційної внутрішньодоменої маршрутизації в телекомунікаційній мережі MPLS-TE [Електронний ресурс] // *Проблеми телекомунікацій*. – 2017. – № 2 (21). – С. 3-15.
7. Lemeshko O. The increasing convergence of coordination procedure in the implementation of multipath hierarchical routing / O. Lemeshko, O. Nevzorova, A. Hailan // *Proceedings of First International Scientific-Practical Conference “Problems of Infocommunications Science and Technology”*, PICS&T’2014, Kharkiv, Ukraine, 2014. – P. 45-48.
8. Nevzorova O. Flow-based model of hierarchical multicast routing / O.Nevzorova, K. Arous, A. Hailan // *Proceedings of Second International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications Science and Technology» PICS&T’2015*, Kharkiv, Ukraine, 2015. – P. 50-53.
9. Nevzorova O. Research of the flow-based model of hierarchical multicast routing / O. Nevzorova, K. M. Arous, A.S. Ali // *Proceedings of XIIIth International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science”*, 23 - 26 February 2016.: Lviv-Slavske, Ukraine. – P. 889-892.
10. Lemeshko O. Hierarchical coordination method of inter-area routing in telecommunication network / O. Lemeshko, O. Nevzorova, V. Vavenko // *Proceedings of International Conference “Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)”*, 11-16 Sept. 2016: Kyiv, Ukraine. – P.1-4.
11. Lemeshko O. Research of hierarchical coordination method of inter-area routing in telecommunication network / O. Lemeshko, O. Nevzorova, A. M. Hailan // *2016 IIIth International Scientific-Practical Conference Problems of infocommunications Science and Technology (PIC S&T’2016)*, October 4-6 2016. – Kharkiv, Ukraine. – P. 135-138
12. Yeremenko O. Two-level method of fault-tolerant inter-area routing / O. Yeremenko, O. Nevzorova, Ali Salem Ali // *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM)*, 21-25 February 2017. – Polyana-Svalyava, Ukraine. – P. 105-108.
13. Yeremenko O.S. Method of hierarchical QoS routing based on network resource reservation // O.S. Yeremenko, O.V. Lemeshko, O.S. Nevzorova, A.M. Hailan // *2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON)*, 2017. – P. 971-976.
14. Lemeshko O. Three-level Method of Hierarchical Coordination Routing in Multi-Area Network / O. Lemeshko, O. Yeremenko, O. Nevzorova, T. Vavenko // *2017 IEEE The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo’2017)*, 2017. – P. 1-4
15. Lemeshko O. Method of Segment Hierarchical Coordination Routing in Multi-Area Network / O. Lemeshko, A. Ilyashenko, O. Nevzorova, A.M. Mal-allah //

2017 IEEE 2nd International Conference On Advanced Information And Communication Technologies-2017 (AICT-2017), 2017. – P. 262-265.

16. Nevzorova O. Hierarchical method of load-balancing routing in MPLS network / O. Nevzorova, T. Vavenko, F. A. R. Arif // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkov, Ukraine, 2017. – P. 434-438.

17. Lemeshko, O. Hierarchical Method of Routing and Resource Allocation in DiffServ-TE Network / O. Lemeshko, O. Nevzorova, A.M. Hailan // 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2018), 2018. – P. 1-5.

18. Патент Україна, МПК (2015.01) G 06 G 3/00. Спосіб підвищення збіжності координаційної процедури в ході оптимізації процесу ієрархічної маршрутизації в телекомунікаційній мережі / Лемешко О.В., Невзорова О.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. університет радіоелектроніки. № u201412829; заявка 01.12.2014; опуб. 25.05.2015, бюл. №10.

АНОТАЦІЯ

Невзорова О.С. Моделі та методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих 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, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі, пов'язаної з оптимізацією процесів ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих ТКМ. Вдосконалено потокову модель та метод ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації «від джерела» в мережі SDN/MPLS-TE. Новизна рішень полягає в модифікації маршрутних метрик та умов балансування навантаження. Вперше запропоновано математичну модель і метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій ТКМ. Новизна моделі полягає в тому, що набули нової форми умови збереження потоку для доменів різних типів; вдалось коректно сформулювати умови міждоменної взаємодії. Вперше запропоновано трирівневий метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в SDN/MPLS. Отримав подальший розвиток дворівневий метод маршрутизації з розподілом каналного ресурсу у мережі SDN/MPLS-DiffServ-TE. Новизна методу полягає у застосуванні принципу прогнозування взаємодій при забезпеченні збалансованого використання каналного ресурсу, що виділяється потокам різних класів в ході їх маршрутизації.

Ключові слова: модель, метод, ієрархія, маршрутизація, ресурс, потік, пропускна здатність, координація, ітерація.

ABSTRACT

Nevzorova Olena. Models and methods of hierarchical-coordination routing in software-defined telecommunication networks. – Manuscript. Dissertation for candidate of technical science degree in specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2018.

Dissertation is devoted to solving of the actual scientific problem related with optimization of hierarchical-coordination routing processes in software-defined telecommunication networks by developing and improving corresponding mathematical models and methods in order to improve the scalability and quality of service in telecommunication networks.

The flow-based model and method of hierarchical-coordination intra-area source routing in telecommunication network SDN/MPLS-TE were improved. The novelty of the solutions is, firstly, in the decomposition of the flow-based routing model with load balancing according to the principles of Traffic Engineering, and secondly, in the modification of route metrics and load balancing conditions in proportion to the distance of links by the number of receptions from the sender and receiver routers, which allowed to increase the scalability of route decisions: reducing the volume of traffic load circulating in the network, as well as the time of solution of route tasks in general. The use of the routing metric modification (10) in method (7)-(9) allowed, as shown by the numerical results of the calculation for the number of network structures and different network loadings, to reduce the number of iterations of the coordination procedure from 1.5-2 to 3.5-5 times, and in some cases – up to 8 times. This is especially true for the high network load, which determines the area of preferred use of the proposed solutions in practice by changing existing or developing new routing protocols.

A mathematical model and method of hierarchical-coordination inter-area routing in a software-defined telecommunication network consisting of a set of sequentially connected domains has been proposed for the first time. The novelty of the model lies in the fact that on the basis of its decomposition representation, in relation to each individual area, first of all, conditions of the flow conservation have acquired a new form for areas of different types: senders, receivers of packets and transit areas; and secondly, it was possible in correct forming the conditions of inter-area interaction, implementation of which ensured the interconnection of inter-area paths. The novelty of the method of inter-area routing is based on usage of the principle of goal coordination, which allowed the realization of hierarchical-coordination inter-area routing, bringing the quality of distributed routing across areas to the results of centralized routing, but significantly reducing the dimensionality of the routing problem, which ultimately contributes to increased scalability of inter-area routing solutions. In the course of the investigation of the proposed method, the influence of network structure, router connectivity, the number of border routers, the implemented routing strategy (single path or multipath), and the loading of network on the convergence of the coordination procedure (27) was analyzed. The results of the investigation showed that the increase of the number of iterations of the procedure (27) was influenced by the increase in network loading, if accompanied by the implementation of the multipath routing strategy, as well as an increase in the number of border routers. This was explained by the

increase in the number of possible variants of the solution of the routing problem in individual area, which led to some increase in the number of iterations of coordinating procedures (up to 3-4). Other features of the structure of the network areas did not significantly affect convergence of the method. In the implementation of single path routing method provided the connection between the domains route in the first place for 1-2 iteration of the work of the coordination procedure.

The three-level hierarchical-coordination routing method in the SDN/MPLS telecommunication network was firstly proposed. The novelty of the method lies in the introduction of a three-level hierarchy for calculating route variables with the consistent coordination of the solutions. The zero and the first levels in method were responsible for the organization and coordination of intra-area routing, and the second level task is the implementation and coordination of inter-area interaction. This allowed to increase the scalability of inter-area source routing problem solutions in the SDN/MPLS telecommunication network.

The two-level routing method with the link resource allocation in the software-defined telecommunications network SDN/MPLS-DiffServ-TE has been further developed. The novelty of the method is, firstly, in relation to the principle of predicting the interactions while ensuring a balanced use of the link resource allocated to flows of different classes (priorities) during their routing. The introduction of a two-level hierarchy of solutions has allowed to reduce the initial sufficiently large settlement problem of non-linear optimization to the iterative solution of less-dimensional problems of linear programming without loss of adequacy of final decisions, which, in turn, allowed to reduce the computational complexity of the practical realization of the proposed method on controllers of the software-defined network in real time.

Keywords: model, method, hierarchy, routing, resource, flow, bandwidth, coordination, iteration.

АННОТАЦИЯ

Невзорова Е.С. Модели и методы иерархическо-координационной маршрутизации в программно-конфигурируемых 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, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи, связанной с оптимизацией процессов иерархическо-координационной маршрутизации в программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетях. Усовершенствована потоковая модель и метод иерархическо-координационной внутридоменной маршрутизации «от источника» в сети SDN/MPLS-TE. Новизна решений заключается в модификации маршрутных метрик и условий балансировки нагрузки. Впервые предложены математическая модель и метод иерархическо-координационной междоменной маршрутизации в программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетях. Новизна модели заключается в том, что приобрели новую форму условия сохранения потока для доменов различных типов; удалось корректно сформулировать условия междоменного взаимодействия. Впервые

предложен трехуровневый метод иерархическо-координационной маршрутизации в SDN/MPLS. Получил дальнейшее развитие двухуровневый метод маршрутизации с распределением канального ресурса в сети SDN/MPLS-DiffServ-TE. Новизна метода заключается в применении принципа прогнозирования взаимодействий при обеспечении сбалансированного использования канального ресурса, выделяемого потокам различных классов в ходе их маршрутизации.

Ключевые слова: модель, метод, иерархия, маршрутизация, ресурс, поток, пропускная способность, координация, итерация.

Підп. до друку 02.05.18.
Умов. друк. арк. 1,2
Зам. № 2-436.

Формат 60×84 1/16. Спосіб друку – ризографія.
Облік. вид. арк. 0,9 Тираж 100 прим.
Ціна договірна.

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Науки, 14

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Науки, 14