

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ЄВДОКИМЕНКО Марина Олександрівна



УДК 621.391

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІДМОВОСТІЙКОЇ
МАРШРУТИЗАЦІЇ ЧУТЛИВОГО ДО ЗАТРИМОК ТА ВТРАТ
ТРАФІКА В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ З
ВИКОРИСТАННЯМ ТЕНЗОРНИХ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
ЛЕМЕШКО Олександр Віталійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри інфокомунікаційної інженерії
імені В.В. Поповського

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
СТРЕЛКОВСЬКА Ірина Вікторівна,
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
директор Навчально-наукового інституту
інфокомунікацій та програмної інженерії

доктор технічних наук, професор
УРИВСЬКИЙ Леонід Олександрович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри телекомунікаційних систем

доктор технічних наук, доцент
ОДАРЧЕНКО Роман Сергійович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектрон-
них систем

Захист відбудеться «28» грудня 2020 року о 13 годині на засіданні спеціалізо-
ваної вченої ради Д 64.052.09 у Харківському національному університеті ра-
діоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14

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

Автореферат розісланий « 27 » листопада 2020 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.С. Єременко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з новітніх тенденцій у постійному вдосконаленні телекомунікаційних мереж (ТКМ) є побудова так званих надійних мереж (Resilience Networks, RN), здатних забезпечити виконання покладених на них завдань із заданим рівнем QoS в умовах виходу з ладу або перевантаження комутаційного або серверного обладнання, порушення рівня інформаційної безпеки елементів ТКМ, деградації її топології тощо. Для цього на практиці функціональність RN на апаратному та протокольному рівнях значно розширюється в напрямку забезпечення відмовостійкості мережних рішень та сервісів, що реалізується в межах перспективних багаторівневих архітектур підтримки якості обслуговування (Quality of Service, QoS), якості захисту (Quality of Protection, QoP) та якості надійності (Quality of Resilience, QoR).

Вирішення технологічної проблеми щодо забезпечення відмовостійкості ТКМ потребує комплексних заходів, які охоплюють функціонал усіх рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем (OSI). Важливе місце серед них посідають технологічні рішення мережного рівня, а саме протоколи маршрутизації, які нарощують свої можливості щодо забезпечення відмовостійкості як традиційних мереж IP та MPLS, так і SDN. Вагомий внесок у розроблення й теоретичне обґрунтування рішень мережного рівня OSI, маршрутизації та забезпечення відмовостійкості ТКМ здійснили такі іноземні фахівці, як J. J. Garcia-Luna-Aceves, Y. Seok, D. Tipper, T. Gomes, L. Martins, J. Rak, J. Tarolcai, а також українські вчені: В. В. Поповський, Л. Н. Беркман, П. П. Воробієнко, І. В. Стрелковська, В. А. Романюк, М. М. Климаш, Б. Ю. Волочій, О. В. Лемешко, О. Ю. Євсєєва, Ю. О. Кулаков, О. С. Єременко, С. В. Гаркуша та багато інших. Проте, навіть зважаючи на досить глибоке опрацювання основних положень відмовостійкої маршрутизації в ТКМ, наука й практика телекомунікацій потребує теоретичних рішень, які б задовольняли низку вимог:

- урахування багатопотокового та переважно мультимедійного характеру сучасного мережного трафіка, залежно від типу якого в ТКМ необхідно забезпечити гарантії QoS як за множиною показників мережної продуктивності (Network Performance, NP), так і за показниками якості сприйняття користувачем (Quality of Experience, QoE);

- забезпечення комплексного характеру рішень щодо одночасної реалізації схем як локального, сегментного й глобального захисту, так і захисту рівня якості обслуговування за показниками NP/QoE;

- забезпечення оптимальності та масштабованості маршрутних рішень із підтримкою якості обслуговування на основі реалізації ієрархічних та ієрархічно-координаційних стратегій маршрутизації в ТКМ.

Повноцінне задоволення переліченої множини технологічних вимог можливо забезпечити лише шляхом удосконалення наявних та розроблення нових математичних моделей і методів відмовостійкої маршрутизації, які так само становили б основу математичного та алгоритмічно-програмного забезпечення перспективних маршрутизаторів, серверів та контролерів маршрутів у ТКМ. Отже, актуальності набуває **науково-прикладна проблема**, що полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіка в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками QoE.

Для вирішення поставленої наукової проблеми необхідно, по-перше, чітко визначити перелік параметрів мережі й характеристик трафіка, які впливають на рівень якості обслуговування в ТКМ, а по-друге, забезпечити оцінку ступеня впливу цих параметрів на значення QoS-показників. Це можливо реалізувати лише з використанням адекватних аналітичних моделей ТКМ, що враховують особливості структурно-функціональної побудови сучасних мереж, стратегії відмовостійкої маршрутизації та схем захисту (резервування). Як показали результати проведеного аналізу, для розв'язання широкої множини задач щодо управління трафіком, маршрутизації та забезпечення QoS у ТКМ добре себе зарекомендував математичний апарат тензорного аналізу мереж.

Відносно новим напрямом застосування тензорного аналізу є оптимізація процесів відмовостійкої маршрутизації в умовах забезпечення захисту рівня QoS уздовж основних та резервних шляхів загалом. Відомі підходи обмежувалися рішеннями щодо захисту таких двох важливих показників мережної продуктивності, як пропускна здатність та середня міжкінцева затримка пакетів (СМЗП). Тому тема цієї дисертаційної роботи, присвяченої розробленню теоретичних основ відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в ТКМ із використанням тензорних моделей і методів, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація пов'язана з виконанням положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки». Результати дисертації використані в науково-дослідних роботах «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР № 0115U002432), «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління» (ДР № 0111U002627), у яких здобувач був виконавцем.

Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні рівня якості обслуговування для забезпечення відмовостійкості ТКМ шляхом розроблення нових та вдосконалення наявних моделей і методів відмовостійкої маршрутизації.

Для вирішення поставленої науково-прикладної проблеми в дисертаційній роботі виконувалися такі **завдання дослідження**:

- аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологічних засобів забезпечення відмовостійкості ТКМ та якості обслуговування користувачів;
- огляд теоретичних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації в ТКМ;
- розроблення та дослідження тензорних моделей і методів швидкої перемаршрутизації в ТКМ із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності та QoE;
- розроблення та дослідження моделей і методів ієрархічно-координаційної маршрутизації та швидкої перемаршрутизації в мультидоменних ТКМ із забезпеченням якості обслуговування за множиною показників;
- оцінка ефективності та розроблення рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації маршрутних рішень у ТКМ.

Об'єкт дослідження: процеси відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах.

Предмет дослідження: математичні моделі та методи відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ.

Методи дослідження. Під час опису топології ТКМ використовувалися теорія множин і теорія графів. У процесі розроблення математичних моделей швидкої перемаршрутизації із забезпеченням захисту рівня QoS у ТКМ були використані основні положення тензорного обчислення та тензорного аналізу мереж. У розробленні моделей та методів ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації та швидкої перемаршрутизації застосовувалася теорія ієрархічних багаторівневих систем. Для розв'язання оптимізаційних задач відмовостійкої QoS-маршрутизації використовувалися методи нелінійного та змішаного цілочисельного програмування, які програмно представлені в середовищі MATLAB. Для оцінки адекватності отриманих теоретичних рішень використано пакети імітаційного моделювання NS3 та IxChariot.

Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їхня новизна.

Головним новим науковим результатом дисертаційної роботи є розвиток теорії відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах у напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем, який оснований на використанні тензорних моделей і методів. У межах головного наукового результату отримані такі наукові результати:

1. Удосконалено тензорну модель телекомунікаційної мережі, яку представлено в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Новизною запропонованого рішення є отримання умов забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускну здатності, середньої між-

кінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, які, на відміну від відомих, є справедливими для різних режимів завантаженості мережі, а не тільки для режиму, близькому до перевантаження, та не потребують задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ. Застосування вдосконаленої тензорної моделі ТКМ для розв'язання задач маршрутизації дозволяє підвищити рівень якості обслуговування, знизивши середню міжкінцеву затримку пакетів, та за необхідності забезпечити адаптивний характер використання каналів та шляхів ТКМ у реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

2. Уперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускну здатності та ймовірності втрат пакетів у телекомунікаційній мережі. Використання моделі дозволяє реалізувати відомі схеми захисту каналу, вузла та маршруту в ТКМ із забезпеченням допустимих значень пропускну здатності та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і уздовж резервного шляхів.

3. Удосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ за множиною показників мережної продуктивності. Новизна запропонованих моделей полягає в тому, що

- формалізовано умови забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показниками пропускну здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, що особливо важливо в умовах маршрутизації мультимедійного трафіка;

- умови забезпечення захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності виконувались як уздовж основних, так і резервних шляхів; є справедливими не тільки під час реалізації схем захисту каналів та вузлів, але й для захисту маршруту (маршрутів) мережі.

4. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіка із забезпеченням захисту рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором, в умовах реалізації схем захисту каналів, вузлів та маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) мережі.

5. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка із забезпеченням захисту рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показником мультимедійної якості, під час реалізації схем захисту каналів, вузлів і маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного конт-

ролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат для аудіо- та відеопотоків пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) у мережі.

6. Отримала подальший розвиток декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, яка складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Новизною запропонованої моделі маршрутизації є модифікація умов збереження потоку, що дозволило сформулювати умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменних ТКМ за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів.

7. Подальшого розвитку набули методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в мультидоменних ТКМ. Новизною першого методу є забезпечення нормованої за доменами середньої міжкінцевої затримки пакетів, коли виконання нормованих вимог щодо якості обслуговування забезпечується в кожному домені окремо, а координація маршрутних рішень здійснюється за умовами міждоменної взаємодії. Новизна другого методу полягає в тому, що координація маршрутних рішень здійснюється як за умовами міждоменної взаємодії, так і за умовами забезпечення наскрізної середньої затримки пакетів у ТКМ.

8. Отримав подальший розвиток метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних ТКМ. Новизною методу є забезпечення захисту рівня якості обслуговування в мультидоменних ТКМ за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів під час резервування (захисту) міждоменних маршрутизаторів у процесі розрахунку основних і резервних шляхів, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечувалася коректним використанням положень добре апробованого математичного апарату, представленого елементами теорії множин, теорії графів, тензорного обчислення та аналізу, методами математичного програмування, а також належним обґрунтуванням прийнятих гіпотез і наближень, наочністю та чіткою фізичною інтерпретацією результатів дослідження. Крім того, адекватність отриманих результатів підтверджувалася допустимою збіжністю результатів аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання.

Практичне значення дисертаційної роботи. Практична цінність результатів дослідження полягає в тому, що запропоновані в дисертації моделі та методи мають стати основою математичного та алгоритмічного забезпечення перспективних протоколів відмовостійкої маршрутизації як в традиційних ТКМ, так і в SDN. Застосування запропонованих рішень дозволяє покращити рівень

якості обслуговування в мережі. Порівняно з математичними моделями, основаними на маршрутних метриках, вираш у значеннях середньої міжкінцевої затримки становив від 6–12 % до 18–30 %; порівняно з рішеннями Traffic Engineering – від 5–8 % до 21,5–24 %. Залежно від завантаженості мережі вираш щодо значень R-фактора становив у середньому від 12 до 25 %. Вираш щодо рівня мультимедійної якості вдалося забезпечити в середньому на 16–26 %. Отримані результати були використані на підприємстві «ХДРНТЦ ТЗІ», у ТОВ «Воркнест» та ПрАТ «Фарлеп-Інвест», а також в навчальному процесі кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського ХНУРЕ: у лекційному курсі й на практичних заняттях з дисциплін «Маршрутизація в ТКС», «Алгоритми управління та адаптації в ТКС» і «Telecommunication transmission systems».

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати, висвітлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, у роботі [1] дисертантом проведено дослідження на низці розрахункових прикладів удосконаленої потокової моделі відмовостійкої маршрутизації із захистом шляху на підставі використання білінійного критерію оптимальності маршрутних рішень; у статті [2] автором проаналізовано та визначено проблеми забезпечення ефективного балансування навантаження в мережах MPLS-TE; у публікації [3] дисертантом розроблено та досліджено тензорну модель багатошляхової QoS-маршрутизації в мережі із забезпеченням необхідного рейтингу якості; у роботі [4] здобувачем проаналізовано теоретичні рішення щодо відмовостійкої маршрутизації в ТКМ; у публікації [5] автором досліджено процеси міждоменної маршрутизації в магістральних мережах; у статті [6] здобувачем досліджено ефективність рішень щодо багатошляхової швидкої перемаршрутизації з локальним захистом та захистом пропускнуої здатності; у роботі [7] автором досліджено дворівневий метод маршрутизації в програмно-конфігурованій мережі, який адаптований для використання на SDN-контролері з багатоядерною архітектурою; у праці [8] здобувачем досліджено особливості моделі структурно-функціональної самоорганізації безпроводових mesh-мереж; у статті [9] дисертантом досліджено метод оцінювання впливу атак на ТКМ з урахуванням наявних уразливостей для підвищення відмовостійкості мережі загалом; у публікації [10] здобувачем досліджено відмовостійкість IoT пристроїв щодо тривалості їхнього життя під час безпечної передачі даних; у статті [11] автором проаналізовано проактивний підхід щодо оцінки мережної безпеки, який дозволяє оцінити ризики на рівні користувача та мережі через присутність уразливостей; у праці [12] здобувачем досліджено процеси швидкої перемаршрутизації із забезпеченням балансування навантаження на принципах Traffic Engineering та диференційованого обмеження трафіка в територіально розподілених SDN; у статті [13] автором розроблено математичну модель швидкої перемаршрути-

зації із захистом рівня QoS за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів для трафіка даних; у роботі [15] дисертантом досліджено моделі швидкої перемаршрутизації із реалізацією схем захисту шляху та пропускної здатності в SDN; у публікації [16] здобувачем розроблено та досліджено метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в SDN із забезпеченням нормованої QoS; у статті [17] автором удосконалено потокову модель маршрутизації в мультисервісній ТКМ із забезпеченням QoS; у роботі [18] здобувачем розроблено та досліджено оптимізаційну модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в мережах; у публікації [19] дисертантом запропоновано та досліджено метод ієрархічної міждоменної маршрутизації в SDN із забезпеченням міжкінцевої QoS; у статті [20] автором удосконалено та досліджено потокову модель швидкої перемаршрутизації в мережі із захистом рівня QoS за множиною показників; у праці [21] здобувачем розроблено та досліджено тензорну модель швидкої перемаршрутизації із забезпеченням рівня QoS за показниками пропускної здатності, середньої затримки та ймовірності втрат пакетів; у публікації [22] дисертантом досліджено потокову модель маршрутизації в безпроводових mesh-мережах; у статті [25] автором досліджено модель швидкої перемаршрутизації із балансуванням навантаження та контролем трафіка на основі відносних пріоритетів; у роботі [26] здобувачем досліджено тензорну багатопотокову модель маршрутизації самоподібного трафіка із забезпеченням QoS на основі балансування навантаження в ТКМ; у статті [27] автором досліджено процеси швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження на принципах Traffic Engineering та диференційованого контролю трафіка в ТКМ; у роботі [28] здобувачем досліджено процеси швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності.

Апробація. Основні результати дисертації доповідалися та були схвалені на 37 Міжнародних наукових конференціях, форумах і семінарах, зокрема: на XIII, XIV та XV IEEE конференціях «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)» (Львів, Славське, НУ ЛП, 2016, 2018, 2020); на III–VI IEEE конференціях «Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)» (Харків, ХНУРЕ, 2016–2019); на I Міжнародній конференції «Advanced Information and Communication Technologies-2015» (AICT-2015) (Львів, НУ ЛП, 2015); на 13-й науковій конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС ім. І. Кожедуба, 2017); на III і V Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку» (EMC-2017, EMC-2019) (Харків, ХНУРЕ, 2017, 2019); на II і III IEEE конференції «Advanced Information and Communication Technologies (AICT)» (Львів, НУ ЛП, 2017, 2019); на XIII IEEE конференції «Computer Sciences and Information Technologies

(CSIT)» (Львів, НУ ЛП, 2018); на III і IV IEEE конференціях «Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)» (Київ, Одеса, НТУУ «КП», ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2018, 2019); на VII Міжнародній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Чернівці, ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2018); на XV IEEE конференції «The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM)» (Поляна-Свалява, НУ ЛП, 2019); на XII та XIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми телекомунікацій» (Київ, НТУУ «КП», 2018, 2019); на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2019» (Київ, НАУ, 2019); на III Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології» (м. Харків, ХНУРЕ, 2019); на IEEE конференції «Information and Digital Technologies (IDT 2019)» (Жиліна, Словаччина, 2019); на II IEEE конференції «Electrical and Computer Engineering (UKRCON)» (Львів, НУ ЛП, 2019); на X IEEE конференції «Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)» (Мец, Франція, 2019); на IEEE конференції «Advanced Trends in Information Theory (ATIT)» (Київ, КНУ ім. Т. Шевченка, 2019); на IV Міжнародній конференції «Computer and Information Systems and Technologies» (Харків, ХНУРЕ, 2020); на XI IEEE конференції «Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020)» (Київ, 2020).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 65 робіт, зокрема 28 статей: з них 14 – у наукових фахових виданнях України [1, 2, 4, 7, 9, 12–14, 17–20, 23, 28] та 14 статей – у закордонних журналах [3, 5, 6, 8, 10, 11, 15, 16, 21, 22, 24–27], 13 з яких індексуються наукометричною базою Scopus [3, 5, 6, 8, 10, 15, 16, 21, 22, 24–27]. Здобуті результати апробовано на 37 Міжнародних наукових конференціях та форумах, з яких 25 – на конференціях, що проходили під егідою IEEE та індексуються наукометричною базою Scopus [29–53].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів і трьох додатків. У роботі 144 рисунки та 36 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 476 сторінок, з них 330 сторінок основного тексту, 31 сторінка з рисунками й таблицями, 20 сторінок із анотацією та 34 сторінки з додатками. Список використаних джерел містить 365 найменувань, викладених на 47 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** проведено аналіз стану проблеми щодо забезпечення надійності, відмовостійкості та QoS у ТКМ у процесі розв'язання задач маршрутизації; обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, констатовано зв'язок роботи з науковими програмами й темами, сформульовано мету та за-

вдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу встановлено, що відомі протоколи відмовостійкої маршрутизації орієнтовані на застосування в мережах пакетної комутації IP та MPLS із реалізацією схем локального захисту (шлюзу за замовчуванням, каналу або вузла). Підтримка мультисервісності в сучасних ТКМ тісно пов'язана з необхідністю захисту не тільки пропускної здатності, але й множини інших показників мережної продуктивності та QoE.

Відомі ж методи маршрутизації, як правило, орієнтують лише на опосередковане покращення QoS: або шляхом використання композитних маршрутних метрик, або на підставі балансування навантаження в ТКМ. Це визначило актуальність наряду досліджень, пов'язаних із забезпеченням захисту рівня QoS за множиною показників мережної продуктивності та QoE в умовах відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в ТКМ. Установлено, що досить ефективним підходом до вирішення завдань відмовостійкої QoS-маршрутизації є використання тензорного підходу з узагальненням та вдосконаленням відомих тензорних моделей та методів QoS-маршрутизації.

У **другому розділі** проаналізовано основні принципи побудови тензорних моделей телекомунікаційних мереж, коли їхня структура моделювалась одновимірною мережею $S = (U, V)$, у якій множина вузлів мережі $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ описувала маршрутизатори, а множина гілок мережі $V = \{v_z, z = \overline{1, n}\}$ моделювала канали зв'язку ТКМ. Уведено такі структурні характеристики мережі S : $\mu(S)$ – цикломатичне число, яке визначає кількість базисних контурів у мережі; $\phi(S)$ – ранг мережі, що встановлює число базисних вузлових пар; $\kappa(S)$ – кількість базисних міжполюсних шляхів; $\vartheta(S)$ – кількість базисних внутрішніх вузлових пар у S , де множина внутрішніх вузлових пар містить усі вузлові пари, крім полюсної. Для випадку зв'язної ТКМ мають місце такі залежності:

$$\phi(S) = m - 1, \mu(S) = n - m + 1, \kappa(S) = \mu + 1 = n - m + 2, \vartheta(S) = \phi - 1 = m - 2. \quad (1)$$

На структурі ТКМ вводився n -вимірний геометричний простір, у якому визначалися такі типи систем координат (СК): система координат гілок мережі $\{v_z, z = \overline{1, n}\}$, у якій проекції тензорів будуть позначатися індексом v ; система координат контурів $\{\pi_i, i = \overline{1, \mu}\}$ та вузлових пар $\{\eta_j, j = \overline{1, \phi}\}$ мережі, у якій проекції тензорів будуть позначатися індексом $\pi\eta$; система координат міжполюсних шляхів $\{\gamma_i, i = \overline{1, \kappa}\}$ та внутрішніх вузлових пар $\{\varepsilon_j, j = \overline{1, \vartheta}\}$ мережі S , у якій про-

екції тензорів будуть позначатися індексом $\gamma\epsilon$. Ортогональність цих СК обґрунтовується тим, що відповідно до виразів (1) виконуються такі умови:

$$n = \phi(S) + \mu(S) \quad \text{та} \quad n = \kappa(S) + \vartheta(S). \quad (2)$$

У введеному n -вимірному просторі ТКМ щодо кожного окремо обраного потоку пакетів описана за допомогою змішаного двовалентного тензора

$$Q = T \otimes \Lambda, \quad (3)$$

де \otimes – оператор тензорного множення; T – одновалентний коваріантний тензор середніх затримок пакетів; Λ – одновалентний контраваріантний тензор середніх інтенсивностей потоків у координатних шляхах мережі. Компоненти тензора Q (3) пов'язані між собою за допомогою метричних тензорів

$$T = E\Lambda \quad \text{та} \quad \Lambda = GT, \quad (4)$$

де E – двічі коваріантний, а G – двічі контраваріантний метричні тензори.

Координати метричних тензорів залежали від характеристик мережного трафіка та параметрів інтерфейсів. Так, наприклад, у випадку моделювання роботи інтерфейсів системою масового обслуговування (СМО) М/М/1/Н координати проєкцій метричного тензора в СК гілок (G_v) визначалися виразом:

$$g_v^{ii} = \frac{\lambda_i (1 - \rho_i^{N+1})(1 - \rho_i) \lambda_v^i}{\rho_i - \rho_i^{N+2} - (N+1)\rho_i^{N+1}(1 - \rho_i)}, \quad (5)$$

де $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\varphi_i}$ та φ_i – коефіцієнт використання та пропускна здатність i -го каналу зв'язку; λ_v^i – це інтенсивність потоку пакетів, що аналізується, а λ_i – це сумарна інтенсивність усіх потоків пакетів, які надходять до i -го каналу зв'язку ТКМ; N – ємність буфера черг.

У випадку розгляду тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі контурів та вузлових пар, вираз для розрахунку середньої міжкінцевої затримки пакетів у мережі (τ_{MP}), якщо $T_\pi = 0$, мав вигляд

$$\tau_{MP} = \left(\lambda_\eta^1 - G_{\pi\eta}^{(4,2)} \left[G_{\pi\eta}^{(4,4)} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1} \right) \left(G_{\pi\eta}^{(4,1)} - G_{\pi\eta}^{(4,2)} \left[G_{\pi\eta}^{(4,4)} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{(4,3)} \right)^{-1}, \quad (6)$$

а відомі умови забезпечення якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності приймали таку форму:

$$\lambda_\eta^1 \leq G_{\pi\eta}^{(4,2)} \left[G_{\pi\eta}^{(4,4)} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1} + \left(G_{\pi\eta}^{(4,1)} - G_{\pi\eta}^{(4,2)} \left[G_{\pi\eta}^{(4,4)} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{(4,3)} \right) \tau_{\langle don \rangle}, \quad (7)$$

$$\sum_{j=2}^{\phi} \lambda_\eta^j \leq \lambda^{\langle сум \rangle} P_{\langle don \rangle}, \quad (8)$$

де $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ – середня інтенсивність потоку пакетів (1/с) на вході в ТКМ; $\tau_{\langle \text{don} \rangle}$ та $P_{\langle \text{don} \rangle}$ – допустимі значення середньої міжкінцевої затримки та ймовірність втрат пакетів потоку, який аналізується; T_{π} – вектор контурних затримок пакетів; λ_{η}^1 – інтенсивність потоку успішно переданих пакетів; $\Lambda_{\eta-1}$ – вектор із координатами $\lambda_{\eta}^j, j = \overline{2, \phi}$, що визначають інтенсивності потоків утрачених пакетів на вузлах мережі; $G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle}, G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle}, G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}$ та $G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle}$ – блоки матриці $G_{\pi\eta}$, яка є проекцією відповідного метричного тензора в СК контурів та вузлових пар.

У процесі представлення тензорної моделі ТКМ у базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар отримано *новий* вираз для визначення τ_{MP} :

$$\tau_{MP} = \frac{1}{\lambda^*} \left(\Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_{\gamma} + \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_{\varepsilon} \right), \quad (9)$$

де λ^* – інтенсивність потоку успішно переданих пакетів у мережі; Λ_{γ} – вектор інтенсивності потоку в базисних міжполюсних шляхах; Λ_{ε} – вектор інтенсивності потоку втрачених пакетів на внутрішніх вузлах мережі; $E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle}$ та $E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle}$ – блоки матриці $E_{\gamma\varepsilon}$, що є проекцією відповідного метричного тензора в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар.

Тоді умови забезпечення QoS за показниками NP прийняли *оновлену* форму:

$$\tau_{\langle \text{don} \rangle} \lambda^* \geq \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_{\gamma} + \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_{\varepsilon}, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{\vartheta} \lambda_{\varepsilon}^j \leq \lambda^{\langle \text{вим} \rangle} P_{\langle \text{don} \rangle}. \quad (11)$$

За умови відсутності втрат пакетів на транзитних маршрутизаторах ТКМ (коли $\Lambda_{\varepsilon} = 0$) QoS-умови (10) спростяться до такого вигляду:

$$\tau_{\langle \text{don} \rangle} \lambda^{\langle \text{вим} \rangle} \geq \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_{\gamma}. \quad (12)$$

Умови (10)–(12) не вимагають, щоб $T_{\pi} = 0$, тому, на відміну від відомих (7) та (8), є справедливими для різних режимів завантаженості мережі, а не тільки для режиму, близькому до перевантаження, не потребуючи задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ.

У подальшому умови забезпечення QoS (10)–(12) були частиною потокової моделі маршрутизації з врахуванням втрат пакетів. У межах цієї базової моделі структура ТКМ описувалась орієнтованим графом $\Gamma = (U, W)$, де $W = \{w_{i,j}, i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина дуг, у якій дуга $w_{i,j}$ моделює канал зв'язку, що з'єднує i -й та j -й маршрутизатори ТКМ. Модель маршрутизації

використовує не наскрізну нумерацію каналів зв'язку, як при тензорному описі мережі, а подвійну – за номерами суміжних маршрутизаторів. Тобто кожній гілці v_z мережі S можна поставити в однозначну відповідність дугу $w_{i,j}$ графа Γ .

Нехай у мультисервісній ТКМ циркулює множина потоків пакетів K . Тоді в процесі розв'язання задач маршрутизації необхідно розрахувати множину маршрутних змінних $x_{i,j}^k$, кожна з яких кількісно визначає долю k -го потоку пакетів, який надходить з i -го на j -й маршрутизатор через відповідний інтерфейс ($w_{i,j}$). На маршрутні змінні накладають такі умови:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (13)$$

Умови збереження потоку на маршрутизаторах ТКМ приймуть таку форму:

$$\begin{cases} \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k = 1, \quad k \in K, \quad u_i = s_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k (1 - p_{j,i}^k) = 0, \quad k \in K, \quad u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{j,i}^k (1 - p_{j,i}^k) = b^k, \quad k \in K, \quad u_i = d_k, \end{cases} \quad (14)$$

де b^k – доля k -го потоку пакетів, які були успішно доставлені мережею від маршрутизатора-джерела (s_k) до вузла-отримувача (d_k); $p_{i,j}^k$ – імовірність втрат пакетів k -го потоку на j -му інтерфейсі i -го маршрутизатора. Наприклад, якщо робота j -го інтерфейсу i -го вузла моделюється СМО $M / M / 1 / N$, то ймовірність втрат пакетів k -го потоку може бути розрахована таким чином:

$$p_{i,j}^k = \frac{(1 - \rho_{i,j})(\rho_{i,j})^N}{1 - (\rho_{i,j})^{N+1}}, \quad (15)$$

де $\rho_{i,j}$ – коефіцієнт використання j -го інтерфейсу на i -му маршрутизаторі.

Для забезпечення керованості процесом боротьби з перевантаженням у ТКМ на маршрутні змінні $x_{i,j}^k$ накладаються відповідні обмеження:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k < \varphi_{i,j}, \quad (i, j) \in V, \quad (16)$$

де $\lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle}$ – середня інтенсивність k -го потоку пакетів (1/с) на вході ТКМ.

У термінах базової моделі маршрутизації QoS-умови (8) та (11) щодо k -го потоку можна представити в такому вигляді:

$$p_{\langle \text{don} \rangle}^k \geq p_{\partial}^k \quad \text{при} \quad p_{\partial}^k = 1 - b^k, \quad (17)$$

де p_{∂}^k та $p_{\langle \partial on \rangle}^k$ – дійсне та допустиме значення ймовірності втрат пакетів k -го потоку в ТКМ загалом.

Проекції метричних тензорів E та G , наприклад (5), залежать від значень маршрутних змінних таким чином:

$$\lambda_z = \sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{sum} \rangle} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \lambda_v^z = \lambda_k^{\langle \text{sum} \rangle} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k). \quad (18)$$

Запропонована система критеріїв оптимальності маршрутних рішень. Прикладом лінійного критерію, який використовує маршрутні метрики ($h_{i,j}^x$), є умова

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x \lambda_k^{\langle \text{sum} \rangle} x_{i,j}^k \rightarrow \min. \quad (19)$$

Можливість аналітичного розрахунку показників мережної продуктивності за допомогою моделі (6), (8), (9) та (11) робить доцільним використання критерію

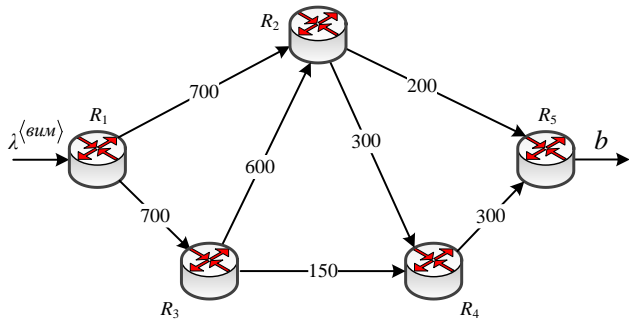
$$J_{\text{cp}} = \sum_{k \in K} \left[h_{\tau}^k p r^k \tau_{MP}^k - h_p^k p r^k \lambda_k^{\langle \text{sum} \rangle} b^k \right] \rightarrow \min, \quad (20)$$

де h_{τ}^k та h_p^k – вагові коефіцієнти, які визначають ступінь чутливості k -го потоку пакетів до міжкінцевих значень середньої затримки та ймовірності втрат пакетів.

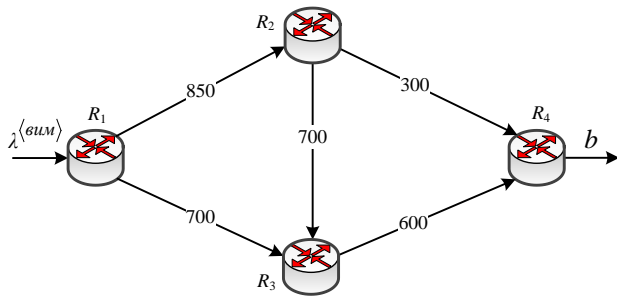
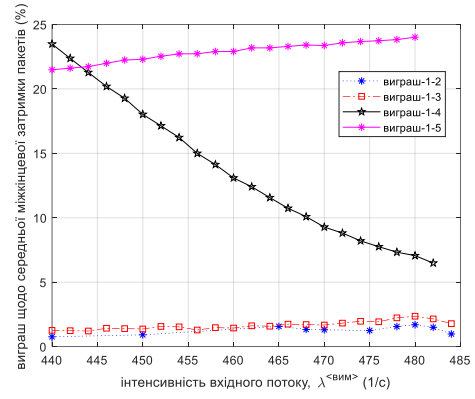
Проведено дослідження та порівняльний аналіз для різних мережних структур та QoS-вимог (рис. 1) зазначеної тензорної моделі ТКМ з іншими відомими моделями маршрутизації:

- запропонована вдосконалена тензорна модель маршрутизації в ТКМ (model 1) (13)–(20) з QoS-умовами (9), (11) та критерієм оптимальності (22);
- раніше відома тензорна модель маршрутизації в ТКМ (model 2) (13)–(20) з QoS-умовами (8), (9) та критерієм оптимальності (22);
- потокова модель маршрутизації в ТКМ (model 3), що представлена виразами (13)–(20) та критерієм оптимальності (22);
- потокова модель маршрутизації в ТКМ (model 4), що представлена виразами (13)–(20) та квадратичним аналогом критерію оптимальності (21);
- потокова модель маршрутизації Traffic Engineering у ТКМ (model 5).

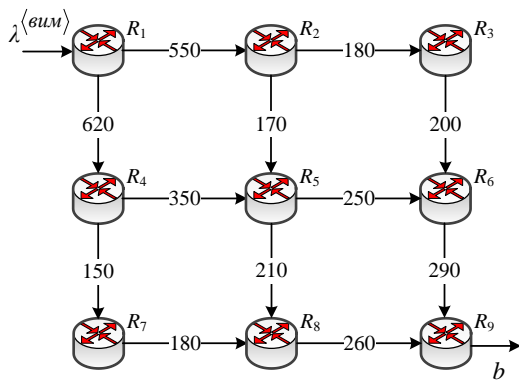
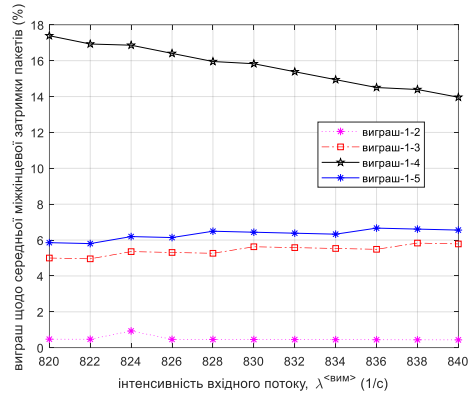
Залежно від обраної мережної топології застосування запропонованої тензорної моделі маршрутизації дозволяє зменшити середню міжкінцеву затримку пакетів в області високих навантажень (рис. 1).



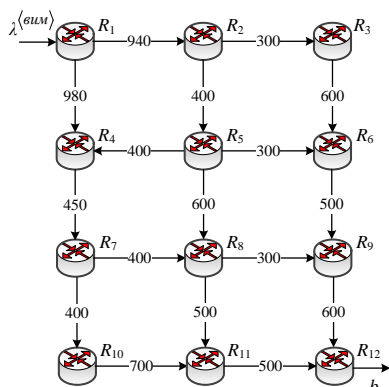
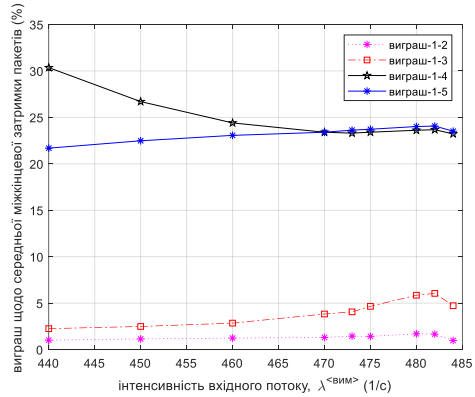
а) $\lambda^{(вум)} = 10 \div 485$ 1/с; $\tau_{(дон)} = 80$ мс; $P_{(дон)} = 0,02$



б) $\lambda^{(вум)} = 10 \div 840$ 1/с; $\tau_{(дон)} = 50$ мс; $P_{(дон)} = 0,02$



в) $\lambda^{(вум)} = 10 \div 485$ 1/с; $\tau_{(дон)} = 80$ мс; $P_{(дон)} = 0,03$



г) $\lambda^{(вум)} = 10 \div 980$ 1/с; $\tau_{(дон)} = 100$ мс; $P_{(дон)} = 0,01$

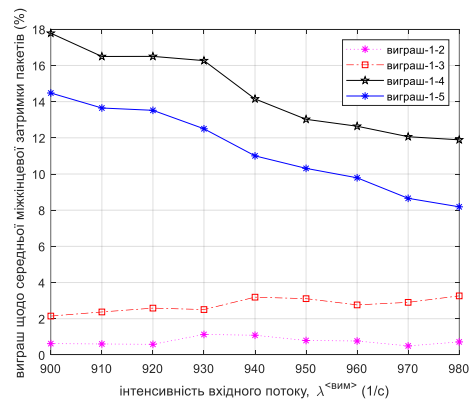


Рис. 1. Аналіз виграшу за СМЗП від застосування запропонованої моделі (model 1) порівняно з іншими моделями залежно від завантаженості ТКМ

Так, наприклад, порівняно з математичними моделями, основаними на маршрутних метриках, виграш становив від 6–12 % до 18–30 %; порівняно з рішеннями Traffic Engineering – від 5–8 % до 21,5–24 %. Порівняно з відомою тензорною моделлю, представленою в базисі контурів та вузлових пар, вдалося знизити середню міжкінцеву затримку пакетів лише від 1 % до 3 %, але значно розширивши область застосування тензорних рішень: на весь діапазон навантажень у ТКМ – від низьких до критичних (близьких до перевантаження); на одношляхову та багатошляхову стратегії маршрутизації з адаптивним регулюванням кількості використаних маршрутів (залежно від рівня QoS-вимог).

У **третьому розділі** вперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня QoS за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів у ТКМ. У межах моделі забезпечувався розрахунок двох типів змінних $x_{i,j}^k$ та $\bar{x}_{i,j}^k$, які визначали порядок маршрутизації відповідно за основними та резервними шляхами. Надалі параметри, які позначені «рискою», зберігають свій фізичний зміст, але належать до характеристик резервних шляхів. На $\bar{x}_{i,j}^k$ накладались обмеження, подібні до (13) та (14). Водночас інтенсивності агрегованих потоків у каналі $w_{i,j}$ у процесі його використання основним або резервним маршрутом ($\lambda_{i,j}$ та $\bar{\lambda}_{i,j}$) за умови одночасного перемикання на резервні шляхи визначалися виразами

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(вум)} x_{i,j}^k; \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(вум)} \bar{x}_{i,j}^k. \end{cases} \quad (21)$$

Якщо ж на застосування резервних шляхів перейдуть тільки ті потоки, які протікали через елемент мережі, що відмовив, то замість системи (21) потрібно використовувати таку систему:

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \lambda_k^{(вум)} x_{i,j}^k + \sum_{p \in K, p \neq k} \lambda_p^{(вум)} \max[x_{i,j}^p, \bar{x}_{i,j}^p]; \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \lambda_k^{(вум)} \bar{x}_{i,j}^k + \sum_{p \in K, p \neq k} \lambda_p^{(вум)} \max[x_{i,j}^p, \bar{x}_{i,j}^p]. \end{cases} \quad (22)$$

Фізичний зміст виразів (22) полягає в тому, що розрахунок коефіцієнтів завантаженості каналів, а разом з ним і такого показника якості обслуговування, як імовірність втрат пакетів (15), буде проводитися для найгіршого випадку, з точки зору величини інтенсивності агрегованого потоку.

Використання моделі дозволяє реалізувати відомі схеми захисту структурних елементів ТКМ:

1. Умова захисту каналу зв'язку $(i, j) \in V$:

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \quad (23)$$

$$\delta_{i,j}^k = \begin{cases} 0, & \text{у разі захисту каналу зв'язку } (i, j) \in V; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

2. Умови захисту вузла $u_i \in U$ (при узагальненні умови (23) на випадок захисту множини каналів зв'язку, що є інцидентними вузлу, який захищається):

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \text{ якщо } u_j \in u_i^*, j = \overline{1, m}, \quad (24)$$

де $u_i^* = \{u_j : \exists (i, j) \in V; i \neq j\}$ – підмножина маршрутизаторів, які є суміжними для маршрутизатора u_i .

3. Універсальні умови захисту шляху, які справедливі й для одношляхової, і для багатошляхової маршрутизації, мають нелінійний вигляд:

$$\sum_{u_j \in u_i^*} \sum_{u_p \in u_i^*} x_{j,i}^k \bar{x}_{p,i}^k = 0, \quad \forall u_i \in U \setminus \{s_k, d_k\}. \quad (25)$$

Новизною моделі є введення умов захисту рівня QoS для трафіка даних, чутливого до пропускної здатності та втрат пакетів:

1. Умови реалізації схеми захисту пропускної здатності мережі з урахуванням (21), (22) та можливих втрат пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів:

$$\lambda_{i,j} \leq \varphi_{i,j} \text{ та } \bar{\lambda}_{i,j} \leq \varphi_{i,j}, \quad (i, j) \in V. \quad (26)$$

2. Умови захисту такого QoS-показника, як імовірність втрат пакетів k -го потоку в мережі, що ґрунтуються на моделі (13)–(17):

$$1 - b^k \leq p_{\langle don \rangle}^k; \quad 1 - \bar{b}^k \leq p_{\langle don \rangle}^k, \quad (27)$$

де $p_{\langle don \rangle}^k$ – вимоги щодо гранично допустимих значень цього показника.

У межах наведеної моделі пропонується представити задачу швидкої QoS-перемаршрутизації в оптимізаційній формі, де як критерій оптимальності отримуваних маршрутних рішень доцільно обрати таку умову:

$$J = \sum_{k \in K} (c^k b^k + \bar{c}^k \bar{b}^k) \rightarrow \mathbf{max}, \quad (28)$$

де c^k та \bar{c}^k – вагові коефіцієнти, які характеризують важливість (пріоритетність) k -го потоку в мережі. Умова $c^k > \bar{c}^k$ має виконуватися, щоб рівень QoS для k -го потоку вздовж основного шляху був не гіршим за рівень якості обслуговування для цього самого потоку вздовж резервного шляху.

Обмеженнями в процесі розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі (28), які накладалися на маршрутні змінні $x_{i,j}^k$ та $\bar{x}_{i,j}^k$, були умови реаліза-

ції багатошляхової стратегії маршрутизації (13), умови збереження потоку (14), умови захисту каналу, вузла, шляху (23)–(25), умови захисту рівня QoS: пропускної здатності мережі (26) та ймовірності втрат пакетів (27). Результати дослідження моделі підтвердили її адекватність та працездатність у розв’язанні задач швидкої QoS-перемаршрутизації трафіка даних.

У цьому ж розділі вдосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ. Новизною моделі є забезпечення захисту рівня QoS за множиною показників мережної продуктивності – пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів. У випадку використання тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі контурів та вузлових пар, до моделі (13)–(22), (26) та (27) додатково вводились умови захисту середньої міжкінцевої затримки пакетів (7) уздовж основного шляху (мультишляху) та їхні аналоги

$$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{b}^k \leq \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[\bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{\Lambda}_{\eta-1} + \left(\bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[\bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{\langle \text{don} \rangle}^k, \quad (29)$$

які мали виконуватися вздовж резервного мультишляху. До того ж тензори, проекції яких є у (29), вводились у просторі, розмір якого визначався числом каналів зв’язку в ТКМ за винятком тих каналів, що підлягали захисту.

У процесі використання тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі міждіагональних шляхів та внутрішніх вузлових пар, до моделі (13)–(27) також додатково вводились умови захисту середньої міжкінцевої затримки пакетів (10) уздовж основного шляху (мультишляху) та їхні аналоги

$$\tau_{\langle \text{don} \rangle} \bar{\lambda}^* \geq \bar{\Lambda}_{\gamma}^t \bar{E}_{\gamma\epsilon}^{\langle 1 \rangle} \bar{\Lambda}_{\gamma} + \bar{\Lambda}_{\gamma}^t \bar{E}_{\gamma\epsilon}^{\langle 2 \rangle} \bar{\Lambda}_{\epsilon}, \quad (30)$$

які мали виконуватися вздовж резервного мультишляху. До того ж тензори, проекції яких є в (30), вводились у тому самому просторі, що й тензори (3) та (4). Це дозволило забезпечити захист рівня QoS, зокрема резервування шляху.

На низці прикладів продемонстрована працездатність запропонованої системи тензорних моделей швидкої QoS-перемаршрутизації в ТКМ з точки зору захисту як структурних елементів мережі, так і рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності – пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів. Результати дослідження підтвердили адекватність отриманих розрахункових рішень та їхню ефективність з точки зору реалізованих схем захисту (резервування).

У **четвертому розділі** вперше запропоновано тензорні моделі маршрутизації VoIP-трафіка із забезпеченням QoS у телекомунікаційній мережі за R-фактором. Відповідно до рекомендації ITU-T G.107 значення R-фактора можна розрахувати за допомогою формули

$$R = R_0 - I_{dd}(T_a) - I_{e-eff}(P_{pl}), \quad (31)$$

де

$$I_{dd}(T_a) = \begin{cases} 0, & T_a \leq 100 \text{ мс}; \\ 25 \left\{ \left(1 + X^6\right)^{\frac{1}{6}} - 3 \left(1 + \left[\frac{X}{3}\right]^6\right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\}, & T_a > 100 \text{ мс}, \end{cases} \quad (32)$$

– коефіцієнт зниження якості, обумовленого тривалою затримкою в мережі;

$$I_{e-eff}(P_{pl}) = I_e + (95 - I_e) \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}} \quad (33)$$

– коефіцієнт зниження якості, викликаного втратами мовних пакетів; T_a – середня міжкінцева затримка пакетів у мережі (мс); P_{pl} – відсоток втрачених па-

кетів у мережі; $X = \lg \frac{\left(\frac{T_a}{mT}\right)}{\lg 2}$; sT – параметр чутливості до затримок; mT – міні-

мальна затримка, яка сприймається (мс); I_e – коефіцієнт зниження якості через використання низькошвидкісних кодеків; B_{pl} – чинник, що враховує стійкість мовного кодеку до втрат; $BurstR$ – коефіцієнт «сплеску» втрат, який залежить від характеру втрат пакетів.

Основна ідея, яка розвивається в цьому розділі, полягає в тому, щоб забезпечити заданий рівень QoE за значеннями R-фактора, тобто

$$R \geq R_{\langle vim \rangle}, \quad (34)$$

шляхом взаємопов'язаного управління показниками мережної продуктивності – середньою міжкінцевою затримкою T_a та відсотком втрачених пакетів P_{pl} у процесі розрахунку маршрутних змінних $x_{i,j}^k$ у межах моделі (13)–(16).

У першому випадку для формалізації в аналітичному вигляді показників мережної продуктивності використано тензорну модель ТКМ, яка представлена в базисі контурів та вузлових пар. Середня затримка T_a може бути розрахована відповідно до виразу (6), а відсоток втрачених пакетів P_{pl} знаходиться як

$$P_{pl} = (1 - b^k) \cdot 100\% . \quad (35)$$

У використанні тензорної моделі ТКМ, представленій в системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, розрахувати середню міжкінцеву затримку пакетів T_a можна за допомогою виразу (9).

Прикладом критеріїв оптимальності розв'язання задачі QoE-маршрутизації може бути лінійний критерій оптимальності (19), що сприяє економному використанню доступного мережного ресурсу відповідно до значень маршрутних метрик $h_{i,j}^x$ у разі виконання обмежень (13), (14), (16) та (34). У корпоративних територіально-розподілених мережах, коли весь доступний мережний ресурс можна максимально задіяти на диференційоване підвищення рівня QoE, доцільно використати критерій вигляду

$$\sum_{k \in K} f(pr^k)R^k \rightarrow \max, \quad (36)$$

у якому $f(pr^k)$ – вагова зростаюча функція від значень IP-пріоритету (класу) k -го VoIP-потоків; R^k – значення R-фактора для k -го VoIP-потоків пакетів.

Використання критерію (36) стало можливим завдяки аналітичному формулюванню R-фактора (31) у межах моделі (31)–(33), (35), (6) та (9). Для забезпечення гарантій на мінімальні значення R-фактора для того чи іншого VoIP-потоків пакетів мають вводиться обмеження (34).

У результаті розрахунків встановлено, що запропонована тензорна модель маршрутизації в ТКМ, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, забезпечувала адаптивне виконання вимог щодо рівня QoE. З підвищенням рівня QoE-вимог або завантаженості мережі збільшувався обсяг задіяного мережного ресурсу, наприклад, кількість використаних шляхів, а відповідно, і ресурс пропускнуої здатності каналів зв'язку ТКМ.

Результати дослідження підтвердили адекватність тензорної моделі QoE-маршрутизації щодо диференційованого забезпечення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача за показником R-фактора. На прикладі структури ТКМ, наведеної на рис. 1, в, продемонстровано, що шляхом зміни співвідношення між значеннями $f(pr^k)$ у (36) можна регулювати порядок балансування навантаження в ТКМ, диференційовано підвищуючи або знижуючи значення R-фактора для VoIP-потоків залежно від їхнього пріоритету (класу) (табл. 1).

Проведено порівняльний аналіз за величиною R-фактора розв'язань задачі QoE-маршрутизації, отриманих за допомогою трьох моделей: запропонованої тензорної моделі; моделі маршрутизації Traffic Engineering; моделі маршрутизації з метрикою протоколу EIGRP. Як показано на рис. 2, в області невисоких навантажень вигрощ від використання запропонованої моделі становив від 7 % до 15 % порівняно з моделлю EIGRP та від 4 % до 7 % порівняно з TE-рішенням. В області високого навантаження вигрощ становив від 15 % до 31 % порівняно з моделлю EIGRP та від 7 % до 15 % порівняно з TE-рішенням.

Результати аналізу впливу пріоритетів (класів) VoIP-потоків на величини R-фактора для кожного з потоків

Співвідношення $f(pr^1)$ до $f(pr^2)$	$\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 180 \text{ 1/с}$	$\lambda_2^{\langle \text{вим} \rangle} = 300 \text{ 1/с}$
	R^1	R^2
50 : 1	92,9592	62,6734
20 : 1	92,6284	72,8256
10 : 1	92,2197	78,6728
7 : 1	91,9373	81,0353
5 : 1	91,6217	82,9028
1 : 1	89,4479	87,9806

У режимі роботи ТКМ, близькому до перевантаження, значення R-фактора для всіх моделей маршрутизації різко знижувалися. Виграш від використання запропонованого в роботі рішення становив від 13 % до 31 % порівняно з моделлю EIGRP та від 4 % до 15 % порівняно з TE моделлю. Отримані результати дослідження визначають область використання запропонованої моделі QoE-маршрутизації, коли спостерігається нестача мережного ресурсу, спричинена або його економією, або високим завантаженням.

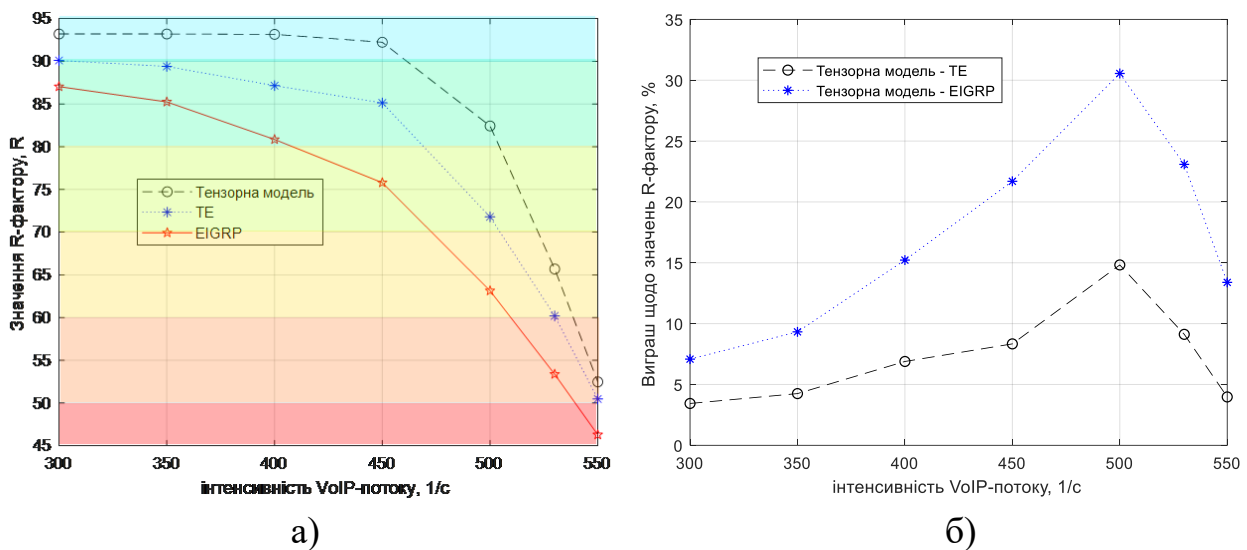


Рис. 2. Результати порівняльного аналізу рішень QoE-маршрутизації

У цьому ж розділі вперше запропоновано тензорні моделі швидкої перемаршрутизації голосового трафіка із захистом як структурних елементів мережі (каналу, вузла, маршруту), так і рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором. У межах цих моделей потрібно розрахувати маршрутні змінні $x_{i,j}^k$ та $\bar{x}_{i,j}^k$, які визначають порядок маршрутизації за основними та резервними шляхами відповідно.

Значення цих змінних мають відповідати умовам (13)–(16), а для захисту структурних елементів ТКМ ще й умовам (23)–(25).

Для забезпечення захисту рівня QoE за показником R-фактора додатково до умови (34), яка відповідала за основні шляхи, уведено умову

$$\bar{R} \geq R_{\langle \text{вим} \rangle}. \quad (37)$$

Виконання (37) гарантувало заданий рівень QoE вздовж резервних шляхів. Значення \bar{R} визначається з використанням виразів (31)–(33), у яких середня міжкінцева затримка \bar{T}_a (мс) залежно від типу використаної тензорної моделі розраховується відповідно до (6) або (9), а відсоток утрачених пакетів знаходиться як

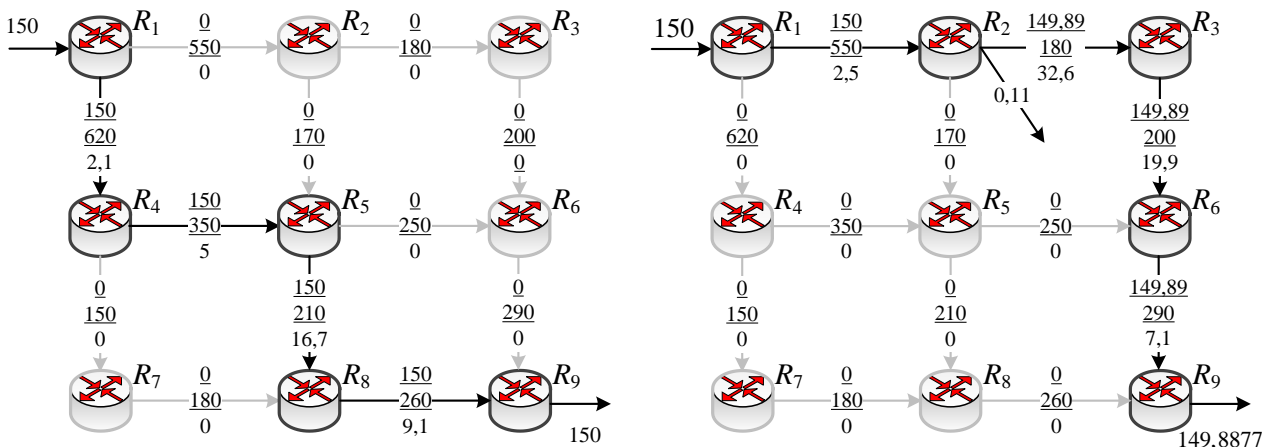
$$\bar{P}_{pl} = (1 - \bar{b}^k) \cdot 100\%. \quad (38)$$

Критерієм оптимальності для розв'язання задачі QoE-маршрутизації VoIP-потоків корпоративних територіально-розподілених ТКМ, за аналогією до (36), доцільно використати умову вигляду

$$J = \sum_{k \in K} \left(f(pr^k)R^k + f(\bar{pr}^k)R^k \right) \rightarrow \max. \quad (39)$$

Використання критерію (39) спрямовує на диференційоване підвищення рівня QoE за показником R-фактора VoIP-потокам відповідно до їхнього пріоритету (класу) як уздовж основних, так і резервних мультишляхів.

На розрахункових прикладах проведено дослідження процесу швидкої перемаршрутизації із захистом рівня QoE за показником R-фактора вздовж основного та резервного маршрутів, яке підтвердило адекватність та ефективність запропонованих рішень. На рис. 3 показано приклад розв'язання задачі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом маршруту за умови $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 90$. У розривах каналів зв'язку вказані (зверху донизу): інтенсивність потоку (1/с), пропускна здатність (1/с) та середня затримка пакетів у каналі (мс).



а) $T_a = 32,9$ мс $P_{pl} = 0\%$, $R = 93,1739$ б) $\bar{T}_a = 62,1$ мс, $\bar{P}_{pl} = 0,07\%$, $\bar{R} = 91,5749$

Рис. 3. Приклад розв'язання задачі швидкої QoE-перемаршрутизації

У розділі вперше запропоновано тензорні моделі маршрутизації мультимедійного трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у ТКМ за показником мультимедійної якості. Як базова пропонується математична модель (13)–(16). Зважаючи на те, що в подальшому дослідження будуть проводитися для маршрутизації мультимедійного трафіка, то нехай K – множина мультимедійних сесій у мережі. Тоді через k^{SP} позначимо аудіопотік, а через k^{video} – відеопотік k -ої мультимедійної сесії. Так, у ході вирішення задачі QoE-маршрутизації необхідно розрахувати множину маршрутних змінних $x_{i,j}^{k^{SP}}$ та $x_{i,j}^{k^{video}}$, кожна з яких характеризує частку інтенсивності відповідно аудіо- та відеопотоків, які генеруються протягом k -ої мультимедійної сесії та протікають у каналі (i, j) . На ці змінні накладаються умови:

$$0 \leq x_{i,j}^{k^{SP}} \leq 1 \quad \text{та} \quad 0 \leq x_{i,j}^{k^{video}} \leq 1. \quad (40)$$

Умови збереження аудіопотоку на вузлах ТКМ приймають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k^{SP}} = 1, \text{ якщо } k^{SP} \in K, u_i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k^{SP}} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k^{SP}} (1 - p_{j,i}) = 0, \text{ якщо } k^{SP} \in K, u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} x_{i,j}^{k^{SP}} (1 - p_{i,j}) = b^{k^{SP}}, \text{ якщо } k^{SP} \in K, u_i = d_k, \end{array} \right. \quad (41)$$

де $b^{k^{SP}}$ – частка інтенсивності аудіопотоку k^{SP} , що була успішно обслугована мережею, тобто пакети якого доставлені до маршрутизатора-отримувача. Умови збереження для відеопотоку k^{video} мають аналогічний до (41) вигляд.

Умови керованості процесом боротьби з перевантаженням є незмінними (16), але в них сумарна інтенсивність потоків $\lambda_{i,j}$ різних мультимедійних сесій, які надходять до каналу (i, j) , розраховується за допомогою виразу:

$$\lambda_{i,j} = \sum_{k \in K} (\lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{SP}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}}), \quad (42)$$

де $\lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вум} \rangle}$ та $\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle}$ – середні інтенсивності аудіо- та відеопотоків пакетів k -ої мультимедійної сесії відповідно.

Відповідно до рекомендації ITU-T G.1070 для розрахунку показника мультимедійної якості (MMq) використовується вираз

$$MMq = m_1 MM_{SV} + m_2 MM_T + m_3 MM_{SV} MM_T + m_4, \quad 1 \leq MMq \leq 5, \quad (43)$$

у якому

$$MM_{SV} = m_5 S_q + m_6 V_q + m_7 S_q V_q + m_8, 1 \leq MM_{SV} \leq 5, \quad (44)$$

– показник якості передачі аудіовізуальної інформації;

$$MM_T = \max\{AD + MS, 1\}, 1 \leq MM_T \leq 5, \quad (45)$$

– показник погіршення якості внаслідок наявності затримок і розсинхронізації процесів передачі пакетів аудіо- та відеопотоків; m_i – коефіцієнти, які залежать від параметрів дисплея термінального пристрою і цілей спілкування; MS – коефіцієнт, що враховує розсинхронізацію між звуком і зображенням; AD – параметр, який відображає вплив середніх затримок пакетів аудіо- (T_S) та відео- (T_V) потоків (параметри T_S та T_V задаються в мілісекундах); S_q і V_q – показники якості передачі звуку та зображення відповідно, які є також функціями величин середніх затримок T_S , T_V та відсотка втрачених мовних та відеопакетів P_S та P_V відповідно.

Тоді умови захисту рівня QoE мають такий вигляд:

$$MM_q^k \geq MM_{q<вим>}^k \quad (46)$$

де MM_q^k та $MM_{q<вим>}^k$ – розраховане значення та вимоги, які висуваються до рівня QoE в процесі обслуговування k -го мультимедійного потоку.

Аналіз моделі (40)–(46) вказує на те, що основною проблемою у розрахунку MM_q є визначення виразів для знаходження T_S та T_V (мс), а також P_S та P_V (%) для аудіо- й відеопотоків відповідно, які також залежать від шуканих

маршрутних змінних $x_{i,j}^{k,sp}$ та $x_{i,j}^{k,video}$ (рис. 4).

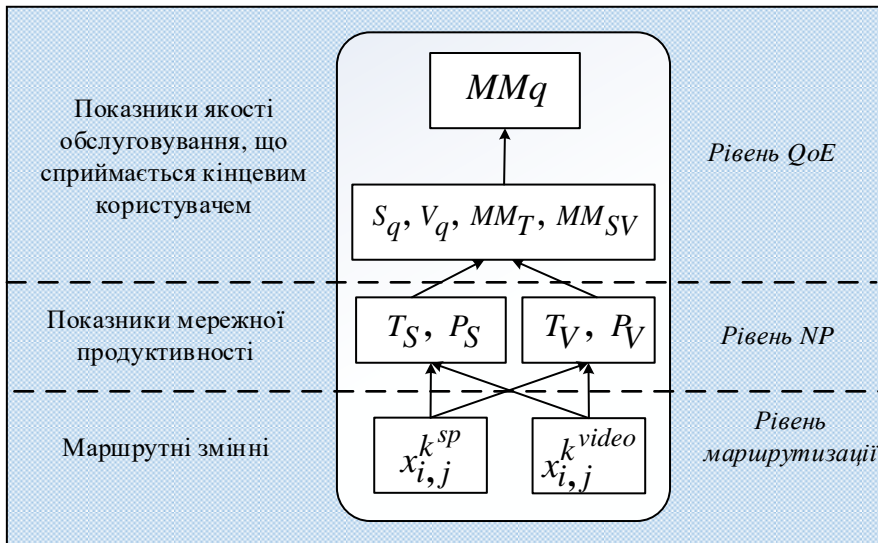


Рис. 4. Функціональна ієрархія залежності показників QoE, NP та маршрутних змінних у процесі маршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ

Тоді, на основі використання тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, розрахувати шукані показники мережної продуктивності, враховуючи (9) та (35), можна таким чином:

$$T_S^k = \frac{1000}{\lambda_{k^{sp}}^{\langle eum \rangle} b^{k^{sp}}} \left(\Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_\gamma + \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_\epsilon \right), T_V^k = \frac{1000}{\lambda_{k^{video}}^{\langle eum \rangle} b^{k^{video}}} \left(\Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_\gamma + \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_\epsilon \right), \quad (47)$$

$$P_S^k = (1 - b^{k^{sp}}) \cdot 100\%, \quad P_V^k = (1 - b^{k^{video}}) \cdot 100\%. \quad (48)$$

Критерієм оптимальності маршрутних рішень у цьому випадку може бути умова, пов'язана з максимізацією загальної продуктивності ТКМ:

$$\max_{x^{sp}, x^{video}, b^{sp}, b^{video}} \sum_{k \in K} \left(\lambda_{k^{sp}}^{\langle eum \rangle} b^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle eum \rangle} b^{k^{video}} \right). \quad (49)$$

У випадках, коли весь доступний мережний ресурс варто максимально задіяти на підвищення QoE, доцільно використати критерій вигляду

$$\sum_{k \in K} f(pr^k) MM_q^k \rightarrow \max. \quad (50)$$

Застосування тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та відсотка втрачених для аудіо- та відеопотоків пакетів у мережі. У процесі дослідження тензорних моделей QoE-маршрутизації в ТКМ встановлено, що їхнє застосування дозволило покращити рівень мультимедійної якості на 25,5–28,46 % порівняно з моделлю, основою на маршрутних метриках EIGRP, та на 15,2–16,24 % порівняно з моделлю Traffic Engineering.

У розділі також запропоновані тензорні моделі швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка із захистом рівня мультимедійної якості, що надається кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі. Для врахування особливостей процесу швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ необхідно додатково ввести до розгляду та розрахувати маршрутні змінні $\bar{x}_{i,j}^{k^{sp}}$ та $\bar{x}_{i,j}^{k^{video}}$, що відповідно визначають частки інтенсивностей аудіо- та відеопотоків, які генеруються в ході k -ої мультимедійної сесії та протікають у каналі (i, j) , що належить резервному маршруту.

На маршрутні змінні $\bar{x}_{i,j}^{k^{sp}}$ та $\bar{x}_{i,j}^{k^{video}}$ накладаються такі обмеження:

$$\begin{cases} 0 \leq \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} \leq 1; \\ 0 \leq \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} \leq 1. \end{cases} \quad (51)$$

Умови збереження потоку аудіо- та відеопакетів k -ої мультимедійної сесії вздовж резервного шляху мають вигляд, аналогічний до (41). У них $\bar{b}^{k^{SP}}$ та $\bar{b}^{k^{video}}$ – частки інтенсивностей аудіо- та відеопотоків k -ї мультимедійної сесії, що були успішно обслуговані мережею та доставлені до маршрутизатора-отримувача; $\bar{p}_{i,j}$ – відсоток втрат пактів на j -му інтерфейсі i -го маршрутизатора, що входить до резервного маршруту. Умови захисту структурних елементів ТКМ визначаються виразами (23)–(25). Для забезпечення керованості процесом боротьби з перевантаженням каналів і черг у процесі використання резервних маршрутів у структуру моделі додатково вводяться умови (26).

Загалом модель, представлена виразами (43)–(46), дозволяє забезпечити мультимедійну якість у ТКМ уздовж основного маршруту. Тоді, аналогічно до (48), умови захисту рівня мультимедійної якості у використанні резервних шляхів будуть мати такий вигляд:

$$\overline{MM}_q^k \geq MM_{q < \text{вим}}^k, \quad (52)$$

де \overline{MM}_q^k – значення показника QoE, яке забезпечується під час обслуговування k -го мультимедійного потоку за допомогою резервного шляху.

Для розрахунку \bar{T}_S та \bar{T}_V (мс), а також \bar{P}_S та \bar{P}_V (%) для аудіо- та відеопотоків відповідно використовуються вирази, аналогічні до (47) та (48). У цих виразах інтенсивності агрегованого потоку $\lambda_{i,j}$ та $\bar{\lambda}_{i,j}$, що надходять до каналу (i, j) (1/с) у процесі його використання k -м потоком в основному та резервному маршрутах відповідно, розраховуються як

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \sum_{k \in K} (\lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^{k^{SP}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}}); \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \sum_{k \in K} (\lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{SP}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}}), \end{cases} \quad (53)$$

у випадку, коли в разі відмови будь-якого елемента мережі всі маршрутизатори відразу перемкнуть потоки пакетів на резервні шляхи або

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^{k^{SP}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}} + \sum_{m \in K, m \neq k} \left[\lambda_{m^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{SP}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{SP}}) + \lambda_{m^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{video}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{video}}) \right]; \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{SP}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} + \sum_{m \in K, m \neq k} \left[\lambda_{m^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{SP}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{SP}}) + \lambda_{m^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{video}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{video}}) \right], \end{cases} \quad (54)$$

коли лише на резервні шляхи перемкнуться саме ті потоки, що проходили через елемент мережі, який відмовив.

Критеріями оптимальності рішень щодо швидкої QoE-перемаршрутизації можуть бути аналоги виразів (49) та (50). Наприклад, для підвищення рівня QoE варто використовувати критерій вигляду

$$\sum_{k \in K} f(pr^k) \left[MM_q^k + \overline{MM}_q^k \right] \rightarrow \max. \quad (55)$$

Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та відсотка втрат пакетів для аудіо- та відеопотоків як уздовж основного, так і резервного шляхів. У дисертації на низці прикладів продемонстровано працездатність та адекватність отриманих рішень з точки зору забезпечення захисту рівня мультимедійної якості в процесі швидкої перемаршрутизації в умовах відмов каналів та вузлів ТКМ.

У **п'ятому розділі** отримала подальший розвиток декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням QoS у ТКМ, яка складається з N послідовно з'єднаних між собою доменів. ТКМ описувалася графом $\Gamma = (R, W)$, а кожен p -й домен моделювався підграфом $\Gamma^p = (R^p, W^p)$, де $V^p = \left\{ R_i^p; i = \overline{1, m_p} \right\}$ – множина маршрутизаторів p -го домену, $W^p = \left\{ W_{i,j}^p; i, j = \overline{1, m_p}, i \neq j \right\}$ – множина каналів, що з'єднують маршрутизатори p -го домену, де m_p та n_p – загальна кількість маршрутизаторів та каналів зв'язку у p -му домені відповідно.

У ході декомпозиції ТКМ границя між доменами проходила через маршрутизатори мережі. Також для кожного p -го домену визначено множину приграничних маршрутизаторів B^p ($B^p \in R^p$), у якій $B_{in}^{p,k}$ – підмножина маршрутизаторів, через які пакети k -го потоку надходять до p -го домену; $B_{out}^{p,k}$ – підмножина маршрутизаторів, через які пакети k -го потоку вибувають з p -го домену. Для кожного каналу зв'язку $W_{i,j}^p$ через $\varphi_{i,j}^p$ позначено його пропускну здатність (1/с).

Унаслідок розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації необхідно розрахувати маршрутні змінні $x_{i,j}^{p,k}$, які визначають частку інтенсивності k -го потоку пакетів, що протікає в каналі $W_{i,j}^p \in W^p$:

$$0 \leq x_{i,j}^{p,k} \leq 1. \quad (56)$$

Умови запобігання перевантаження каналів p -го домену мали вигляд:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^{p,k} \leq \varphi_{i,j}^p, \quad p = \overline{1, N}. \quad (57)$$

Позначимо через $\lambda_{i,j}^{p,k} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^{p,k}$ інтенсивність k -го потоку пакетів, що протікає в каналі $W_{i,j}^p$. Змінні $x_{i,j}^{p,k}$ є координатами векторів \bar{x}_p^k . Для забезпечення зв'язності міждоменних маршрутів вводяться умови міждоменної взаємодії:

$$C_{p,q}^k \bar{x}_p^k = C_{q,p}^k \bar{x}_q^k, \quad p, q = \overline{1, N}, \quad p \neq q, \quad k \in K, \quad (58)$$

де $C_{p,q}^k$ – матриця взаємодії p -го та q -го доменів, яка має розмір $m_{p,q} \times m_x^{p,k}$; $m_{p,q} = |R^p \cap R^q|$ – кількість маршрутизаторів, через які проходить границя між p -м і q -м доменами; $m_x^{p,k}$ – число координат $x_{i,j}^{p,k}$ вектора \bar{x}_p^k .

Умови забезпечення QoS за середньою міжкінцевою затримкою пакетів для кожного k -го потоку в мультидоменній ТКМ приймають вигляд

$$\sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} \leq \tau_{\langle don \rangle}^k, \quad (59)$$

де $\tau_{MP}^{p,k}$ – значення середньої затримки пакетів k -го потоку в p -му домені ТКМ.

У випадку попереднього нормування значень міжкінцевих показників якості обслуговування в підмережах умови (61) замінюються на вирази вигляду

$$\sum_{p=1}^N \tau_{\langle don \rangle}^{p,k} \leq \tau_{\langle don \rangle}^k, \quad \text{у разі } \tau_{MP}^{p,k} \leq \tau_{\langle don \rangle}^{p,k}, \quad (60)$$

де $\tau_{\langle don \rangle}^{p,k}$ – нормовані вимоги щодо середньої затримки пакетів k -го потоку в p -му домені ТКМ. Забезпечення виконання QoS-умов (59) або (60) у процесі міждоменної маршрутизації пов'язане з необхідністю аналітичного розрахунку значень затримок $\tau_{MP}^{p,k}$. Для цього можна використати умови, аналогічні до (12)

$$\frac{\Lambda_\gamma^t E_{\gamma \varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma}{\lambda_k^{(вим)}} \leq \tau_{\langle don \rangle}^{p,k}. \quad (61)$$

Проте вирази (59)–(61) справедливі для випадку двополюсного варіанта структури p -го домену ТКМ, але в загальному випадку в структурі довільного домену кожній з множин $B_{in}^{p,k}$ та/або $B_{out}^{p,k}$ можуть належати одночасно декілька маршрутизаторів. Тому для врахування подібної особливості мультидоменної архітектури ТКМ у роботі пропонується така методика.

1. У процесі маршрутизації k -го потоку для кожного p -го домену визначається пара маршрутизаторів – R_{in}^p та R_{out}^p , між якими буде розраховуватися й

аналізуватися середня затримка пакетів $\tau_{MP}^{p,k}$ шляхом її порівняння з $\tau_{\langle \text{дон} \rangle}^{p,k}$ (60),

(61). У домені-джерелі пакетів k -го потоку R_{in}^p – це маршрутизатор, через який k -й потік надходив до ТКМ. Для домену-отримувача пакетів k -го потоку як R_{out}^p був маршрутизатор, через який k -й потік вибував із мережі.

2. У структуру ТКМ на границях p -го домену, який взаємодіє з іншими доменами через два та більше маршрутизаторів, вводяться додатково уявні маршрутизатори R_{in}^p та R_{out}^p , що за допомогою уявних каналів зв'язку стають суміжними для маршрутизаторів з множин $B_{in}^{p,k}$ та $B_{out}^{p,k}$ відповідно. Якщо границя між p -м і q -м доменами проходить через декілька маршрутизаторів, як це показано, наприклад, на рис. 5, то уявні маршрутизатори R_{in}^q та R_{out}^p збігаються.

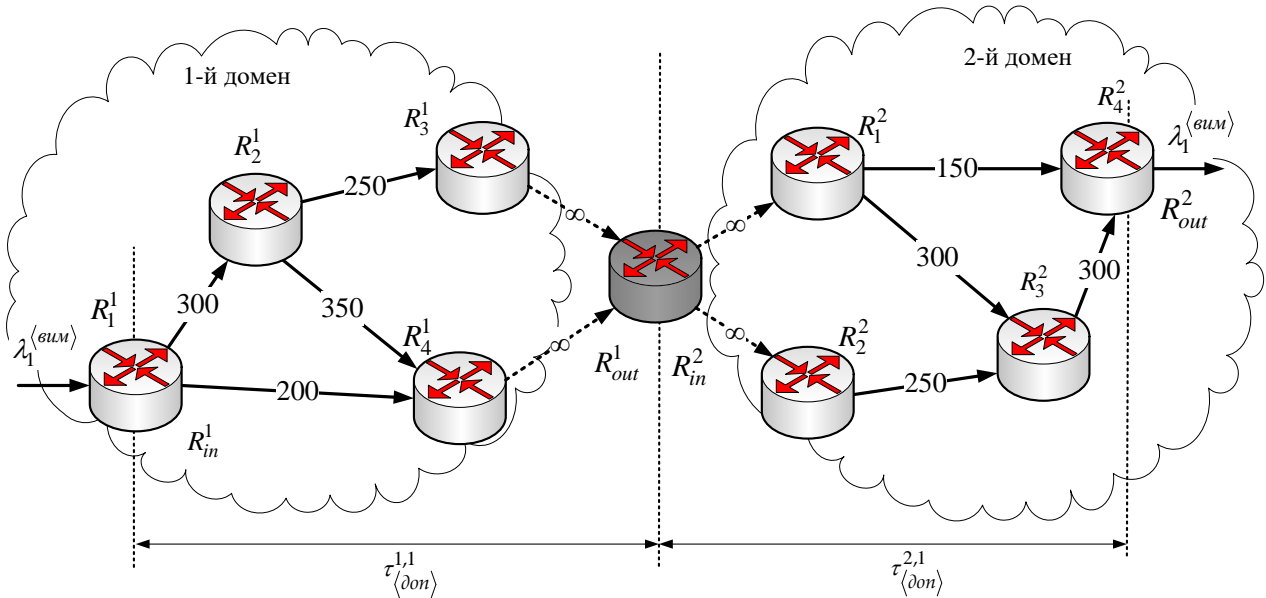


Рис. 5. Принцип введення в структуру ТКМ уявних маршрутизаторів та каналів

Уведення уявних маршрутизаторів обумовлене тим, що значення СМЗП k -го потоку в p -му домені ТКМ ($\tau_{MP}^{p,k}$) тепер можна оцінювати та аналізувати вже між парою маршрутизаторів R_{in}^p та R_{out}^p . Для того, щоб затримки пакетів в уявних каналах зв'язку, які з'єднують реальні приграничні маршрутизатори з уявними, не впливали на розрахунок $\tau_{MP}^{p,k}$, їхні пропускні здатності в ході розрахунків мають прямувати до $+\infty$.

Тоді для кожного маршрутизатора p -го домену необхідно виконати умови збереження k -го потоку для забезпечення зв'язності внутрішньодоменних ділянок міждоменних маршрутів:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 1, \text{ якщо } R_i^p = R_{in}^p; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 0, \text{ якщо } R_i^p \neq R_{in}^p, R_{out}^p; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = -1, \text{ якщо } R_i^p = R_{out}^p. \end{array} \right. \quad (62)$$

Розрахунок маршрутних векторів \vec{x}_p^k забезпечено в процесі розв'язання оптимізаційної задачі з використанням такого критерію оптимальності:

$$\min F, \quad F = \sum_{p \in N} \sum_{k \in K} (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k, \quad (63)$$

де H_p^k – діагональна матриця маршрутних метрик каналів зв'язку p -го домену.

З використанням моделі (56)–(63) у роботі синтезовано два методи ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування з нормуванням QoS-показників (60) і без нормування (59). В основу цих методів покладено принцип цільової координації, у межах якого здійснюється перехід до задачі на безумовний екстремум $\min_{\vec{x}} F = \max_{\vec{\mu}} L$, де лагранжیان має такий вигляд:

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\vec{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \vec{x}_p^k - C_{q,p}^k \vec{x}_q^k) + \sum_{k \in K} f^k \left(\sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle don \rangle}^k \right), \quad (64)$$

де $\vec{\mu}_{p,q}^k$ – вектори множників Лагранжа $\vec{\mu}$, віднесені до кожної з умов взаємодії доменів (60); f^k – множники Лагранжа, які віднесені до кожної з QoS-умов (59).

Якщо лагранжیان (64) представити у формі $L = \sum_{p=1}^N L_p$, то кожен з лагран-

жіанів доменів буде мати такий вигляд:

$$L_p = \sum_{k \in K} (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\vec{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \vec{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\vec{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \vec{x}_p^k + \sum_{k \in K} f^k \tau_{MP}^{p,k}. \quad (65)$$

Задачі ієрархічних рівнів методу міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій ТКМ будуть мати таке наповнення. Перший (нижній) ієрархічний рівень маршрутизації, який охоплює SDN-контролери доменів, відповідає за розрахунок маршрутних змінних, представлених векторами \vec{x}_p^k

($p = \overline{1, N}$, $k \in K$), у ході мінімізації лагранжіанів (65), за умови обмежень (56), (57) та (62). Результати розрахунків передаються на верхній рівень – на SDN-контролер мережі. На верхньому рівні SDN-контролер мережі здійснює координацію рішень, отриманих на нижньому рівні SDN-контролерами доменів, шляхом модифікації $\vec{\mu}_{p,q}$ та f^k ($k \in K$) у ході виконання градієнтних процедур:

$$\vec{\mu}_{p,q}^k(a+1) = \vec{\mu}_{p,q}^k(a) + \nabla \vec{\mu}_{p,q}^k, \nabla \vec{\mu}_{p,q}^k(x) \Big|_{x=x^*} = C_{p,q} \vec{x}_p^k - C_{q,p} \vec{x}_q^k, \quad (66)$$

$$f^k(a+1) = f^k(a) + \nabla f^k, \nabla f^k(x) \Big|_{x=x^*} = \sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle don \rangle}^k, \quad (67)$$

де a – номер ітерації; $\nabla \vec{\mu}_{p,q}^k$ та ∇f^k – градієнти функції (65), які розраховуються відповідно до отриманих на нижньому рівні результатів розв’язання задач маршрутизації \vec{x}_p^k ($p = \overline{1, N}$, $k \in K$) у кожному конкретному домені.

Модифіковані значення $\vec{\mu}_{p,q}^k$ та \vec{f} передаються на нижній рівень (на SDN-контролери доменів) для розрахунку нових маршрутних векторів \vec{x}_p^k . Процес розрахунків має ітераційний характер. Зв’язність міждоменних маршрутів (58) та виконання QoS-умов (59) забезпечувалася за умови таких значень градієнтів:

$$\nabla \vec{\mu}_{p,q}^k(x) = 0 \quad \text{та} \quad \nabla f^k(x) \leq 0.$$

У разі забезпечення нормованої за доменами якості обслуговування (60) у лагранжіанах (64) та (65) будуть відсутні останні доданки, а задача щодо виконання QoS-вимог (61) буде покладена на нижній рівень.

У розділі отримав подальший розвиток метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом QoS за показниками пропускної здатності та СМЗП. Новизною методу є забезпечення захисту рівня якості обслуговування в мультидоменних ТКМ за показниками пропускної здатності та СМЗП у процесі резервування (захисту) міждоменних маршрутизаторів, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

У межах методу, що пропонується, загалом використовуються позначення (56)–(67). Для побудови множини резервних шляхів додатково вводяться маршрутні змінні $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$, кожна з яких визначає долю k -го потоку пакетів, що передаються в p -му домені ТКМ між маршрутизаторами R_i^p та R_j^p , які містяться в резервному шляху. Змінні $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$ можуть бути координатами векторів \vec{x}_p^k .

На маршрутні змінні $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$ також накладаються обмеження, аналогічні до умов (56), (57), (62), а також умов міждоменної взаємодії

$$C_{p,q}^k \bar{x}_p^k = C_{q,p}^k \bar{x}_q^k, \quad p, q = \overline{1, P}, \quad p \neq q, \quad k \in K. \quad (68)$$

Схема захисту міждоменного маршрутизатора реалізується шляхом захисту множини каналів зв'язку, які йому інцидентні. Позначимо через $R_{i^*}^P$ множини маршрутизаторів, що в p -му домені є суміжними до маршрутизатора R_i^P . Нехай необхідно реалізувати захист маршрутизатора, який розділяє p -й та q -й домени ТКМ у процесі передачі пакетів у цьому самому напрямку. У випадку реалізації багатошляхової маршрутизації мають виконуватися такі умови:

$$0 \leq \bar{x}_{j,i}^{p,k} \leq \delta_{j,i}^{p,k} \quad \forall R_j^P \in R_{i^*}^P \text{ якщо } R_{i^*}^P \subset R^P \setminus B_{out}^{p,k}, \quad (69)$$

де $\delta_{j,i}^{p,k} = \begin{cases} 0, & \text{у разі захисту каналу зв'язку } W_{j,i}^P; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

Для забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності – одночасно за пропускну здатністю та середньою міжкінцевою затримкою пакетів уздовж основних маршрутів необхідно виконати QoS-умови (59). На маршрутні змінні $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$, які визначають резервні шляхи, також накладаються QoS-умови

$$\sum_{p=1}^N \bar{\tau}_{MP}^{p,k} \leq \tau_{\langle don \rangle}^k, \quad (70)$$

де $\bar{\tau}_{MP}^{p,k}$ – це затримка пакетів k -го потоку вздовж резервних шляхів у p -му домені.

В основу методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидомених ТКМ покладено розв'язання оптимізаційної задачі:

$$\min_{x, \bar{x}} F, \quad F = \sum_{p=1}^P \sum_{k \in K} \left[(\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + (\bar{\bar{x}}_p^k)^t H_p^k \bar{\bar{x}}_p^k \right]. \quad (71)$$

Для розрахунку додатково й множини резервних шляхів лагранжیان (66) змінюють свою форму та зміст:

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - C_{q,p}^k \bar{x}_q^k) + \sum_{k \in K} f^k \left(\sum_{p=1}^N \bar{\tau}_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle don \rangle}^k \right) + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\bar{\bar{\mu}}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \bar{\bar{x}}_p^k - C_{q,p}^k \bar{\bar{x}}_q^k) + \sum_{k \in K} \bar{f}^k \left(\sum_{p=1}^N \bar{\tau}_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle don \rangle}^k \right), \quad (72)$$

де $\bar{\mu}_{p,q}^k$ та \bar{f}^k – множники Лагранжа, пов’язані з резервними шляхами.

Тоді кожен із лагранжіанів доменів (65) змінить свою форму

$$L_p = \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\bar{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k + \sum_{k \in K} f^k \tau_{MP}^{p,k} + \\ + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\bar{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k + \sum_{k \in K} \bar{f}^k \bar{\tau}_{MP}^{p,k}. \quad (73)$$

У межах методу перший (нижній) ієрархічний рівень маршрутизації, який охоплює SDN-контролери доменів, відповідає за визначення основних та резервних шляхів на підставі розрахунку маршрутних змінних, представлених векторами \bar{x}_p^k та \bar{x}_p^k , у ході мінімізації лагранжіанів (73). Результати розрахунків передаються на верхній рівень – на SDN-контролер мережі загалом. На верхньому рівні SDN-контролер мережі здійснює координацію рішень, які надходять від SDN-контролерів доменів, для забезпечення зв’язності основних і резервних шляхів (58), (68) та виконання QoS-умов (59) і (70). Координація в напрямку розрахунку основних маршрутів реалізується шляхом виконання градієнтних процедур, аналогічних до (66) та (67). Оновлені значення векторів множників Лагранжа передаються на SDN-контролери доменів (на нижній рівень) для визначення нових основних і резервних шляхів на підставі розрахунку маршрутних векторів \bar{x}_p^k і \bar{x}_p^k . Зв’язність міждоменних основних та резервних маршрутів з виконанням QoS-умов (59) і (70) буде забезпечуватися після завершення роботи описаних градієнтних процедур.

Під час дослідження запропонованих методів міждоменної QoS-маршрутизації та відмовостійкої QoS-маршрутизації на низці розрахункових прикладів підтверджена їхня працездатність та ефективність з точки зору забезпечення якості обслуговування та зв’язності міждоменних шляхів. Експериментально встановлено, що методи сходилися до оптимального рішення за кінцеву кількість ітерацій. Для тестових структур мереж кількість ітерацій координаційних процедур за умови відповідного налаштування градієнтного пошуку для методів QoS-маршрутизації не перевищувала трьох (рис. 6), а для методу відмовостійкої QoS-маршрутизації не перевищувала п’яти. Зменшення кількості подібних ітерацій сприяє зниженню обсягів службового трафіка, який передається в мережі між маршрутизаторами та SDN-контролерами різних рівнів, а також мінімізації загального часу розв’язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації.

У шостому розділі для перевірки адекватності та підтвердження ефективності запропонованих у попередніх розділах роботи тензорних математичних

моделей та методів відмовостійкої маршрутизації було проведено дослідження з використанням імітаційних моделей ТКМ, побудованих за допомогою пакетів Network Simulator 3 (рис. 7) та IxChariot. Рівень адекватності запропонованих аналітичних рішень, отриманих із використанням пакету MATLAB, оцінювався за ступенем їхньої близькості до результатів імітаційного моделювання.

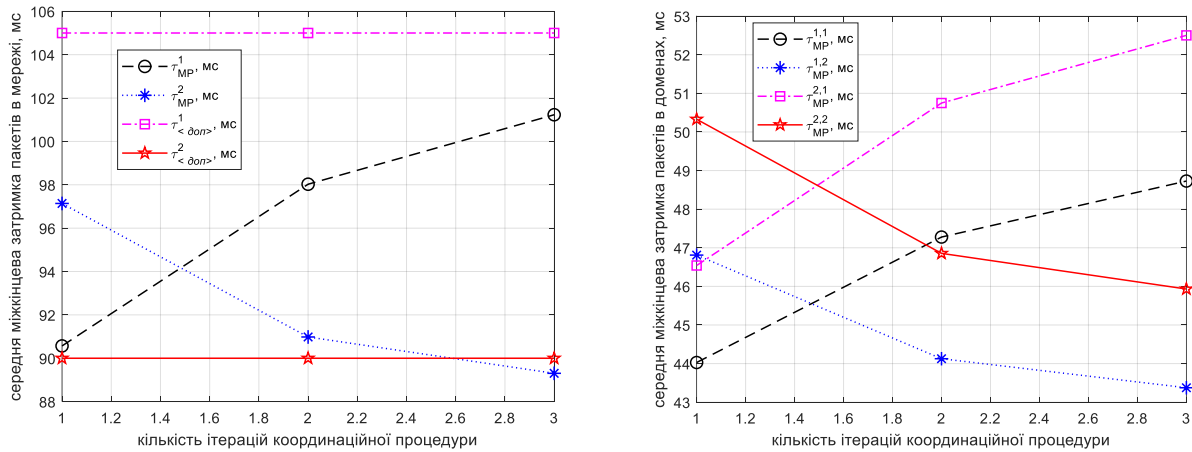


Рис. 6. Динаміка зміни середніх міжкінцевих затримок пакетів у ТКМ загалом (а) та за окремими доменами (б) для двох потоків пакетів відповідно до ітерацій координаційної процедури (6б)

Результати дослідження тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності в ТКМ, представлених у різних геометричних базисах, з використанням пакету NS3 підтвердили її адекватність. Розбіжність результатів аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання за продуктивністю ТКМ не перевищувала 7,2 %, а за середньою міжкінцевою затримкою пакетів – 5,4 %.

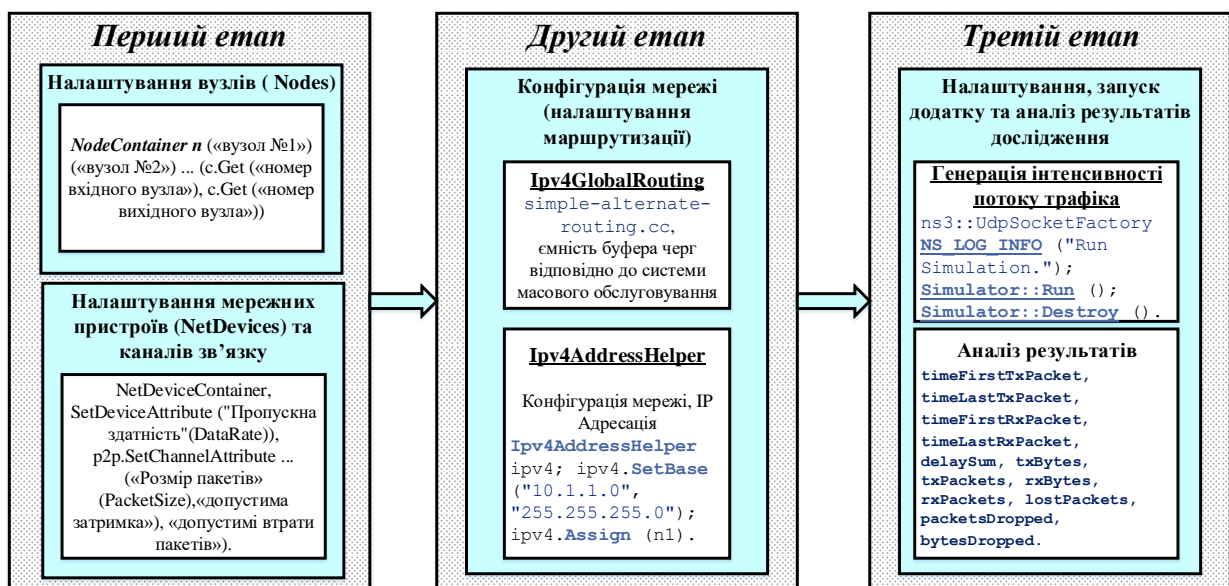


Рис. 7. Етапи проведення експериментального дослідження ТКМ у NS3

Результати дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом якості обслуговування за R-фактором із використанням пакету IxChariot підтвердили її адекватність: розбіжність у результатах аналітичних розрахунків R-фактора та імітаційного моделювання становила 2,8 % у процесі аналізу основного мультишляху та 2,77 % під час використання резервного мультишляху. Результати дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості за допомогою IxChariot підтвердили її адекватність: розбіжність у результатах аналітичних розрахунків показника мультимедійної якості та імітаційного моделювання становила 3,88 % при аналізі основного мультишляху та 7,67 % при використанні резервного мультишляху (рис. 8).

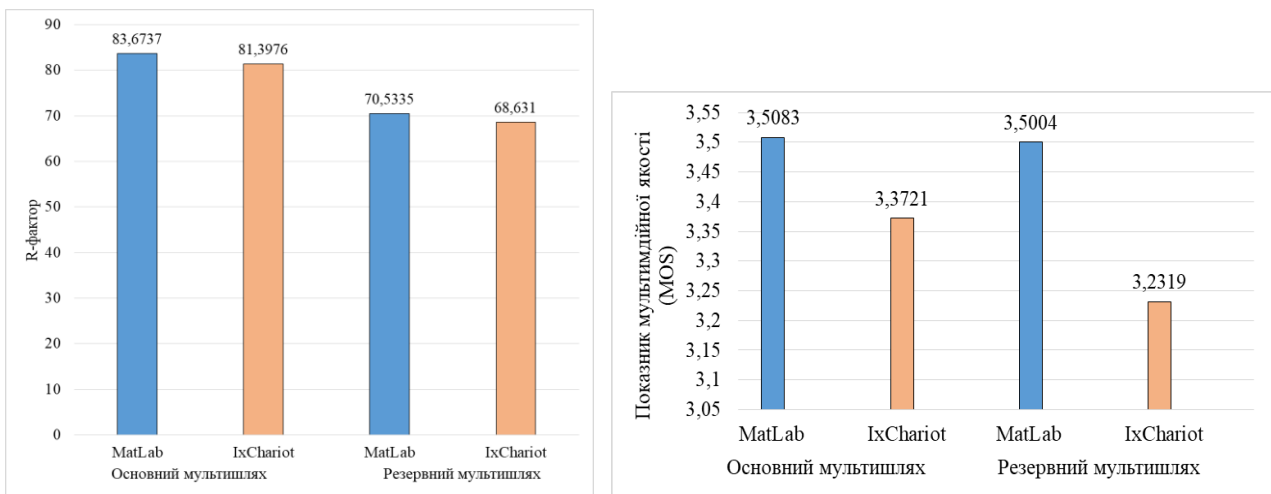


Рис. 8. Результати порівняльного аналізу отриманих значень QoE-показників за допомогою пакетів MatLab та IxChariot

Сформульовано систему рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у роботі математичних моделей та методів відмовостійкої маршрутизації як у традиційних ТКМ, що функціонують на основі технологій IP та MPLS, так і в програмно-конфігурованих мережах, зокрема з ієрархічною архітектурою. Рекомендації стосуються необхідності збирання та оброблення додаткової інформації про стан мережі, характеристики трафіка в ТКМ та вимоги до рівня QoS за показниками мережної продуктивності або QoE. Загалом практична реалізація запропонованих тензорних моделей та методів відмовостійкої маршрутизації пов'язана з необхідністю розроблення, тестування та впровадження нових протоколів та технологій маршрутизації.

ВИСНОВКИ З РОБОТИ

У дисертації вирішена актуальна науково-прикладна проблема, що полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіка в напрямку забезпечення захисту рівня QoS як за множиною показників

мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем. За результатами її вирішення можна зробити такі висновки.

1. Під час проведеного дослідження тенденцій розвитку телекомунікацій встановлено: рівень вимог щодо забезпечення якості обслуговування, надійності та відмовостійкості ТКМ постійно зростає, що потребує залучення до вирішення цієї важливої проблеми всіх доступних організаційних та технічних мережних засобів. Важливе місце серед подібних рішень відводиться протоколам маршрутизації, які мають забезпечувати проактивний та реактивний захист елементів ТКМ. Зі зростанням у сучасному мережному трафіку частки мультимедійних потоків, що досить чутливі до затримок та втрат пакетів, найбільш нагальними стають задачі щодо забезпечення якості обслуговування за множиною показників NP та QoE.

2. Результати аналізу наявних технологічних рішень та новітніх теоретичних досліджень в області відмовостійких ТКМ продемонстрували, що актуальним напрямом наукових досліджень є розвиток теорії відмовостійкої маршрутизації з розробленням відповідних математичних моделей та методів для забезпечення поряд із локальним/сегментним/глобальним захистом структурних елементів ТКМ (каналу, вузла та маршруту) також захисту рівня якості обслуговування за множиною QoS-показників уздовж основних та резервних шляхів загалом. Для оптимізації процесів відмовостійкої маршрутизації запропоновано використовувати функціонал математичного апарату тензорного аналізу мереж, за допомогою якого необхідно сформулювати в аналітичному вигляді шукані умови захисту як множини показників мережної продуктивності, так і рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем.

3. Удосконалено тензорну модель телекомунікаційної мережі, яку представлено в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Новизною запропонованого рішення є отримання умов забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускну здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, які, на відміну від відомих, є справедливими для різних режимів завантаженості мережі, а не тільки для режиму, близькому до перевантаження, та не потребують задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ. Застосування вдосконаленої тензорної моделі для розв'язання задач маршрутизації дозволяє підвищити рівень QoS, знизивши середню міжкінцеву затримку пакетів, та за необхідності забезпечити адаптивний характер використання каналів та шляхів ТКМ під час реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

4. Уперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускну здатності та ймовірності втрат пакетів у телекомунікаційній мережі. Викон-

ристання моделі дозволяє реалізувати відомі схеми захисту каналу, вузла та маршруту в ТКМ із забезпеченням допустимих значень пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і вздовж резервного шляхів.

5. Удосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ за множиною показників мережної продуктивності. Новизна запропонованих тензорних моделей полягає у формалізації умов забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, що особливо важливо в процесі маршрутизації мультимедійного трафіка. Ці умови виконувались як уздовж основних, так і резервних шляхів; та є справедливими не тільки під час реалізації схем захисту каналів та вузлів, але й у процесі захисту маршруту (маршрутів).

6. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у ТКМ за R-фактором, у процесі реалізації схем захисту каналів, вузлів та маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і резервного шляхів мережі.

7. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, наданих кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показником мультимедійної якості, під час реалізації схем захисту каналів, вузлів і маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат для аудіо- та відеопотоків пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) у мережі.

8. Отримала подальший розвиток декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, яка складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Новизною запропонованої моделі маршрутизації є модифікація умов збереження потоку, що дозволило сформулювати умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменних телекомунікаційних мережах за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів.

9. Подальшого розвитку набули методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною першого методу є забезпечення нормованої за доменами середньої міжкінцевої затримки пакетів, коли виконання нормованих вимог щодо якості обслуговування забез-

печується в кожному домені окремо, а координація маршрутних рішень здійснюється за умовами міждоменної взаємодії. Новизна другого методу полягає в тому, що координація маршрутних рішень здійснюється як за умовами міждоменної взаємодії, так і за умовами забезпечення наскрізної середньої затримки пакетів у ТКМ загалом.

10. Отримав подальший розвиток метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною методу є забезпечення захисту рівня якості обслуговування в мультидоменних ТКМ за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів під час резервування (захисту) міждоменних маршрутизаторів у процесі розрахунку основних і резервних шляхів, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

11. Застосування запропонованих рішень дозволяє покращити рівень якості обслуговування в мережі. Порівняно з математичними моделями, основаними на маршрутних метриках, вигреш у значеннях середньої міжкінцевої затримки пакетів становив від 6–12 % до 18–30 %; порівняно з рішеннями Traffic Engineering – від 5–8 % до 21,5–24 %. Залежно від завантаженості мережі вигреш щодо значень R-фактора становив у середньому від 12 % до 25 %. Вигреш щодо рівня мультимедійної якості вдалося забезпечити в середньому на 16–26 %.

12. Результати дослідження запропонованих тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності та QoE в ТКМ, представлених у різних геометричних базисах, підтвердили її адекватність. Розбіжність результатів аналітичних розрахунків, отриманих за допомогою середовища MATLAB та імітаційного моделювання з використанням пакетів NS3 та IxChariot, не перевищувала 5–8 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Еременко А. С., Тарики Н., Евдокименко М. А. Оптимизационная модель отказоустойчивой маршрутизации с билинейными условиями защиты пути. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017. № 2. С. 9–14.

2. Евдокименко М. О., Кравченко Б. Д., Лукова-Чуйко Н. В. Аналіз проблеми забезпечення ефективного балансування навантаження в мережах MPLS-TE. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. № 2 (21). С. 32–41. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/prtel_2017_2_5.

3. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Naors Y. Anad Alsaleem. Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Issue 2 (95). P. 40–46. (SCOPUS).

4. Єременко О. С., Євдокименко М. О. Огляд теоретичних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 1 (22). С. 25–42. DOI: 10.30837/pt.2018.1.02.

5. Lemeshko O., Nevzorova O., Piyashenko A., Yevdokymenko M. Hierarchical Coordination Method of Inter-Area Routing in Backboneless Network. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 90–102. **(SCOPUS)**

6. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. MPLS Traffic Engineering Solution of Multipath Fast ReRoute with Local and Bandwidth Protection. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 113–125. **(SCOPUS)**

7. Невзорова О. С., Євдокименко М. О. Особливості реалізації дворівневого методу маршрутизації на контролері з багатоядерною архітектурою в програмно-конфігурованій мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 2 (23). С. 75–88. DOI: 10.30837/pt.2018.2.06.

8. Harkusha S., Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of structurally functional selforganization of multi-radio multi-channel mesh networks using hypergraphs. *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on “Mathematics. Information Technologies. Education”, MoMLeT&DS-2019, Shatsk, Ukraine. 2019. Vol. 2386. P. 75–84. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2386/paper6.pdf>* **(SCOPUS)**

9. Євдокименко М. О., Шаповалова А. С. Метод оцінювання впливу атак на інфокомунікаційну мережу з урахуванням наявних вразливостей. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського*. 2018. Т. 29 (68), № 4. С. 67–72.

10. Kuzminykh I., Carlsson A., Yevdokymenko M., Sokolov V. Investigation of the IoT device lifetime with secure data transmission // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019, ruSMART 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham. Vol. 11660. P 16–27. **(SCOPUS)**

11. Yevdokymenko M. O., Shapovalova A. S., Nevzorova O. S. Proactive Approach for Security of the PAAS Model of Cloud System Based on Vulnerability Assessment. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2019. Vol. 8(91), P. 167–173. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-89119-22.pdf>

12. Лемешко О. В., Шаповалова А. С., Єременко О. С., Євдокименко М. О., Хайлан А. М. Математична модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та диференційованого обмеження трафіка в мережах SD-WAN. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56). С. 63–71.

13. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. № 3 (9). P. 127–134.

14. Євдокименко М. О. Метод ієрархічно-координаційної міждоменої маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування. *Проблеми телекомунікацій*. 2019. № 2 (25). С. 3–26. DOI: 10.30837/pt.2019.2.01.

15. Lemeshko O., Yeremenko O., Sleiman B., Yevdokymenko M. Fast ReRoute Model with Realization of Path and Bandwidth Protection Scheme in SDN. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 18, № 1. P. 23–30. (SCOPUS)

16. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Hu Z., Yeremenko O. Inter-domain routing method under normalized Quality of Service based on hierarchical coordination. *Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS), Zaporizhzhya, ZNTU*. 2020. Vol. 2608. P. 394–408. (SCOPUS)

17. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Вдосконалення потокової моделі маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 1(61). С. 31–43.

18. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку»*. 2020. Т. 2 (60). С. 152–159.

19. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Метод ієрархічної міждоменої маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 2(12). С. 169–182.

20. Lemeshko O., Yevdokymenko M. Advanced tensor approach to fast reroute with quality of service protection under multiple parameters. *Information and Telecommunication Sciences*. 2020. № 1. P. 41–52. DOI: 10.20535/2411-2976.12020.41-52.

21. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Tensor Model with Quality of Service Protection Under Multiple Parameters. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Cham. 2020. Vol. 48. P. 489–512. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2_22 (SCOPUS)

22. Harkusha S., Yevdokymenko M. The Development of Routing Flow Model in IEEE 802.11 Multi-radio Multi-channel Mesh Networks, Shown as a Konig Graph. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Cham. Vol. 48. P. 513–528. (SCOPUS)

23. Yevdokymenko M. Enhancement of the adaptive routing tensor model in the infocommunication network with providing quality of experience by the R-factor. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol 3, № 2(53). P. 15–22.

24. Yevdokymenko M. Investigation of Tensor Approach for Providing Multimedia Quality in Infocommunication Networks. Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Cyber Hygiene (CybHyg-2019) co-located with 1st International Conference on Cyber Hygiene and Conflict Management in Global Information Networks (CyberConf 2019). 2019. Vol. 2654. P. 227–239. (SCOPUS)

25. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Shapovalova A. Investigation of Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 108–119. (SCOPUS)

26. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A. M. Tensor Multi-flow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 120–131. (SCOPUS)

27. Lemeshko O., Yeremenko O., Hailan A.M., Yevdokymenko M., Shapovalova A. Policing Based Traffic Engineering Fast ReRoute in SD-WAN Architectures: Approach Development and Investigation. In: Al-Bakry A. et al. (eds) *New Trends in Information and Communications Technology Applications. NTICT 2020. Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham. Vol. 1183. P. 29–43. (SCOPUS)

28. Єременко О. С., Євдокименко М. О., Слейман Б. Удосконалена модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності в програмно-конфігурованих мережах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 163–171.

29. Harkusha S., Harkusha O., Ievdokymenko M. Hypergraph representations of topological model mesh-network IEEE 802.11. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 13th International Conference. Lviv, 2016. IEEE, 2016. P. 876–878. (SCOPUS)

30. Yevdokymenko M. An adaptive algorithm for detecting and preventing attacks in telecommunication networks. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Third International Scientific-Practical Conference, Kharkiv, Ukraine, 4–6 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 175–177. (SCOPUS)

31. Yevdokymenko M., Elsayed Mohamed, Paul Onwuakpa. Ethical hacking and penetration testing using raspberry PI. *Problems of Infocommunications Science and*

Technology (PIC S&T): Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 179–181. **(SCOPUS)**

32. Yevdokymenko M., Manasse M., Zalushniy D., Sleiman B. Analysis of Methods for Assessing the Reliability and Security of Infocommunication Network. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 199–202. **(SCOPUS)**

33. Yeremenko O., Yevdokymenko M., Persikov A. Flow-aware approach of evaluating probability of compromise in combined structure network. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 4–7 July, 2017. IEEE, 2017. P. 258–261. **(SCOPUS)**

34. Lemeshko O., Yevsieieva O., Yevdokymenko M. Tensor Flow-Based Model of Quality of Experience Routing. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*: Proceedings of the 14th International Conference, Lviv, Ukraine, 20–24 February, 2018. IEEE, 2018. P. 1005–1008. **(SCOPUS)**

35. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*: Proceedings of the XIIIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, Ukraine, 5–8 Sept. 2018. IEEE, 2018. P. 135–138. **(SCOPUS)**

36. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A. Tensor QoE-based Routing Model with Evaluation of the Quality Rating. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*: Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 10–14 September, 2018. IEEE, 2018. P. 1–4. **(SCOPUS)**

37. Lemeshko O., Al-Dulaimi A.M.K., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Comparative Analysis of Solutions for Management of Time-Frequency Resource in LTE Downlink. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*: Proceeding of the 4th IEEE International Symposium on Wireless Systems, Lviv, Ukraine, 20–21 September, 2018. IEEE, 2018. P. 108–111. **(SCOPUS)**

38. Yevdokymenko M., Sleiman B., Harkusha S., and Harkusha O. Method of fault tolerance evaluation in conditions of destabilizing factors influence in infocommunication network. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 9–12 October 2018. IEEE, 2018. P. 571–574. **(SCOPUS)**

39. Yevdokymenko M., Shapovalova A., Voloshchuk O., Carlsson A. Proactive Approach for Security of the Infocommunication Network Based on Vulnerability

Assessment. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 9–12 October 2018*. IEEE, 2018. P. 609–612. **(SCOPUS)**

40. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A.M., Segeč P., Papán J. Design of the Fast ReRoute QoS Protection Scheme for Bandwidth and Probability of Packet Loss in Software-Defined WAN. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronic (CADSM): Proceedings of the 15th International Conference, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, 26 February – 2 March, 2019*. P. 3/72–3/76. **(SCOPUS)**

41. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Mersni A., Segeč P., Papán J. Quality of Service Protection Scheme under Fast ReRoute and Traffic Policing Based on Tensor Model of Multiservice Network. *Information and Digital Technologies (IDT 2019): Proceedings of the International Conference, 25–27 June 2019*. Zilina, Slovakia. IEEE, 2019. P. 288–295. **(SCOPUS)**

42. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Ilyashenko A., Sleiman B. Traffic Engineering Fast ReRoute Model with Support of Policing. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON): Proceedings of the 2nd Ukraine Conference, Lviv, Ukraine, 2–6 July, 2019*. IEEE, 2019. P. 842–845. **(SCOPUS)**

43. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Nevzorova O., Snihurov A., Kovalenko T. Fast ReRoute Model with VoIP Quality of Experience Protection. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT): Proceedings of the 3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3–6 July, 2019*. IEEE, 2019. P. 16–21, **(SCOPUS)**

44. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Hailan A.M., Mersni A. Computation Method of Disjoint Paths under Maximum Bandwidth Criterion. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT): Proceedings of the 3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3–6 July, 2019*. IEEE, 2019. P. 161–164. **(SCOPUS)**

45. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Improvement of the Calculation Model the Set of Disjoint Paths with Maximum Bandwidth. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo): Proceedings of the Fourth International Conference, Odessa, Ukraine, 9–13 September, 2019*. IEEE, 2019. P. 1–4. **(SCOPUS)**

46. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Hailan A.M., Mersni A. Cyber Resilience Approach Based on Traffic Engineering Fast ReRoute with Policing. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS): Proceedings of the 10th IEEE International Conference, Metz, France, 2019*. IEEE, 2019. P. 117–122. **(SCOPUS)**

47. Yevdokymenko M. Routing Tensor Model with Providing Multimedia Quality. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 819–824. **(SCOPUS)**

48. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Load-Balancing Fast Re-Routing Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 538–542. **(SCOPUS)**

49. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Enhanced Solution of the Disjoint Paths Set Calculation for Secure QoS Routing. *Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*: Proceedings of the International Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 210–213. **(SCOPUS)**

50. Kuzminykh I., Yevdokymenko M. Analysis of Security of Rootkit Detection Methods *Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*: Proceedings of the International Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 196–199. **(SCOPUS)**

51. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Model with MultiMedia Quality Protection. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25–29 February, 2020. IEEE, 2020. P. 287–292. **(SCOPUS)**

52. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A.M. Tensor Based Load Balancing under Self-Similar Traffic Properties with Guaranteed QoS. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25–29 February, 2020. IEEE, 2020. P. 293–297. **(SCOPUS)**

53. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Segec P., Papan J. Advanced Performance-Based Fast Re-Routing Model with Path Protection. *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020)*: Proceedings of the 11th International Conference. Kyiv, Ukraine, 2020. IEEE, 2020. P. 23–28. **(SCOPUS)**.

АНОТАЦІЯ

Євдокименко М. О. Теоретичні основи відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в телекомунікаційних мережах з використанням тензорних моделей і методів. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 –

телекомунікаційні системи та мережі. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми, яка полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіку в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем. Розроблено та досліджено тензорні моделі телекомунікаційних мереж з удосконаленням умов забезпечення якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності та показників, що сприймаються на рівні користувачів. Проведено розробку та дослідження моделей і методів швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційних мережах із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки, ймовірності втрат пакетів та показниками якості обслуговування, що сприймається кінцевими користувачами – R-фактора та мультимедійної якості. Розроблено моделі і методи ієрархічно-координаційної маршрутизації та швидкої перемаршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із забезпеченням якості обслуговування за множиною показників. Проведено оцінку ефективності запропонованих у дисертації моделей та методів відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах та розроблено систему науково-методичних рекомендацій щодо практичного використання отриманих результатів.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, модель, метод, відмовостійкість, маршрутизація, швидка перемаршрутизація, потік, пропускна здатність, міжкінцева затримка, ймовірність втрат, R-фактор, мультимедійна якість, якість обслуговування, якість сприйняття послуг.

ABSTRACT

Yevdokymenko M. O. Theoretical foundations of fault-tolerant routing of delay- and loss-sensitive traffic in telecommunication networks using tensor models and methods. – Manuscript. Dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree in the speciality 05.12.02 – Telecommunication systems and networks. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the relevant scientific problem, which consists in the development of the theory of fault-tolerant routing of delay-sensitive and loss-sensitive traffic in the direction of ensuring the level of Quality of Service (QoS) under multiple network performance indicators, and the Quality of Experience (QoE) indicators.

The analysis conducted in the dissertation showed that the actual direction of scientific research is the development of the theory of fault-tolerant routing with the development of appropriate mathematical models and methods to ensure, along with local/segment/global protection of the structural elements of the telecommunication network (link/node/path/segment), to ensure the protection of the Quality of Service for a set of QoS indicators along the primary and backup paths as a whole.

The tensor model of the telecommunication network, which is presented in the basis of interpolator paths and internal node pairs, has been improved. The novelty of the proposed solution is to obtain conditions for quality of service according to the network performance indicators: bandwidth, average end-to-end delay and packet loss probability, which, in contrast to the known ones, are valid for different network utilization modes, not just for a mode close to overload, and do not require the utilization of all available communication links and TCN routes.

For the first time, a mathematical model of fast rerouting of data traffic with protection of the Quality of Service in terms of bandwidth and probability of packet loss indicators in a telecommunications network has been proposed. The system of tensor models of fast rerouting with protection of the TCN Quality of Service level by a set of network performance indicators has been improved. The novelty of the proposed tensor models is in formalizing the conditions for ensuring the protection of the Quality of Service level in terms of network performance indicators: bandwidth, average end-to-end delay and packet loss probability, which is especially important when routing multimedia traffic. For the first time, there has been proposed a system of tensor models for routing and fast rerouting of voice traffic with ensuring the Quality of Experience in the telecommunications network on the R-factor in the implementation of protection schemes for links, nodes and a path (paths). There has been proposed a system of tensor models of routing and fast rerouting of multimedia traffic with ensuring the Quality of Experience in the telecommunications network in terms of multimedia quality during the implementation of protection schemes for links, nodes and a route (routes). The decomposition model of inter-domain routing with the provision of the Quality of Service in the telecommunications network, which consists of a set of sequentially connected domains, has been further developed. Methods of hierarchical coordination routing in multi-domain telecommunication networks have been further developed. The effectiveness of the models and methods of fault-tolerant routing with protection of the QoS level in telecommunication networks is evaluated. A system of scientific and methodological recommendations for the practical use of the results obtained has been developed.

Keywords: telecommunication network, model, method, fault tolerance, routing, fast rerouting, flow, bandwidth, end-to-end delay, loss probability, R-factor, multimedia quality, Quality of Service, Quality of Experience.

АННОТАЦИЯ

Евдокименко М. А. Теоретические основы отказоустойчивой маршрутизации чувствительного к задержкам и потерям трафика в телекоммуникационных сетях с использованием тензорных моделей и методов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы, которая заключается в развитии теории отказоустойчивой маршрутизации чувствительного к задержкам и потерям трафика в направлении обеспечения защиты уровня качества обслуживания как по множеству показателей сетевой производительности, так и по показателям качества восприятия пользователем. Разработаны и исследованы тензорные модели телекоммуникационных сетей с усовершенствованием условий обеспечения качества обслуживания по множеству показателей сетевой производительности и показателей, которые воспринимаются на уровне пользователей. Разработаны и исследованы модели и методы быстрой перемаршрутизации в телекоммуникационных сетях с защитой уровня качества обслуживания по показателям пропускной способности, средней межконцевой задержки, вероятности потерь пакетов и показателям качества обслуживания, которое воспринимается конечными пользователями – R-фактора и мультимедийного качества. Разработаны модели и методы иерархическо-координационной маршрутизации и быстрой перемаршрутизации в мультидоменных телекоммуникационных сетях с обеспечением качества обслуживания по множеству показателей. Проведена оценка эффективности предложенных в диссертации моделей и методов отказоустойчивой маршрутизации с защитой уровня качества обслуживания в телекоммуникационных сетях. Разработана система научно-методических рекомендаций по практическому использованию полученных результатов.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, модель, метод, отказоустойчивость, маршрутизация, быстрая перемаршрутизация, поток, пропускная способность, межконцевая задержка, вероятность потерь, R-фактор, мультимедийное качество, качество обслуживания, качество восприятия услуг.

Підп. до друку 26.11.20. Формат 60×84 1/16. Спосіб друку – ризографія.
Умов.-друк. арк. 2,8. Тираж 100 прим.
Зам. № 2-812. Ціна договірна.

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

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