

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ЄРЕМЕНКО Олександра Сергіївна

УДК 621.391

**МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ
ВІДМОВСТІЙКОСТІ ТА МЕРЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ НА
ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІЧНИХ ТЕНЗОРНИХ
МОДЕЛЕЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків – 2018

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,
в.о. завідувача кафедри інфокомунікаційної інженерії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КЛИМАШ Михайло Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри телекомунікацій

доктор технічних наук, професор
ОКСЮК Олександр Глібович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка,
завідувач кафедри кібербезпеки та захисту інформації

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

Захист відбудеться « 3 » жовтня 2018 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14

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

Автореферат розісланий « 31 » серпня 2018 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

М.О. Євдокименко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Стрімкий розвиток і постійне вдосконалення телекомунікаційних систем в напрямку впровадження технологій мереж майбутнього (Future Networks, FN) є ключовим пріоритетом у забезпеченні конкурентоздатності національної економіки та обороноздатності України в цілому. Слід зазначити, що крім вимог до якості обслуговування (Quality of Service, QoS), які вже стали класичними функціями сучасних телекомунікаційних мереж (ТКМ), на перший план виходить функціонал щодо забезпечення високого рівня відмовостійкості та мережної безпеки, що особливо важливо при функціонуванні ТКМ в умовах постійних деструктивних впливів, які призводять до суттєвої зміни як структурних, так і функціональних параметрів і властивостей телекомунікаційної мережі.

Як показав проведений аналіз, ключовим технологічним інструментарієм забезпечення якості обслуговування, відмовостійкості та мережної безпеки є протокольні засоби маршрутизації та управління трафіком у цілому в ТКМ, до рівня ефективності функціонування яких з кожним роком висуваються все більш жорсткі вимоги, особливо що стосується обчислювальної складності та масштабованості отримуваних мережних рішень.

Актуальність теми. В області управління трафіком у ТКМ наука і практика постійно накопичує, поповнює та оновлює теоретичні й технологічні рішення, які стосуються різноманітних мережних платформ, широкого спектра надаваних послуг зв'язку та вимог користувачів щодо якості обслуговування, в т.ч. відмовостійкості, безпеки та масштабованості. До найбільш перспективних рішень у цій області слід віднести програмно-конфігуровані мережі (Software-Defined Networking, SDN), інжиніринг трафіка (Traffic Engineering, TE), маршрутизацію з підтримкою якості обслуговування (QoS-based Routing), відмовостійку (Fault-Tolerant Routing) та безпечну маршрутизацію (Secure Routing) тощо.

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

Проте, до перспективних мережних рішень все ще висувається ряд важливих концептуальних вимог, які подекуди носять суперечливий характер:

– підтримка якості обслуговування водночас за множиною різнорідних QoS-показників особливо в умовах високої динаміки зміни стану мережі, ви-

кликаної нестационарним режимом роботи інтерфейсів маршрутизаторів, що найбільш актуально для мережних процесів реального масштабу часу;

- комплексне врахування вимог щодо відмовостійкості мережі з підтримкою існуючих і новітніх схем перемаршрутизації та захисту елементів мережі, їх пропускної здатності та рівня QoS в цілому як на рівні доступу (Fault-Tolerant Routing), так і на рівні ядра мережі (Fast ReRouting);

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

- оптимізація використання доступного мережного ресурсу, підвищення масштабованості отриманих мережних рішень, заснованого в т.ч. на реалізації ієрархічних стратегій маршрутизації та управління трафіком у ТКМ в цілому.

Виконання цих вимог пов'язано з необхідністю вдосконалення існуючих та розробкою нових моделей і методів, які б слугували подальшою теоретичною основою перспективних протоколів маршрутизації та управління трафіком у ТКМ. Отже, актуальності набуває **науково-прикладна проблема**, яка полягає в розвитку теорії управління трафіком з підтримкою якості обслуговування за множиною показників в умовах нестационарного режиму роботи телекомунікаційної мережі із забезпеченням її відмовостійкості та мережної безпеки.

Як показав проведений аналіз, для забезпечення якості обслуговування за множиною швидкісних, часових QoS-показників і показників надійності при розв'язанні задач управління трафіком добре себе зарекомендував математичний апарат тензорного обчислення та аналізу, який розширено та доповнено Г. Кроном на випадок дослідження мережних архітектур. Проте відомі тензорні рішення обмежувались аналізом стаціонарного стану інтерфейсів маршрутизаторів і ТКМ в цілому. За певних умов, пов'язаних із рівнем завантаженості мережі, зміною характеристик трафіка та QoS-вимог, може наставати нестационарний режим, в якому динаміка стану мережі в загальному випадку описується нелінійними диференціальними рівняннями. Це вимагає переходу до динамічних тензорних моделей, заснованих на тензорному узагальненні рішень диференціальних рівнянь стану мережі, коли основні параметри моделі і тензорні метрики введених геометричних просторів стають функціями часу. Тому використання динамічних тензорних моделей повинно сприяти більш точній оцінці основних показників QoS в кожен аналізований момент часу, що позитивно позначиться на ефективності використання мережного ресурсу.

Крім того, при відмовостійкій маршрутизації в ТКМ важливо забезпечити необхідний рівень якості обслуговування за множиною показників не тільки вздовж основних шляхів, але й вздовж резервних маршрутів, які розраховуються одночасно з основними та використовуються у випадку реалізації основних

схем локального та глобального захисту елементів ТКМ. У зв'язку з цим тема даної дисертаційної роботи, яка присвячена розробці методів управління трафіком з підтримкою якості обслуговування та забезпеченням відмовостійкості та мережної безпеки на основі використання динамічних тензорних моделей телекомунікаційних систем і мереж є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», «Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки» та рекомендацій щодо «Реформ галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвитку інформаційного простору України». Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання науково-дослідних робіт: № 299-1 «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР №0115U002432), № 308 «НИТКА-3» (ДР №0116U000066 т), в яких здобувач виступав виконавцем. Отримано патент на корисну модель.

Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні відмовостійкості та безпеки із забезпеченням заданого рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах шляхом розробки та вдосконалення відповідних моделей і методів маршрутизації та управління трафіком.

У дисертаційній роботі для вирішення поставленої науково-прикладної проблеми розв'язувались такі **задачі дослідження**:

- аналіз сучасного стану та тенденцій подальшого розвитку засобів забезпечення відмовостійкості та мережної безпеки в процесі управління трафіком з підтримкою якості обслуговування в мультисервісних ТКМ;
- аналіз теоретичних результатів в області забезпечення відмовостійкості та мережної безпеки в процесі управління трафіком з підтримкою якості обслуговування в мультисервісних телекомунікаційних мережах;
- розробка та дослідження системи динамічних тензорних моделей маршрутизації та управління трафіком і формулювання умов забезпечення QoS;
- розробка та дослідження моделей і методів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах;
- розробка методів безпечної маршрутизації та безпечної швидкої перемаршрутизації щодо забезпечення заданого рівня мережної безпеки в ТКМ;
- оцінка ефективності та розробка науково-методичних рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації рішень.

Об'єкт дослідження: процеси управління трафіком із підтримкою якості обслуговування та забезпеченням відмовостійкості та мережної безпеки в ТКМ.

Предмет дослідження: моделі та методи управління трафіком із підтримкою QoS та забезпеченням відмовостійкості та мережної безпеки в ТКМ.

Методи дослідження. В ході розробки та вдосконалення математичних моделей і методів управління трафіком із забезпеченням якості обслуговування в умовах нестаціонарного режиму роботи ТКМ було використано функціонал тензорного обчислення та аналізу, теорії диференціальних рівнянь. Під час опису структури ТКМ використовувались теорія множин і теорія графів. В ході розробки ієрархічно-координаційних методів QoS-маршрутизації та швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження використано постулати та принципи теорії ієрархічних багаторівневих систем. Для розв'язання оптимізаційних задач відмовостійкої, безпечної та QoS-маршрутизації використано методи математичного програмування. Для оцінки ефективності отриманих мережних рішень використано можливості пакетів MATLAB та Simulink.

Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

В ході вирішення поставленої наукової проблеми та розв'язання сформульованих задач дослідження були отримані такі нові наукові результати:

1. Вдосконалено систему тензорних моделей QoS-маршрутизації та управління трафіком, представлених у системах координат контурів і вузлових пар, а також міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Новизна моделей полягає у введенні динамічних тензорних метрик, які отримані на підставі використання стаціонарної точкової апроксимації нестаціонарного потоку під час опису стану мережі системою нелінійних диференціальних рівнянь. Це дозволило врахувати зміну в часі структурних і функціональних параметрів телекомунікаційної мережі та характеристик потоків пакетів у ході тензорного моделювання процесів маршрутизації й управління трафіком та отримати динамічні умови забезпечення якості обслуговування за показниками швидкості передачі та середньої міжкінцевої затримки пакетів у нестаціонарному режимі роботи мережних інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ.

2. Набув подальшого розвитку дворівневий метод внутрішньодоменної ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації на основі резервування ресурсів. Новизна методу полягає, по-перше, в забезпеченні узгодженого розв'язання задач розподіленої маршрутизації «від джерела» та резервування каналного ресурсу на основі використання принципу цільової координації, по-друге, у підтримці міжкінцевої якості обслуговування за показниками швидкості передачі та середньої міжкінцевої затримки пакетів завдяки використанню тензорної моделі ТКМ. Застосування методу дозволяє підвищити масштабованість рішень маршрутизації на основі резервування ресурсів із забезпеченням вимог щодо якості обслуговування за множиною QoS-показників.

3. Вперше запропоновано динамічну модель багатошляхової маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником імовірності своєчасної доставки пакетів у телекомунікаційній мережі. Новизною представленого рішення є те, що розрахунок множини шуканих маршрутів і розподіл каналного ресурсу мережі відбувається на основі врахування нестационарного характеру роботи інтерфейсів маршрутизаторів. Це дозволило залежно від виду використаного критерію оптимальності рішень максимізувати ймовірність своєчасної доставки пакетів або забезпечити виконання вимог щодо її необхідного значення з урахуванням нестационарної динаміки зміни стану мережі протягом деякого часу, наприклад, таймера оновлення маршрутних таблиць.

4. Набула подальшого розвитку система поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів телекомунікаційної мережі за шляхами, що не перетинаються або перетинаються лише за вузлами. Новизною рішень є введення в структуру моделей нелінійних умов використання шляхів заданого типу при балансуванні навантаження. Це дозволило підвищити показники QoS при розв'язанні задач безпечної або відмовостійкої маршрутизації.

5. Набула подальшого розвитку потокова модель швидкої перемаршрутизації. Новизна моделі полягає, по-перше, в лінійній формі умов захисту каналу та вузла при реалізації багатошляхової маршрутизації; по-друге, у введенні системи критеріїв оптимальності рішень щодо відмовостійкої маршрутизації з встановленням ієрархії співвідношень вагових коефіцієнтів у відповідних цільових функціях. Це дозволило підвищити продуктивність телекомунікаційної мережі та масштабованість рішень щодо швидкої перемаршрутизації, а також знизити обчислювальну складність їх протокольної реалізації.

6. Вперше запропоновано дворівневий метод швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих мережах. Новизна методу полягає у введенні відповідно до принципу прогнозування взаємодій дворівневої ієрархії розрахунків маршрутних змінних, що відповідають за формування основних і резервних шляхів з реалізацією схем захисту каналу, вузла, шляху та їх пропускної здатності, а також у забезпеченні збалансованої завантаженості каналів зв'язку мережі потоками, що протікають як за основними, так і за резервними маршрутами, що відповідає вимогам концепції TE.

7. Вперше запропоновано лінійну оптимізаційну модель багатошляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційній мережі з захистом каналу, вузла та пропускної здатності. Новизною запропонованої моделі є те, що узгоджене рішення завдань щодо балансування навантаження і швидкої перемаршрутизації із захистом каналу, вузла та пропускної здатності забезпечується в ході розв'язання задачі лінійного програмування. Це дозволило знизити обчислювальну складність розрахунку маршрутних змінних,

відповідальних за формування основного та резервного шляхів, і забезпечити збалансовану завантаженість каналів зв'язку відповідно до вимог концепції TE.

8. Вдосконалено метод ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації, заснований на декомпозиційному представленні потокової моделі маршрутизації та використанні принципу цільової координації. Новизною методу є забезпечення захисту приграничних маршрутизаторів ядра мережі на підставі розрахунку основних і резервних міждоменних шляхів як при реалізації одношляхової, так і для багатошляхової маршрутизації, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

9. Вперше запропоновано систему поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації з захистом шлюзу за замовчуванням. Новизною моделей є, по-перше, реалізація функцій відмовостійкості шляхом введення додаткових керуючих змінних, відповідальних за вибір основного та резервного шлюзів за замовчуванням з балансуванням навантаження між ними, по-друге, забезпечення погодженого розв'язання задач щодо захисту шлюзу за замовчуванням і швидкої перемаршрутизації в транспортній мережі, що дозволило підвищити рівень відмовостійкості телекомунікаційної мережі засобами маршрутизації.

10. Вперше запропоновано математичну модель відмовостійкої QoS-маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі, новизною якої є те, що за її допомогою забезпечується реалізація схеми захисту рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів. Отримати подібне рішення вдалось на підставі тензорного опису процесу відмовостійкої маршрутизації, що дозволило отримати в аналітичному вигляді шукані умови захисту, а також сформулювати та розв'язати оптимізаційну задачу щодо розрахунку основних та резервних маршрутів, вздовж яких забезпечувався заданий рівень якості обслуговування.

11. Вперше запропоновано методи безпечної маршрутизації повідомлень за шляхами, які перетинаються, що належать до класу проактивних і реактивних рішень щодо забезпечення заданого рівня мережної безпеки. Новизна методу безпечної маршрутизації полягає в тому, що він, по-перше, допускає використання особливого класу шляхів, що перетинаються, які складають основу композитних шляхів і містять мережні фрагменти з послідовним та (або) паралельним з'єднанням каналів зв'язку мережі, а по-друге, заснований на оптимізації процесу вибору множини композитних шляхів і балансування за ними частин повідомлення, що передається, із забезпеченням допустимих значень його ймовірності компрометації. Новизна методу безпечної швидкої перемаршрутизації полягає в тому, що в разі порушення вимог мережної безпеки, викликаного підвищенням ймовірності компрометації одного або множини композитних шляхів, що входять в основний мультишлях, багатошляхова передача частин

конфіденційного повідомлення із забезпеченням заданих значень ймовірності його компрометації здійснюватиметься вже за заздалегідь розрахованою множиною резервних композитних шляхів, реалізуючи захист або основного мультишляху в цілому, або одного чи декількох заздалегідь заданих композитних шляхів, що входять в цей основний мультишлях.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечувалась 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 отриманих результатів дослідження. Крім того, адекватність отриманих результатів підтверджувалась допустимою збіжністю результатів аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання.

Практична значимість дисертаційної роботи. Практична цінність отриманих у дисертації результатів полягає в тому, що запропоновані моделі та методи мають стати основою математичного та алгоритмічно-програмного забезпечення перспективних протоколів маршрутизації та управління трафіком з метою підвищення рівня якості обслуговування, відмовостійкості, мережної безпеки та масштабованості телекомунікаційних мереж у цілому.

Отримані в дисертаційній роботі результати були використані у навчальному процесі кафедри інфокомунікаційної інженерії ХНУРЕ у лекційному курсі та практичних заняттях з дисципліни «Управління та маршрутизація в ТКС» при підготовці студентів спеціальності «Телекомунікації», що підтверджено наявністю методичних праць. Результати дисертаційної роботи також використані в звітах про науково-дослідні роботи: № 299-1 «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР №0115U002432), № 308 «НИТКА – 3» (ДР №0116U000066 Т), в яких здобувач виступав виконавцем.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати, висвітлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [2] здобувачу належить розробка схеми оцінювання ефективності впровадження нових криптографічних алгоритмів перетворення інформації в телекомунікаційних пристроях з урахуванням показників якості обслуговування; в статті [5] здобувачу належить обґрунтування вибору показників ступеня критичності загроз передачі інформації у відкритій мережі та пропозиції щодо послідовності фаз протоколу обміну інформацією; в статті [6] здобувачем проведено порівняльний аналіз моделей продуктивності класичної та адаптивної TCP/HTTP поточної передачі відео; в роботі [7] здобувач дослідила особливості використання

динамічних математичних моделей для опису процесу синтезу однорангових віртуальних приватних мереж; в публікації [8] автором проведено аналіз принципів застосування мультипотоккових моделей одноадресної, багатоадресної та ширококомовної відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах; у статті [9] здобувачем проведено аналіз переваг використання методів змішаного цілочисельного лінійного програмування при оптимальному розподілі ресурсів LTE мережі; в роботі [10] здобувачем проведено аналіз відомих рішень щодо підвищення продуктивності та забезпечення якості обслуговування в безпроводових mesh-мережах; у публікації [11] здобувач дослідила особливості використання динамічних математичних моделей для опису процесу структурно-функціонального синтезу телекомунікаційних систем; у статті [12] автором запропоновано удосконалення моделі безпечної маршрутизації з оптимальним балансуванням числа фрагментів повідомлення в мобільних мережах, що самоорганізуються; в роботі [13] здобувачем запропоновано алгоритм безпечної багатошляхової маршрутизації з оптимальним балансуванням фрагментів повідомлення в MANET; у публікації [15] автором запропоновано потокову модель багатошляхової маршрутизації в телекомунікаційній мережі за шляхами, що перетинаються за вузлами; в статті [16] здобувачем виконано вибір та опис математичної моделі для дослідження впливу стану інтерфейсу на динаміку завантаженості черги на маршрутизаторі ТКМ в ході аналітичного розрахунку середньої довжини черги на інтерфейсі маршрутизатора; у роботі [18] автором проведено аналіз задачі підвищення масштабованості та продуктивності рішень щодо відмовостійкої маршрутизації; в публікації [19] здобувачем запропоновано динамічне представлення тензорної моделі багатошляхової QoS-маршрутизації в нестационарному режимі роботи мережних інтерфейсів; у роботі [21] здобувачем вдосконалено ієрархічний метод міждоменної швидкої перемаршрутизації в комунікаційних мережах, який включає в себе умови для захисту приграничних маршрутизаторів, адаптованих як для одношляхової, так і для багатошляхової маршрутизації; в публікації [22] здобувачем запропоновано рішення щодо захисту шлюзу за замовчуванням при відмовостійкій маршрутизації в IP-мережі; в статті [23] автором запропоновано удосконалення потокової моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією масштабованих схем захисту елементів телекомунікаційної мережі; в статті [24] автором удосконалено потокову модель відмовостійкої маршрутизації із забезпеченням захисту шляху на підставі використання білінійного критерію оптимальності маршрутних рішень; в роботі [25] здобувачем розроблено та досліджено методи безпечної маршрутизації та безпечної швидкої перемаршрутизації щодо забезпечення заданого рівня мережної безпеки в ТКМ; в публікації [26] автором запропоновано дворівневий метод швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в

програмно-конфігурованих мережах; у статті [27] автором розроблено лінійну оптимізаційну модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах; у роботі [30] здобувачем проведено огляд існуючих пакетів імітаційного моделювання телекомунікаційних мереж та розроблено за допомогою пакета Simulink імітаційну модель динамічного аналізу середньої міжкінцевої затримки пакетів в умовах нестационарного режиму роботи мережних інтерфейсів.

Апробація. Основні результати дисертації доповідалися та були схвалені на 60 Міжнародних наукових конференціях, форумах і семінарах, в тому числі: на 3-му та 4-му Міжнародних радіоелектронних форумах «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (МРФ-2008, МРФ-2011) (Харків, ХНУРЕ, 2008, 2011); на XIX Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті» (Харків, ХНУРЕ, 2015); на XXIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, НТУ «ХПІ», 2015); на одинадцятій та дванадцятій наукових конференціях Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС ім. І. Кожедуба, 2015, 2016); на Міжнародній IEEE конференції «International Siberian Conference on Control and Communications» (SIBCON-2015) (Омськ, РФ, 2015); на IX-XII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015, ПТ-2016, ПТ-2017, ПТ-2018 (Київ, НТУУ «КПІ», 2015-2018); на науково-технічних конференціях Інформатика, математика, автоматика ІМА::2015, ІМА::2016, ІМА::2017 (Суми, СумДУ, 2015- 2017); на четвертій Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (Київ, ДУТ, 2015); на п'ятій міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (Полтава, ПНТУ, 2015); на XIII Міжнародній науковій конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Шевченківська весна 2015: Радіофізика. Електроніка. Комп'ютерні системи» (Київ, КНУ імені Тараса Шевченка, 2015); на першій, другій та третій Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку» (EMC-2015, EMC 2016, EMC-2017) (Харків, ХНУРЕ, 2015-2017); на науково-технічній конференції «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем» (Київ, НАУ, 2015); на II-IV Міжнародних науково-технічних IEEE конференціях «Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)» (Харків, ХНУРЕ, 2015-2017); на першій Міжнародній конференції Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT-2015) (Львів, НУ ЛПІ, 2015); на науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні техно-

логії» (Київ, ДУТ, 2015); на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, НАУ, 2015); на XIII та XIV Міжнародних IEEE конференціях «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)» (Львів, Славське, НУ ЛП, 2016, 2018); на першій та другій Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми науково-технічного та правового забезпечення кібербезпеки у сучасному світі» (Харків, НТУ «ХП», 2016, 2017); на Міжнародній IEEE конференції «Electronics and Information Technology (EIT)» (Одеса, ОНПУ, 2016); на Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (ITCM-2016, ITCM-2017) (Івано-Франківськ, ПНУ імені Василя Стефаника, 2016, 2017); на Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології» (Кропивницький, ЦНТУ, 2016, 2017); на Міжнародній науково-практичній конференції «Структурні зміни у суспільстві та економіці під впливом комунікацій та інформації» (Полтава, ПУЕТ, 2016); на Міжнародній IEEE конференції «Smart Systems and Technologies (SST)» (Осієк, Осієцький університет, Хорватія, 2016); на I, II Міжнародних IEEE конференціях «Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)» (Київ, НТУУ «КП», 2016, 2017); на XI, XII Міжнародних IEEE конференціях «Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)» (Львів, НУ ЛП, 2016, 2017); на шістнадцятій Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики та моделювання» (Харків, НТУ «ХП», 2016); на V-й міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Чернівці, ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2016); на Міжнародній IEEE конференції «The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM)» (Поляна-Свалява, НУ ЛП, 2017); на VI Міжнародній науковій-технічній конференції «Захист інформації і безпека інформаційних систем» (Львів, НУ ЛП, 2017); на першій Всеукраїнській IEEE конференції «Electrical and Computer Engineering (UKRCON)» (Київ, НТУУ «КП», 2017); на другій Міжнародній IEEE конференції «Advanced Information and Communication Technologies (AICT)» (Львів, НУ ЛП, 2017); на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях» (Чернівці, ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2017); на I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (PCSITS) (Київ, КНУ імені Тараса Шевченка, 2018).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковано у 91 роботі, в тому числі 30 статей, серед яких 24 статті у наукових фахових виданнях України [1-7, 9-20, 24, 27-30] та 6 статей у закордонних журналах

[8, 21-23, 25, 26]. Шість статей індексуються наукометричною базою Scopus [20-23, 25, 26], вісім статей виконано без співавторства [1, 3, 4, 14, 17, 20, 28, 29]. Отримані результати апробовано на 60 Міжнародних наукових конференціях та форумах, з яких 23 на конференціях, що проходили під егідою IEEE та індексуються базою Scopus [31-53]. Отримано один патент на корисну модель [54].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів та чотирьох додатків. У роботі 123 рисунки та 41 таблиця. Загальний обсяг роботи становить 487 сторінок, у тому числі 334 сторінки основного тексту, 33 сторінки з рисунками та таблицями, анотації на 25 сторінках, додатки на 38 сторінках. Список використаних джерел містить 374 найменувань, викладених на 45 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** проведено аналіз стану проблеми щодо забезпечення якості обслуговування, відмовостійкості та мережної безпеки в ТКМ під час розв'язання задач управління трафіком; обґрунтовано актуальність теми дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами та темами, зазначено мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення результатів роботи.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу встановлено, що ефективним інструментарієм забезпечення якості обслуговування, відмовостійкості та мережної безпеки в ТКМ є технологічні засоби управління трафіком, які, насамперед, представлені протоколами маршрутизації, механізмами пріоритетного розподілу та резервування мережного ресурсу. Проте існуючі та реалізовані в сучасних ТКМ технології управління трафіком та маршрутизації не завжди відповідають таким важливим вимогам, як забезпечення гарантованої QoS за множиною показників, врахування стану мережних інтерфейсів та характеристик трафіка, реалізація схем локального та глобального захисту тощо.

З'ясовано, що переважна більшість існуючих теоретичних мережних рішень забезпечення QoS, відмовостійкості та мережної безпеки, хоча і належать до засобів управління трафіком реального масштабу часу, але все ж базуються на використанні математичних моделей і методів, які оперують зі характеристиками трафіка та параметрами ТКМ, адекватними для стаціонарного режиму мережних інтерфейсів. Це негативно позначається на точності оцінки структурно-функціональних параметрів ТКМ, а зрештою призводить до неефективного використання мережного ресурсу.

При управлінні трафіком у ТКМ та наданні інфокомунікаційних послуг все частіше необхідно не тільки виконати вимоги щодо значень множини показників міжкінцевої якості обслуговування, але й водночас забезпечити комплексне

врахування вимог щодо відмовостійкості та мережної безпеки. Тобто в перспективних методах і протоколах управління трафіком у ТКМ необхідно забезпечити оперативну реакцію на можливі відмови в обслуговуванні. При цьому вдосконалення існуючих протоколів безпосередньо пов'язано з необхідністю розробки нових математичних моделей і методів, які б в подальшому слугували теоретичною основою алгоритмічно-програмного забезпечення перспективних протоколів маршрутизації та технологічних засобів управління трафіком у ТКМ.

У **другому розділі** в рамках пропонованих рішень структура ТКМ описувалась одновимірною мережею $S = (U, V)$, де $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ – множина вузлів мережі, що моделюють маршрутизатори, m – загальна кількість вузлів у мережі S ; а $V = \{v_z = (i, j); z = \overline{1, n}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина гілок мережі, при цьому гілка $v_z = (i, j) \in V$ моделює z -й канал зв'язку (КЗ), що з'єднує i -й та j -й маршрутизатори. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність використання стаціонарної точкової апроксимації нестационарного потоку (PSFFA), в рамках якої динаміка стану мережі описується системою нелінійних диференціальних рівнянь стану її мережних інтерфейсів. Наприклад, під час моделювання роботи j -го мережного інтерфейсу на i -му маршрутизаторі за допомогою СМО $M(t)/M(t)/1$, нелінійне диференціальне рівняння, яке описує динаміку середньої затримки пакетів на даному інтерфейсі, прийме таку форму:

$$\frac{d\tau_{i,j}(t)}{dt} = 1 - \varphi_{i,j} \left(\frac{\tau_{i,j}(t)}{\lambda_{i,j}\tau_{i,j}(t) + 1} \right), \quad (i, j) \in V, \quad (1)$$

де $\lambda_{i,j}$ – середня інтенсивність потоку (1/с), що надходить у чергу на інтерфейсі (i, j) ; $\varphi_{i,j}$ – пропускна здатність цього інтерфейсу (1/с).

Відповідно до методології тензорного моделювання структура ТКМ визначає анізотропний простір, розмірність якого дорівнює числу гілок (n) у мережі. У розділі запропоновано динамічні тензорні моделі багатошляхової QoS-маршрутизації та управління трафіком, представлені у системах координат контурів і вузлових пар, з урахуванням нестационарного режиму роботи мережних інтерфейсів. Новизна моделей полягає у введенні на основі рішення системи диференціальних рівнянь (1) динамічних тензорних метрик

$$g_v^{ii}(t) = \lambda_v^i (\varphi_i - \lambda_i) \times \\ \times [(\varphi_i \cdot W(0, -(\lambda_i \cdot \exp(-(\lambda_i + (t - (\lambda_i + \varphi_i \cdot \ln(\exp(-\lambda_i \cdot (\tau_0 \lambda_i - \tau_0 \varphi_i + 1)) / \varphi_i) \times \\ \times (\tau_0 \lambda_i - \tau_0 \varphi_i + 1))) / (\varphi_i - \lambda_i)^2) \cdot (\varphi_i - \lambda_i)^2 / \varphi_i)) / \varphi_i) / \lambda_i + 1]^{-1}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (2)$$

де $W(\cdot)$ – W -функція Ламберта; $\exp(\cdot)$ – експоненціальна функція; τ_0 – середня затримка пакетів на інтерфейсі маршрутизатора в початковий момент часу.

Значення (2) є координатами проекції метричного тензора в системі координат (СК) гілок мережі $G_v(t)$, представленій діагональною $n \times n$ матрицею.

Тоді шукані умови забезпечення якості обслуговування за середньою міжкінцевою затримкою τ_{req} та швидкістю передачі пакетів λ_{req} для кожного з потоків стають функцією часу та матимуть такий вигляд:

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

де $G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle}(t), G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle}(t), G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle}(t), G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}(t)$ – це блоки матриці $G_{\pi\eta}(t)$, що є проекцією метричного тензора, але вже в системі координат контурів і вузлових пар, та знаходиться через двічі коваріантне перетворення $G_v(t)$.

При тензорному розгляді ТКМ у системі координат міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар умови забезпечення QoS матимуть вигляд

$$\Lambda_\gamma(t) \leq \left(G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle}(t) - G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle}(t) \left[G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle}(t) \right]^{-1} G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle}(t) \right) T_\gamma(t), \quad (4)$$

де $G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle}(t), G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle}(t), G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle}(t), G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle}(t)$ – це блоки матриці $G_{\gamma\varepsilon}(t)$, яка є проекцією метричного тензора; $\Lambda_\gamma(t)$ та $T_\gamma(t)$ – проекції тензорів середніх затримок та інтенсивностей потоків в СК міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Координати цих векторів пов'язані з QoS-вимогами таким чином

$$\sum_{i=1}^{\kappa} \lambda_\gamma^i = \lambda_{req}; \quad \tau_i^\gamma \leq \tau_{req} \quad \text{при } i = \overline{1, \kappa}, \quad (5)$$

де κ – число базисних шляхів між заданою парою вузлів відправник-отримувач.

Завдяки використанню динамічних тензорних метрик (2) у даному випадку параметри умов (3) та (4) дозволяють контролювати рівень QoS не тільки в стаціонарному режимі роботи мережних інтерфейсів, але й у кожен конкретний момент часу протягом таймера оновлення маршрутних таблиць, що особливо важливо для нестационарного режиму роботи мережі. Умови (3) та (4) спільно з умовами збереження потоку та запобігання перевантаження каналів зв'язку виступали як обмеження під час розв'язання оптимізаційних задач QoS-маршрутизації або управління трафіком у ході визначення як λ , так і φ .

На рис. 1 показано порядок управління трафіком у ТКМ, наприклад, за умов (4), коли між першим і п'ятим маршрутизаторами передавались пакети двох потоків різних класів: потоки мали однакові інтенсивності 470 1/с, але різні вимоги щодо середньої міжкінцевої затримки пакетів – 150 мс для потоку першого класу і 400 мс для потоку другого класу. При цьому в розривах каналів зв'язку вказано (зверху вниз) пакетна швидкість (1/с) / пропускна здатність ка-

налу зв'язку, яка виділена для потоку заданого класу ($1/c$) / середня затримка пакетів потоку відповідного класу (мс).

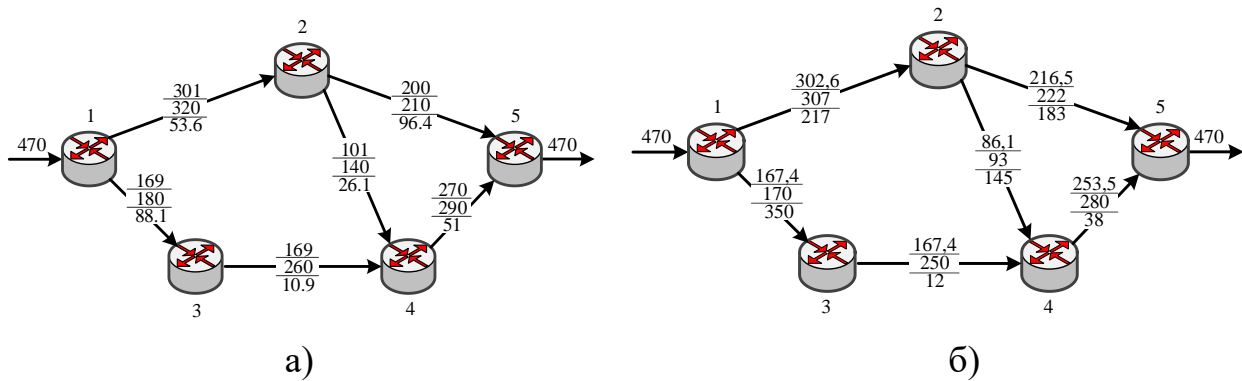


Рис. 1. Порядок QoS-маршрутизації та розподілу пропускної здатності каналів зв'язку мережі для потоку першого (а) та другого (б)

Характерною рисою використання тензорної моделі, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, є те, що використання умов (4) дозволяє контролювати середні затримки вздовж усіх використаних шляхів протягом усього періоду оновлення маршрутних таблиць (рис. 2), що не завжди вдавалось під час використання умов (3) тензорної моделі, представленої в базисі контурів і вузлових пар. Дослідження запропонованих динамічних тензорних моделей показало, що тривалість нестационарного режиму роботи інтерфейсу, що характеризується зміною в часі середньої міжкінцевої затримки пакетів і наближенням до свого стаціонарного значення, залежно від завантаженості каналів зв'язку може бути порівняна з таймером перерахунку маршрутних таблиць (рис. 2, а), а в деяких випадках і перевищувати його (рис. 2, б).

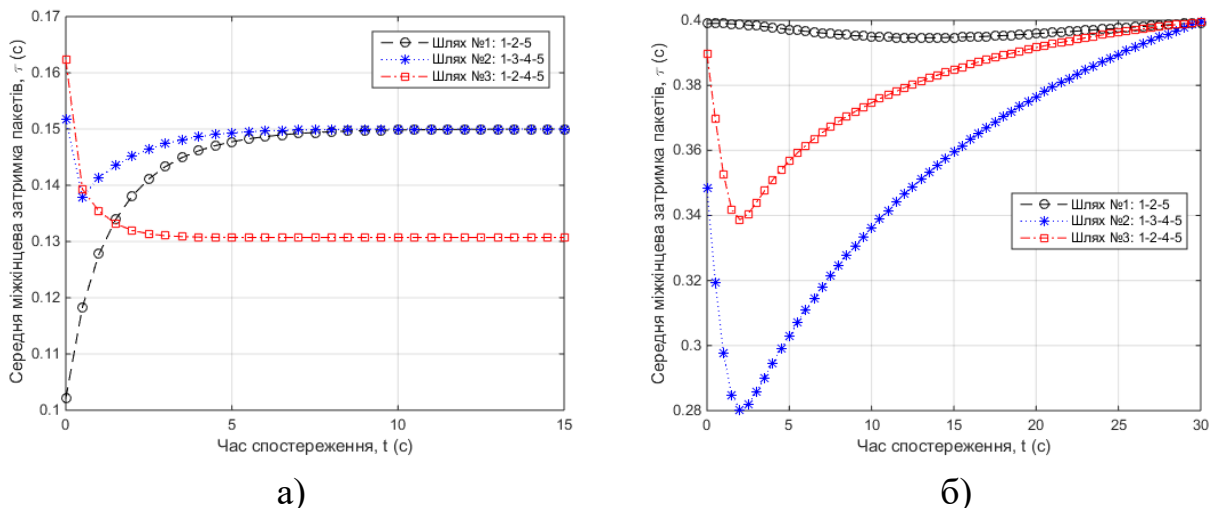


Рис. 2. Динаміка зміни середньої затримки пакетів потоку першого (а) та другого (б) класу вздовж використаних шляхів

Крім того, встановлено, що врахування динаміки зміни стану інтерфейсів, дозволяє більш точно оцінити (від 7-10% до 12-18%) міжкінцеву середню за-

тримку пакетів і, як результат, сприяє більш ефективному використанню буферного та каналного ресурсу ТКМ, орієнтуючись на значення QoS-показників, характерних не тільки для стаціонарного режиму роботи інтерфейсів, але й для нестаціонарного (перехідного) режиму. Це актуально з причини того, що реальні значення QoS-показників не завжди відповідали оцінкам, які отримані для стаціонарного режиму роботи мережних інтерфейсів і ТКМ у цілому. Тому використання умов забезпечення якості обслуговування (3) та (4) з динамічними тензорними метриками (2) особливо ефективно в умовах високої завантаженості мережних інтерфейсів та мережі (від 0,63 і вище), жорстких QoS-вимог та високої динаміки оновлення маршрутних таблиць.

Для перевірки адекватності запропонованих динамічних тензорних моделей QoS-маршрутизації та управління трафіком за допомогою пакета Simulink, інтегрованого в середовище MATLAB, розроблено відповідну імітаційну модель функціонування інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ. Результати імітаційного моделювання в цілому підтвердили адекватність отриманих результатів. Розбіжність результатів аналітичного та імітаційного моделювання в рамках розглянутих розрахункових прикладів не перевищувала 1,3%. Із зростанням розмірів мережі та, відповідно, довжин використаних шляхів (до 15-20 маршрутизаторів) досліджувана розбіжність не перевищувала 5-7%.

Також у другому розділі отримав подальший розвиток дворівневий метод внутрішньодоменої ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації на основі резервування ресурсів. Метод базується на декомпозиційній математичній моделі ТКМ, в якій всю множину вузлів можна розбити на дві підмножини: U^+ – підмножина приграничних маршрутизаторів, де m^+ їх кількість в мережі; U^- – підмножина транзитних маршрутизаторів, кількість яких в мережі m^- . Множина потоків K , що надходять до мережі, залежно від того, на який приграничний маршрутизатор надходить цей потік, розбивається на підмножини $\{K_r, r = \overline{1, m^+}\}$, де K_r – множина потоків, які надходять на r -й приграничний маршрутизатор і обслуговуватимуться відповідно до індивідуального стилю резервування. У подальшому під k_r -м потоком розумітиметься k -й потік, маршрут для якого визначається на u_r -му приграничному маршрутизаторі мережі.

Тоді кожному k_r -му потоку можна зіставити ряд параметрів: $u_s^k \in U^+$ – приграничний маршрутизатор, через який k -й потік надходить до мережі; $u_d^k \in U^+$ – приграничний маршрутизатор, через який k -й потік вибуває з мережі; $\lambda_{req}^{k_r}$ – інтенсивність k_r -го потоку, що надходить у мережу з u_r -го приг-

раничного маршрутизатора, а також обслуговується відповідно до фіксованого фільтра індивідуального резервування. Для кожного u_r -го приграничного маршрутизатора як шукані виступають маршрутні змінні $x_{i,j}^{k_r}$, які характеризують інтенсивність k_r -го потоку в каналі зв'язку $(i, j) \in V$. На цьому ж u_r -му приграничному маршрутизаторі підлягають розрахунку керуючі змінні $y_{i,j}^{k_r}$, що відповідають за розподіл каналного ресурсу і характеризують частки пропускної здатності $\Phi_{i,j}$ каналу зв'язку $(i, j) \in V$, зарезервованої для k_r потоків.

На керуючі змінні накладаються обмеження виду

$$0 \leq x_{i,j}^{k_r} \leq 1; \quad (6) \quad 0 \leq y_{i,j}^{k_r} \leq 1. \quad (7)$$

З метою недопущення втрат пакетів на маршрутизаторах і в мережі в цілому в ході розрахунку маршрутних змінних необхідно забезпечити виконання системи умов збереження потоку:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k_r} = 1, k_r \in K_r, u_i = u_s^k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k_r} = 0, k_r \in K_r, u_i \neq u_s^k, u_d^k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k_r} = -1, k_r \in K_r, u_i = u_d^k. \end{cases} \quad (8)$$

Для забезпечення керованості процесом боротьби з перевантаженням в ході маршрутизації потоків з урахуванням індивідуального стилю резервування в модель вводяться такі умови:

$$\lambda_{req}^{k_r} x_{i,j}^{k_r} \leq y_{i,j}^{k_r} \Phi_{i,j}, \text{ якщо } k_r \in K_r, (i, j) \in V. \quad (9)$$

В рамках умов (9) враховується децентралізація під час розрахунку маршрутних змінних на кожному окремо взятому приграничному маршрутизаторі, а також можливість резервування ресурсів мережі. Крім того, для забезпечення резервування лише доступного каналного ресурсу важливо виконати умову:

$$\sum_{u_r \in U^+} \sum_{k_r \in K_r} y_{i,j}^{k_r} \leq 1. \quad (10)$$

З метою забезпечення міжкінцевої QoS за множиною показників в модель вводяться додаткові умови, за аналогією з (3), для кожного з потоків:

$$\lambda_{req}^{k_r} \leq \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{req}^{k_r}. \quad (11)$$

Нехай маршрутні змінні та змінні, що відповідають за резервування пропускної здатності каналів зв'язку, віднесені до u_r -го приграничного маршрутизатора ($k_r \in K_r$, $(i, j) \in V$), є координатами відповідних векторів \vec{x}_r та \vec{y}_r . Тоді систему умов (10) можна подати у такому вигляді:

$$\sum_{u_r \in U^+} B_r \vec{y}_r \leq I_{n \times 1}, \quad (12)$$

де B_r – погоджувальна матриця; $I_{n \times 1}$ – вектор розміру $n \times 1$, всі координати якого дорівнюють 1. Як критерій оптимальності обрано мінімум функції

$$F = \sum_{u_r \in U^+} \left[\vec{x}_r^t H_r \vec{x}_r + \vec{y}_r^t Q_r \vec{y}_r \right], \quad (13)$$

де H_r – діагональна матриця метрик каналів зв'язку; Q_r – діагональна матриця умовних вартостей резервування каналного ресурсу.

Для забезпечення координованої роботи приграничних маршрутизаторів та отримання погодженого вирішення завдань маршрутизації та резервування ресурсів запропоновано дворівневий метод, заснований на використанні принципу цільової координації під час розв'язання оптимізаційної задачі, пов'язаної з мінімізацією квадратичної цільової функції (13) за наявності умов-обмежень (6)-(12). В результаті з метою врахування умов взаємодії приграничних вузлів (12), переходячи до задачі на безумовний екстремум, необхідно максимізувати за множниками Лагранжа (μ) лагранжіан L , тобто $\min_{x,y} F = \max_{\mu} L$, де

$$L = \sum_{U_r \in U^+} \left[\vec{x}_r^T H_r \vec{x}_r + \vec{y}_r^T Q_r \vec{y}_r \right] + \sum_{U_r \in U^+} \bar{\mu}_r^T \left[\sum_{U_r \in U^+} B_r \vec{y}_r - I_{n \times 1} \right]. \quad (14)$$

У рамках методу введено дворівневу ієрархію розрахунків, коли з урахуванням $L = \sum_{u_r \in U^+} L_r$ на нижньому рівні на кожному u_r -му приграничному маршрутизаторі визначаються вектори \vec{x}_r і \vec{y}_r шляхом мінімізації лагранжіана:

$$L_r = \vec{x}_r^t H_r \vec{x}_r + \vec{y}_r^t Q_r \vec{y}_r + \bar{\mu}_r^t \left[B_r \vec{y}_r \right] - \bar{\mu}_r^t I_{n \times 1} + \sum_{u_i \in U^+, i \neq r} \bar{\mu}_i^t \left[B_r \vec{y}_r \right] \quad (15)$$

за обмежень (6)-(9), (11). На верхньому рівні з метою недопущення перевантаження каналів зв'язку мережі під час резервування їх ПЗ здійснюється модифікація вектора множників Лагранжа в ході градієнтної процедури:

$$\bar{\mu}_r(p+1) = \bar{\mu}_r(p) + \nabla \bar{\mu}_r, \quad (16) \quad \nabla \bar{\mu}_r(y) = \sum_{u_r \in U^+} B_r \vec{y}_r - I_{n \times 1}, \quad (17)$$

де $\bar{\mu}_r(p)$ – значення вектору множників Лагранжу на p -му кроці роботи градієнтної процедури; $\nabla \bar{\mu}_r$ – градієнт функції. Таким чином, результати розв'язання задач на кожному окремому приграничному маршрутизаторі передаються ко-

ординатору мережі (верхній рівень ієрархії), де здійснюється їх аналіз та координація шляхом розрахунку (коригування) векторів множників Лагранжа $\bar{\mu}_r$ ($u_r \in U^+$) в ході процедури (16) та (17). Отримані нові розв'язання знову «спускаються» на нижній рівень управління для ітераційної оптимізації процесу маршрутизації з резервуванням ресурсів (15).

Встановлено, що запропонований метод збігався до оптимального рішення задачі QoS-маршрутизації на основі резервування мережних ресурсів за кінцеве число ітерацій (від 2 до 5). При цьому число таких ітерацій залежало від структури мережі, обсягу доступних мережних ресурсів, числа потоків і вимог до рівня QoS, що підтверджено результатами дослідження. Застосування методу дозволяє підвищити масштабованість рішень маршрутизації на основі резервування ресурсів із забезпеченням вимог щодо якості обслуговування. Так, розміри розв'язуваних на нижньому рівні методу оптимізаційних задач були в m^+ раз меншими, ніж розміри задачі централізованого розрахунку керуючих змінних.

Також у другому розділі вперше запропоновано динамічну модель багатошляхової маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником імовірності своєчасної доставки пакетів ТКМ. Її основу складають вирази, які описують умови збереження потоку, реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації та запобігання перевантаження каналів зв'язку. Новизною представленого рішення є те, що розрахунок множини шуканих маршрутів та розподіл каналного ресурсу мережі відбувається на основі врахування нестационарного характеру роботи інтерфейсів маршрутизаторів мережі, оскільки для отримання QoS-умов щодо забезпечення своєчасної доставки пакетів запропонована модель використовує стаціонарну точкову апроксимацію нестационарного потоку (PSFFA), коли динаміка зміни середньої черги та середньої затримки пакетів на інтерфейсі маршрутизатора мережі задається диференціальними рівняннями (1).

Тоді в рамках введених позначень імовірність своєчасної доставки пакетів (Timely Delivery, TD) k -го потоку P_{TD}^k може бути визначена так:

$$P_{TD}^k = \frac{T(\tau_{MP}^k \leq \tau_{req}^k)}{T_U}, \quad (18)$$

де $T(\tau_{MP}^k \leq \tau_{req}^k)$ – час таймера оновлення маршрутних таблиць, протягом якого середня багатошляхова міжкінцева затримка пакетів відповідає QoS-вимогам, тобто є меншою за τ_{req}^k ; T_U – таймер оновлення маршрутних таблиць, який, наприклад для протоколу RIP складає 30 с, а для протоколу IGRP – 90 с; τ_{MP}^k – середня міжкінцева багатошляхова затримка пакетів за множиною шляхів, розрахованих для k -го потоку. В свою чергу τ_{MP}^k може бути отримана як

$$\tau_{MP}^k = \sum_{i \in I^k} x_{p_i}^k \tau_{p_i}^k, \quad (19)$$

де $x_{p_i}^k$ – частка інтенсивності k -го потоку пакетів, який передається в маршруті p_i з множини усіх задіяних (розрахованих) маршрутів; $\tau_{p_i}^k$ – середня міжкінцева затримка пакетів k -го потоку в маршруті p_i , яка розраховується як сума середніх затримок пакетів у каналах зв'язку цього маршруту.

У загальному випадку в ході розв'язання задач багатошляхової маршрутизації для кожного з потоків важливо забезпечити виконання такої QoS-умови щодо значень ймовірності своєчасної доставки пакетів:

$$P_{TD}^k \geq \delta_{TD}^k \cdot P_{TD}^{k \text{ req}}, \quad (20)$$

де $\delta_{TD}^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо пакетам } k\text{-му потоку необхідно гарантувати своєчасну доставку;} \\ 0, & \text{в іншому випадку;} \end{cases}$

$P_{TD}^{k \text{ req}}$ – вимоги щодо ймовірності своєчасної доставки пакетів k -го потоку.

Залежно від типу ТКМ сформульовано критерії оптимальності маршрутних рішень під час забезпечення своєчасної доставки пакетів. Наприклад, в операторських мережах зв'язку як критерій оптимальності маршрутних рішень слід використовувати мінімум лінійної або квадратичної цільових функцій від маршрутних змінних. При цьому одним з видів обмежень мають виступати QoS-умови забезпечення заданих значень ймовірності своєчасної доставки пакетів (20). Подібна оптимізаційна постановка маршрутної задачі націлює на економію використання доступного мережного ресурсу, тому жоден з потоків не отримає ресурсу більше, ніж це необхідно для виконання QoS-умов (20).

У корпоративних мережах пропонується використовувати інший тип критерію оптимальності, пов'язаний з максимізацією цільової функції:

$$J_c = \sum_{k \in K} w_k P_{TD}^k, \quad (21)$$

де $w_k = IP_{pr}^k + 1$ – ваговий коефіцієнт, який визначається пріоритетом IP_{pr}^k пакетів k -го потоку. Використання критерію (21) забезпечує диференціацію QoS за показником ймовірності своєчасної доставки. Чим вище пріоритет пакетів, тим вища ймовірність своєчасної доставки буде забезпечена пакетам цього потоку.

Як показали результати проведеного дослідження, застосування запропонованої моделі (18)-(21) дозволяє за рахунок врахування нелінійного характеру зміни середньої затримки як на окремих мережних інтерфейсах, так і вздовж використовуваної множини маршрутів у мережі забезпечити максимальні значення ймовірності своєчасної доставки пакетів з підвищенням вимог до міжкінцевої затримки порівняно з рішенням, отриманим на основі моделі Traffic

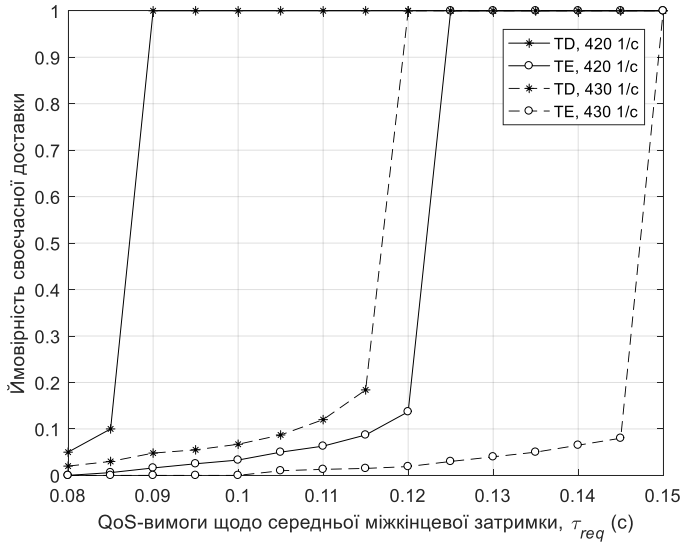


Рис. 3. Залежність ймовірності своєчасної доставки пакетів від QoS-вимог для різних моделей багатопрохідної маршрутизації (TD, TE)

стання запропонованої моделі TD. У цих умовах реалізація моделі TD дозволила забезпечити однакові з моделлю TE значення ймовірності своєчасної доставки, але при більш жорстких (на 30-37%) QoS-вимогах щодо τ_{req} .

У третьому розділі отримала подальший розвиток система поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів телекомунікаційної мережі за шляхами, що не перетинаються або перетинаються лише за вузлами. З отриманням даних рішень структура ТКМ описувалась графом $\Gamma = (R, E)$, в якому $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$ – це множина вершин, що моделюють маршрутизатори, а $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множина дуг, що представляють КЗ в ТКМ. Керуючою змінною виступає величина $x_{i,j}^k$, яка характеризує частку k -го потоку, що передається в каналі зв'язку $E_{i,j} \in E$.

Новизною маршрутних рішень за шляхами, що не перетинаються, є введення в структуру моделей нелінійних умов використання шляхів даного типу, тобто всіх вхідних та вихідних інтерфейсів i -го транзитного вузла повинні виконуватися відповідні умови:

$$\sum_{j: E_{j,i} \in E} \sum_{\substack{l: E_{l,i} \in E, \\ l \neq j}} x_{j,i}^k x_{l,i}^k = 0, \quad (22) \quad \sum_{n: E_{i,n} \in E} \sum_{\substack{m: E_{i,m} \in E, \\ m \neq n}} x_{i,n}^k x_{i,m}^k = 0. \quad (23)$$

Виконання умов (22) і (23) гарантує, що потік, який проходить через i -й транзитний вузол, надходить не більше ніж від одного суміжного вузла і передається не більше ніж одному суміжному вузлу.

У роботі представлене рішення, засноване на використанні шляхів, які перетинаються за вузлами, що є компромісом у ході забезпечення відмовостійко-

Engineering (TE). Для рішення, представленого на рис. 3, вигреш щодо (18) складав в середньому 28%. Переваги запропонованого рішення максимально проявлялися зі збільшенням розмірів мережі, зв'язності маршрутизаторів (кількості доступних маршрутів), зростанням завантаженості каналів зв'язку і мережі в цілому та підвищенням QoS-вимог, що і визначає область переважного використання

сті та безпеки, з одного боку, та якості обслуговування, з іншого. Це є актуальним, коли місцем відмов або компрометації є саме канали зв'язку, а не вузли. У рамках цієї моделі необхідно виконати умови:

$$\sum_{m=1}^{N_{in}} \prod_{n=1}^{N_{out}} x_{m,i}^k (x_{m,i}^k - x_{i,n}^k) = 0, \quad (24) \quad \sum_{n=1}^{N_{out}} \prod_{m=1}^{N_{in}} x_{i,n}^k (x_{i,n}^k - x_{m,i}^k) = 0, \quad (25)$$

де N_{in} та N_{out} – число вхідних та вихідних інтерфейсів i -го вузла.

Умови (24) вводяться для того, щоб для всіх вхідних і вихідних інтерфейсів i -го транзитного вузла, що використовується, кожен вхідний потік заданої інтенсивності також повинен відповідати вихідному потоку тієї ж інтенсивності. Умова (25) означає, що кожен вихідний потік заданої інтенсивності повинен відповідати вхідному потоку з тією ж інтенсивністю. Крім того, виконання умов (24) та (25) гарантує, що потоки, які передаються через i -й транзитний вузол, надходять з однієї і тієї ж кількості сусідніх вузлів, що передаються іншим суміжним вузлам з однаковою інтенсивністю.

Таким чином, формується множина шляхів, що мають не тільки спільну пару вузлів відправник та одержувач, а також використовують спільні транзитні вузли. Для забезпечення регулювання числа використовуваних шляхів (M^k), що не перетинаються, під час реалізації багатошляхової маршрутизації k -го потоку верхнє граничне значення кількості таких шляхів M_{UB}^k визначалось як:

$$M_{UB}^k = \min(\xi(s_k), \xi(d_k)), \quad (26)$$

де $\xi(s_k)$ – степінь вершини (вузла) відправника k -го потоку; $\xi(d_k)$ – степінь вершини (вузла) одержувача k -го потоку. Величина M^k може виступати як оцінюваний параметр, так і як керована величина. За її допомогою можна задавати мінімальне, максимальне або визначати оптимальне число використовуваних шляхів, що не перетинаються, при багатошляховій маршрутизації.

Як показали проведені дослідження використання моделі відмовостійкої маршрутизації за шляхами, що перетинаються за вузла, дозволило забезпечити підвищення продуктивності мережі приблизно в 1,7 разів. При цьому зі зростанням розміру мережі та зв'язності маршрутизаторів вираш за продуктивністю збільшувався до 2,5-4 разів.

У третьому розділі також отримала вдосконалення потокова модель швидкої перемаршрутизації, в якій пропонується в процесі реалізації схеми захисту каналу $E_{i,j} \in E$ на маршрутні змінні $\bar{x}_{i,j}^k$, що відповідають за визначення резервного шляху, накласти додаткові обмеження:

$$\bar{x}_{i,j}^k \in \{0; \delta_{i,j}^k\}, \quad (27) \quad 0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \quad (28)$$

де

$$\delta_{i,j}^k = \begin{cases} 0, & \text{при захисті каналу зв'язку } E_{i,j}; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (29)$$

Умови (27) актуальні за одношляхової, а (28) – за багатошляхової маршрутизації. Вони носять лінійний характер на відміну від раніше відомих нелінійних виразів, що сприяє зниженню обчислювальної складності отримання кінцевих протокольних рішень. Під час захисту вузла $R_i \in R$ фактично слід захистити всі канали, які є інцидентними цьому вузлу $R_i \in R$.

В ході реалізації схеми захисту шляху необхідно забезпечити відсутність загальних вузлів і каналів як в основному, так і резервному маршрутах, тобто при одношляховій маршрутизації необхідно виконати наступні лінійні умови:

$$\sum_{R_j \in R_i^*} \sum_{R_p \in R_i^*} (x_{j,i}^k + \bar{x}_{p,i}^k) \leq 1, \quad \forall R_i \in R \setminus \{s_k, d_k\}. \quad (30)$$

Універсальні умови захисту шляху, які справедливі і для одношляхової, і для багатошляхової маршрутизації, мають нелінійний вид:

$$\sum_{R_j \in R_i^*} \sum_{R_p \in R_i^*} x_{j,i}^k \bar{x}_{p,i}^k = 0, \quad \forall R_i \in R \setminus \{s_k, d_k\}. \quad (31)$$

Обґрунтовано до використання лінійно-квадратичний критерій оптимальності, заснований на мінімізації цільової функції:

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} b_{i,j}^k x_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k, \quad (32)$$

в якій встановлено систему ієрархії співвідношень вагових коефіцієнтів, при якій би забезпечувалися максимальні значення продуктивності ТКМ і масштабованості рішень щодо швидкої перемаршрутизації, в т.ч. на основі оптимізації роботи схеми захисту схильних до відмов елементів мережі одною (загальною для множини потоків) резервною ділянкою – «facility backup». Так введення третього доданка в (32) якраз пов'язано із забезпеченням максимального збігу резервного шляху з основним за складом каналів і вузлів, що входять до них; $b_{i,j}^k$ – це досить великий за своєю величиною штрафний коефіцієнт ($b_{i,j}^k \gg c_{i,j}^k$ і $b_{i,j}^k \gg \bar{c}_{i,j}^k$). Знак мінус перед третім доданком вводиться з тієї причини, що ступінь збігу резервного й основного шляхів необхідно максимізувати, а метрики даних шляхів (перший і другий доданок в (3.23)) повинні бути мінімальними.

Нелінійність умов захисту мультишляху (31) негативно відбивається на рівні обчислювальної складності рішень щодо швидкої перемаршрутизації. Тому у роботі пропонується використовувати в цьому випадку критерій оптимальності, який засновано на мінімізації наступної білінійної цільової функції:

$$\begin{aligned}
F = & \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k + \sum_{R_i \in R \setminus \{s_k, d_k\}} \sum_{R_j \in R_i^*} \sum_{R_p \in R_i^*} h x_{j,i}^k \bar{x}_{p,i}^k, \quad (33)
\end{aligned}$$

в якій h – ваговий коефіцієнт, який характеризує важливість білінійного доданка в критерії оптимальності (33); а через $R_i^* = \{R_j^* : E_{j,i} \neq 0; j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ позначено підмножину маршрутизаторів, які є суміжними для вершини R_i .

Перший і другий доданки у виразі (33) визначають умовні вартості формування та використання основного шляху/мультишляху, а третій і четвертий – резервного. П'ятий доданок є найбільш важливим і відповідає за реалізацію схеми захисту шляху, тобто за відсутність спільних вузлів і каналів в основному і резервному маршрутах. Таким чином, встановлюється наступна система ієрархії співвідношень вагових коефіцієнтів:

$$h \gg c_{i,j}^k \text{ і } h \gg \bar{c}_{i,j}^k, \quad (34)$$

а також доданків:

$$\begin{aligned}
& \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k \leq \\
& \leq \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k. \quad (35)
\end{aligned}$$

Виконання умови (35) гарантує, що розрахований основний шлях/мультишлях не поступатиметься за ефективністю резервному. Проведені дослідження показали, що введення квадратичних членів в критерій (33) дозволяє забезпечити реалізацію багатошляхової швидкої перемаршрутизації навіть при невисокій завантаженості мережі, тоді як без їх введення здійснювалось послідовне вмикання шляхів у порядку збільшення їх метрик. Адекватність запропонованої потокової моделі швидкої перемаршрутизації підтверджена на ряді розрахункових прикладів при вирішенні завдань одношляхової та багатошляхової маршрутизації при реалізації різних схем захисту елементів мережі.

У третьому розділі були також запропоновані рішення завдань швидкої перемаршрутизації із збалансуванням навантаження (Traffic Engineering Fast ReRoute, TE FRR), щоб захист елемента мережі не призвів до перевантаження ТКМ та істотного зниження рівня QoS, які орієнтовані на зниження обчислювальної складності та підвищення масштабованості протокольних рішень при реалізації як одношляхової, так і багатошляхової стратегії маршрутизації. Так запропоновано дворівневий метод одношляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в SDN, який забезпечує реалізацію схем захисту

каналу, вузла, та шляху. Умови захисту пропускної здатності ТКМ при одношляховій маршрутизації пропонується представити в формі

$$\sum_{k \in K} \lambda^k (x_{i,j}^k + \bar{x}_{i,j}^k - x_{i,j}^k \cdot \bar{x}_{i,j}^k) \leq \alpha \cdot \phi_{i,j}, E_{i,j} \in E, \quad (36)$$

де α – додатково введена керуюча змінна, яка визначає верхній поріг завантаженості каналів зв'язку ТКМ і підпорядковується умовам $0 \leq \alpha \leq 1$.

Як критерій оптимальності рішень задачі швидкої перемаршрутизації в ТКМ буде виступати мінімум порога α , тобто

$$\min_{x, \bar{x}, \alpha} \alpha. \quad (37)$$

Виконання умов (36), (37) дозволяє забезпечити оптимальне балансування навантаження при реалізації схеми захисту пропускної здатності розрахованих шляхів. В рамках пропонованого методу вводиться дворівнева ієрархія розрахунків, яка підпорядковується принципу прогнозування взаємодій теорії ієрархічних багаторівневих систем. Тоді на нижньому рівні пропонується розраховувати маршрутні змінні $x_{i,j}^k$, що відповідають за визначення основних шляхів, в ході мінімізації порогу α (37), але при фіксованих значеннях $\bar{x}_{i,j}^k$, що задаються на верхньому ієрархічному рівні. При цьому важливо забезпечити задоволення лінійних умов збереження потоку, реалізації одношляхової маршрутизації, умов (30), (31), (36). При такій постановці задачі умови (31) і (36) вже будуть лійними, тому що $\bar{x}_{i,j}^k$ на нижньому рівні є відомими.

На верхньому рівні ієрархії відбувається розрахунок маршрутних змінних $\bar{x}_{i,j}^k$, що відповідають за формування (прогнозування) резервних маршрутів, також шляхом мінімізації змінної α (37) при фіксованих і розрахованих на нижньому рівні значеннях маршрутних змінних $x_{i,j}^k$. В ході оптимізації на цьому рівні необхідно виконати умови (28)-(31), (36). Це дозволило відмовитися від вихідної досить розмірної та нелінійної оптимізаційної задачі шляхом переходу до ітераційного розв'язання лінійних оптимізаційних задач вдвічі меншої розмірності. Реалізація на практиці подібного підходу дозволяє істотно знизити вимоги до обчислювальної потужності SDN-контролерів, на які покладено централізовані рішення завдань маршрутизації в мережі.

Проведений аналіз запропонованого методу (рис. 4) підтвердив його ефективність з точки зору отримання оптимальних рішень щодо забезпечення збалансованої завантаженості каналів зв'язку (37) та реалізації необхідних схем захисту елементів мережі при швидкій перемаршрутизації в SDN. Метод сходився до оптимальних маршрутних рішень в середньому за 2-3 ітерації (рис. 5).

У розділі запропоновано математичну модель багатошляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ, новизною якої є те, що узгоджене рішення задач по TE та FRR із захистом каналу, вузла та пропускної здатності забезпечується в ході розв'язання задачі лінійної оптимізації.

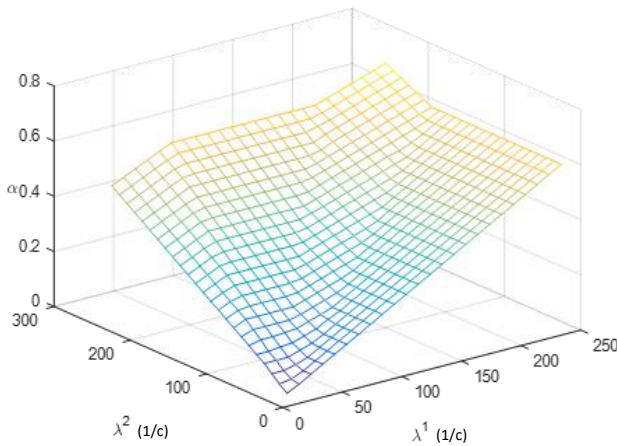


Рис. 4. Залежність порога завантаженості каналів зв'язку мережі (3.28) від інтенсивностей потоків пакетів

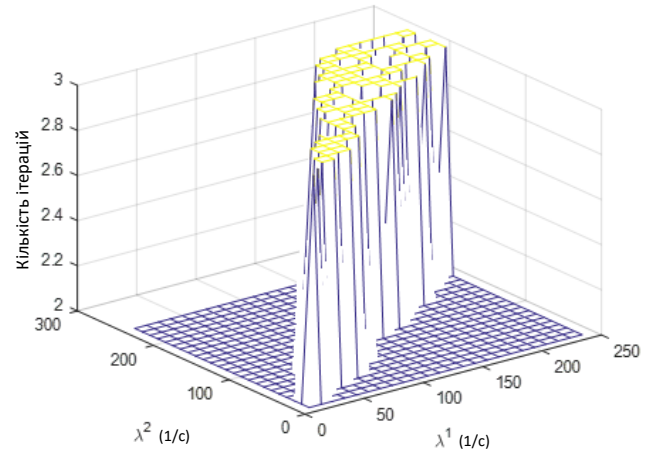


Рис. 5. Залежність кількості ітерацій роботи методу від інтенсивностей потоків пакетів

Масштабована реалізація багатошляхової стратегії швидкої перемаршрутизації натикається на проблему подолання нелінійності раніше отриманих умов захисту пропускної здатності ТКМ. Перехід до лінійних умов захисту пропускної здатності ТКМ

$$\sum_{k \in K} \lambda^k \cdot u_{i,j}^k \leq \alpha \cdot \varphi_{i,j}, E_{i,j} \in E \quad (38)$$

при

$$x_{i,j}^k \leq u_{i,j}^k \text{ та } \bar{x}_{i,j}^k \leq u_{i,j}^k, \quad (39)$$

було досягнуто шляхом введення додаткових керуючих змінних $0 \leq u_{i,j}^k \leq 1$, які визначають верхній поріг для маршрутних змінних основного та резервного шляхів. Критерієм оптимальності рішень задач TE FRR залишається вираз (37), модифікований під розширену множину керуючих змінних.

Результати проведеного аналізу запропонованої моделі на ряді числових прикладів підтвердили її адекватність і можливість отримання оптимальних рішень задачі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ при реалізації різних схем захисту елементів мережі (каналу, вузла) та пропускної здатності. В роботі показано, що вигреш від реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації при TE FRR дозволив знизити верхній поріг завантаженості каналів зв'язку в середньому від 37,12% до 59,41% при захисті каналу (рис. 6 а) та від 31,5% до 56,3% при захисті вузла (рис. 6 б), що позитивно позначається і на рівні QoS в мережі в цілому.

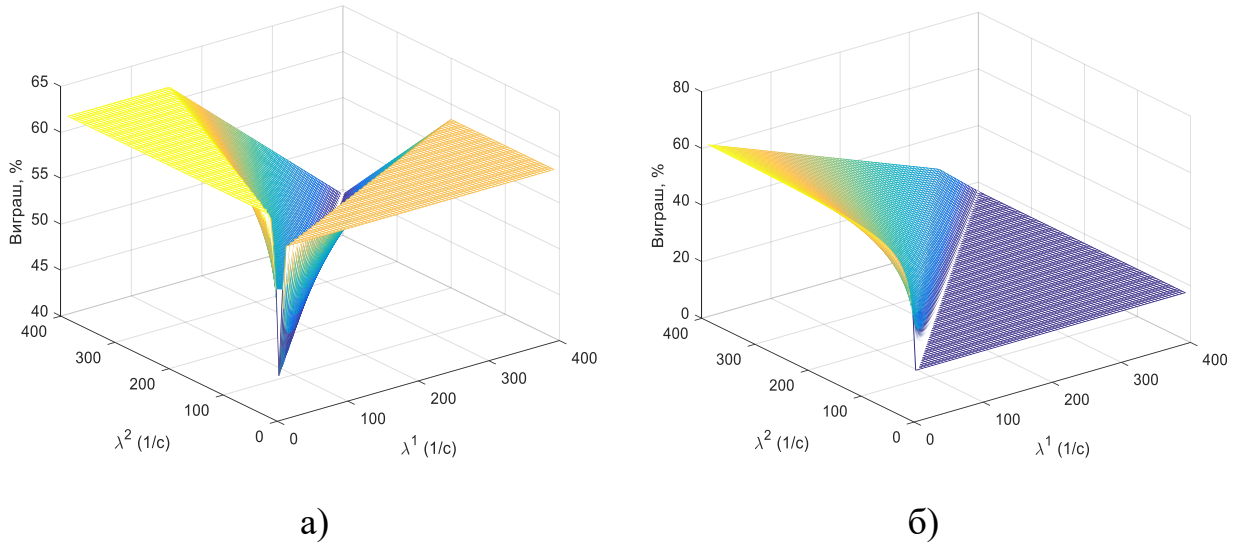


Рис. 6. Виграш за критерієм α від реалізації багатошляхової маршрутизації у порівнянні з використанням одношляхової маршрутизації при захисті каналу (а) та вузла (б)

З метою підвищення масштабованості та відмовостійкості маршрутних рішень запропоновано ієрархічний метод міждоменної швидкої перемаршрутизації. Метод заснований на декомпозиційному поданні потокової моделі маршрутизації, коли ТКМ складалась з P підмереж або доменів. Нехай кожен окремий p -й домен мережі описується підграфом $\Gamma^P = (R^P, E^P)$ графу Γ , де $R^P = \{R_i^P; i = \overline{1, m_p}\}$ – множина маршрутизаторів p -го домену, а m_p – загальна кількість маршрутизаторів у домені; $E^P = \{E_{i,j}^P; i, j = \overline{1, m_p}, i \neq j\}$ – множина каналів зв'язку, які з'єднують маршрутизатори p -го домену ($p = \overline{0, P}$). При цьому нульовий номер присвоюється опорному домену (backbone). Інші P доменів обмінюються пакетами через цей опорний домен.

Припустимо, що при декомпозиції мережі границя між доменами проходить через маршрутизатори, і тільки опорний домен може мати спільні маршрутизатори з іншими доменами. Крім того, кожен окремий канал зв'язку відноситься лише до одного домену. З метою підвищення відмовостійкості мережі кількість приграничних маршрутизаторів між доменами повинна бути рівною двом або більше. При цьому, якщо один з подібних маршрутизаторів відмовить, усі потоки повинні перенаправлятися до інших приграничних маршрутизаторів. Тоді для кожного p -го домену визначено множину приграничних маршрутизаторів B^P ($B^P \subset R^P$), через які потоки надходять або виходять. Тобто $B_{in}^{P,k}$ та $B_{out}^{P,k}$ – підмножина приграничних маршрутизаторів, через які k -й потік відпо-

відно надходить до p -го домену або виходить з нього. З кожним каналом p -го домену пов'язана його пропускна здатність $\varphi_{i,j}^p$ (1/с). Позначимо через $R_{i*}^p \subset R^p \setminus B_{out}^{p,k}$ множину маршрутизаторів, суміжних до маршрутизатора R_i^p .

Розв'язуючи задачу ієрархічної міждоменної маршрутизації для кожного p -го домену, необхідно розрахувати маршрутні змінні $x_{i,j}^{p,k}$, які характеризують частку інтенсивності k -го потоку в каналі зв'язку $E_{i,j}^p \in E^p$. Для кожного маршрутизатора p -го домену необхідно виконати умови збереження кожного k -го потоку, щоб забезпечити зв'язність розрахованих міждоменних маршрутів у мережі. При цьому подібні умови для доменів різних типів (джерело, опорний, одержувач) хоча і відрізнялись, але мали лінійний вигляд.

При цьому маршрутні змінні $x_{i,j}^{p,k}$ виступають координатами відповідних маршрутних векторів \bar{x}_p^k , які визначають основні маршрути для k -го потоку в p -му домені. При розв'язанні задачі відмовостійкої міждоменної маршрутизації поряд з розрахунком основних маршрутів необхідно розрахувати і множину резервних шляхів на основі визначення маршрутних змінних $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$, які також виступають координатами відповідних векторів $\bar{\bar{x}}_p^k$.

При розподіленому розрахунку \bar{x}_p^k та $\bar{\bar{x}}_p^k$ в кожному окремому домені важливо забезпечити міждоменну зв'язність маршрутів (основних та резервних). Це визначило необхідність введення в структуру моделі додаткових умов міждоменної взаємодії:

$$C_{p,0}^k \bar{x}_p^k = C_{0,p}^k \bar{x}_0^k, \quad (40) \quad C_{p,0}^k \bar{\bar{x}}_p^k = C_{0,p}^k \bar{\bar{x}}_0^k, \quad p = \overline{1, P}, \quad k \in K. \quad (41)$$

де $C_{p,0}^k$ – матриця взаємодії p -го та опорного доменів для k -го потоку.

У даній роботі пропонуються схеми захисту приграничного маршрутизатора шляхом захисту множини каналів зв'язку, інцидентних вузлу, що захищається. Наприклад, якщо один з маршрутизаторів p -го домену є джерелом k -го потоку, тоді при одношляховій маршрутизації при захисті приграничного маршрутизатора $R_i^p \in B_{out}^{p,k}$ треба виконати наступні умови:

$$\bar{x}_{j,i}^{p,k} \in \left\{ 0; \delta_{j,i}^{p,k} \right\} \quad \forall R_j^p \in R_{i*}^p \quad \text{при} \quad R_{i*}^p \subset R^p \setminus B_{out}^{p,k}, \quad (42)$$

при багатошляховій маршрутизації мають місце умови:

$$0 \leq \bar{x}_{j,i}^{p,k} \leq \delta_{j,i}^{p,k} \quad \forall R_j^p \in R_{i*}^p \quad \text{при} \quad R_{i*}^p \subset R^p \setminus B_{out}^{p,k}, \quad (43)$$

де

$$\delta_{j,i}^{p,k} = \begin{cases} 0, & \text{при захисті каналу зв'язку } E_{j,i}^p; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (44)$$

Умови, подібні до (42)-(44), вводяться і для опорного домену, і для домену, який виступає одержувачем пакетів. Описана модель (40)-(44) дозволила покласти в основу методу ієрархічної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ТКМ рішення задачі, пов'язаної з розрахунком векторів \bar{x}_p^k та $\bar{\bar{x}}_p^k$ з урахуванням умов (40)-(44) під час використання наступного критерію оптимальності:

$$\min_{x, \bar{x}} F, \quad F = \sum_{p=0}^P F_p, \quad F_p = \sum_{k \in K} \left[(\bar{x}_p^k)^T H_p^k \bar{x}_p^k + (\bar{\bar{x}}_p^k)^T H_p^k \bar{\bar{x}}_p^k \right], \quad (45)$$

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

Розрахунок векторів \bar{x}_p^k та $\bar{\bar{x}}_p^k$ з метою підвищення масштабованості маршрутних рішень можна здійснювати за кожним доменом окремо, мінімізуючи F_p . З метою виконання умов міждоменної взаємодії (40), (41) при збереженні децентралізації розрахунку \bar{x}_p^k та $\bar{\bar{x}}_p^k$ за окремими доменами пропонується використати принцип цільової координації, в рамках якого на рівні доменів розв'язується задача з мінімізації за маршрутними змінними лагранжіанів виду

$$L_0 = \sum_{k \in K} \left[(\bar{x}_0^k)^T H_0^k \bar{x}_0^k + (\bar{\bar{x}}_0^k)^T H_0^k \bar{\bar{x}}_0^k \right],$$

$$L_p = \sum_{k \in K} \left[(\bar{x}_p^k)^T H_p^k \bar{x}_p^k + (\bar{\bar{x}}_p^k)^T H_p^k \bar{\bar{x}}_p^k \right] + \sum_{k \in K_p^+} \bar{\mu}_{p,0}^k C_{p,0}^k \bar{x}_p^k - \sum_{k \in K_p^-} \bar{\mu}_{q,0}^k C_{p,0}^k \bar{x}_p^k +$$

$$+ \sum_{k \in K_p^+} \bar{\eta}_{p,0}^k C_{p,0}^k \bar{\bar{x}}_p^k - \sum_{k \in K_p^-} \bar{\eta}_{q,0}^k C_{p,0}^k \bar{\bar{x}}_p^k, \quad p = \overline{1, P}, \quad (46)$$

де K_p^+ – підмножина потоків, що надходять до p -го домену; K_p^- – підмножина потоків, що виходять з p -го домену, $\bar{\mu}_{p,0}^k$ та $\bar{\eta}_{p,0}^k$ – вектори Лагранжа, віднесені до кожної з векторно-матричних умов міждоменної взаємодії для основного (40) та резервного (41) маршрутів, які обчислюються на верхньому рівні методу у ході виконання градієнтної ітераційної процедури:

$$\bar{\mu}_{p,0}^k(\beta + 1) = \bar{\mu}_{p,0}^k(\beta) + \nabla \bar{\mu}_{p,0}^k; \quad \bar{\eta}_{p,0}^k(\beta + 1) = \bar{\eta}_{p,0}^k(\beta) + \nabla \bar{\eta}_{p,0}^k, \quad (47)$$

де β – номер координаційної ітерації; $\nabla \bar{\mu}_{p,0}^k$ і $\nabla \bar{\eta}_{p,0}^k$ – градієнти, які розраховуються виходячи з одержуваних на нижньому рівні результатів розв'язання задач маршрутизації \bar{x}_p^{k*} та $\bar{\bar{x}}_p^{k*}$ у кожному конкретному домені.

Використання запропонованого методу дозволяє підвищити якість рішення маршрутних завдань в мережах ієрархічної структури, а саме, істотно знизити розміри маршрутних таблиць (в середньому в P раз) та обчислювальну складність отримуваних рішень за рахунок зменшення розмірності розв'язуваної оптимізаційної задачі. В цілому метод схилюється до оптимальних рішень за 1-2 ітерації процедури (47) при реалізації одношляхової маршрутизації, за 2-4 ітерації – при багатошляховій маршрутизації.

Дуже важливим моментом в підвищенні відмовостійкості ТКМ є реалізація захисту шлюзу за замовчуванням, за допомогою якого мережі доступу комутуються до транспортної мережі (ТМ). Тому у розділі представлено узгоджене рішення щодо захисту шлюзу за замовчуванням та швидкої перемаршрутизації в ТКМ на основі розробки відповідної математичної моделі. В моделі структура ТКМ описується за допомогою графа $\Gamma = (M, L)$, в якому $M = R \cup V$, де $V = \{V_j, j = \overline{1, v}\}$ – множина вершин, що моделюють мережі доступу (МД) ТКМ. В свою чергу множина маршрутизаторів R також включає в себе дві підмножин: R^+ та R^- – множини відповідно приграничних та транзитних маршрутизаторів транспортної мережі. Підмножиною множини R^+ є множина R_j^+ , що моделює ті приграничні маршрутизатори, а точніше їх інтерфейси, які утворюють віртуальний маршрутизатор для j -ї мережі доступу, що описується вершиною V_j .

В свою чергу множина дуг $L = E \cup W$ вихідного графа Γ , включає в себе підмножину ліній доступу $W = \{W_{i,j}, i = \overline{1, v}, j = \overline{1, m^+}\}$, що з'єднують мережі доступу та приграничні маршрутизатори транспортної мережі. Нехай кожному k -му потоку зіставляється параметри V_s^k та V_d^k , тобто мережі доступу, які виступають відповідно джерелом та одержувачем для цього потоку. Тоді в результаті розв'язання задачі відмовостійкої маршрутизації в ТКМ за допомогою запропонованої моделі необхідно розрахувати три типи керуючих змінних, які віднесені до основного маршруту: $x_{i,j}^k$ – маршрутна змінна; $y_{i,j}^k$ та $z_{j,i}^k$ – змінні доступу, які характеризують частку k -го потоку, що протікає в лініях доступу $W_{i,j}$ та $W_{j,i}$ відповідно. При підключенні МД лише до одного інтерфейсу віртуального маршрутизатора на змінні доступу накладаються обмеження виду

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{i,j}^k \in \{0;1\}; \\ \sum_{j:R_j \in R_i^+} \prod_{k \in K} y_{i,j}^k = 1; \end{array} \right. \text{ та } \left\{ \begin{array}{l} z_{j,i}^k \in \{0;1\}; \\ \sum_{j:R_j \in R_i^+} \prod_{k \in K} z_{j,i}^k = 1. \end{array} \right. \quad (48)$$

При можливості балансування трафіка за всіма доступними інтерфейсами віртуального маршрутизатора умови (48) замінюються на нерівності:

$$0 \leq y_{i,j}^k \leq 1 \text{ та } 0 \leq z_{j,i}^k \leq 1, \quad (49)$$

які доповнюються умовами:

$$\sum_{R_j \in R_p^+} y_{p,j}^k = 1, V_p = V_s^k, \quad (50) \quad \sum_{R_j \in R_h^+} z_{j,h}^k = 1, V_h = V_d^k. \quad (51)$$

Ці умови вводяться для того, щоб не допустити втрат пакетів на ділянках «МД – ТМ» (50) і «ТМ – МД» (51). Для забезпечення узгодженості при розрахунку різнотипних керуючих змінних, що відповідають за реалізацію відмовостійкої маршрутизації, важливо виконати умови збереження потоку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 0; k \in K, R_i \in R^-; \\ \sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = y_{p,i}^k; k \in K, R_i \in R^+, V_p = V_s^k; \\ \sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = -z_{i,h}^k; k \in K, R_i \in R^+, V_h = V_d^k. \end{array} \right. \quad (52)$$

Для забезпечення відмовостійкості ТКМ, в якій МД з ТМ з'єднані через певний віртуальний маршрутизатор, вводяться додаткові керуючі змінні $\bar{x}_{i,j}^k$, $\bar{y}_{i,j}^k$ та $\bar{z}_{j,i}^k$, які визначають резервний шлях для тих самих відправника та одержувача. Тоді для захисту шляху за замовчуванням в модель введені умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{j,n}^k + \bar{x}_{j,n}^k \leq 1; \\ y_{i,j}^k + \bar{y}_{i,j}^k \leq 1, \end{array} \right. \quad (53) \quad \sum_{i: V_i \in V} y_{i,j}^k \bar{y}_{i,j}^k + \sum_{n: E_{j,n} \in E} x_{j,n}^k \bar{x}_{j,n}^k = 0, R_j \in R^+. \quad (54)$$

Лінійні умови (53) мають місце при здійсненні підключення МД лише до одного інтерфейсу віртуального маршрутизатора, умова (54) вводиться при можливості балансування навантаження за всіма доступними інтерфейсами віртуального маршрутизатора. Критерієм оптимальності отримуваних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації обрано мінімум наступної цільової функції:

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{W_{i,j} \in W} b_{i,j}^k y_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{W_{i,j} \in W} \bar{b}_{i,j}^k \bar{y}_{i,j}^k + \\ + \sum_{k \in K} \sum_{W_{j,i} \in W} a_{j,i}^k z_{j,i}^k + \sum_{k \in K} \sum_{W_{j,i} \in W} \bar{a}_{j,i}^k \bar{z}_{j,i}^k - \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} d_{i,j}^k x_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k, \quad (55)$$

де сьомий доданок вноситься в цільову функцію для покращення масштабованості шляхом максимізації співпадіння між основним та резервним шляхами за

незахищеними каналами зв'язку, тоді як $d_{i,j}^k \gg c_{i,j}^k$ і $d_{i,j}^k \gg \bar{c}_{i,j}^k$. Вагові коефіцієнти $b_{i,j}^k$ і $a_{j,i}^k$, $\bar{b}_{i,j}^k$ і $\bar{a}_{j,i}^k$, у свою чергу, являють собою набір метрик доступу для k -го потоку, який визначає умовну вартість підключення МД до пригранничного маршрутизатора при виборі шлюзу за замовчуванням. Вибір цих показників в запропонованому рішенні визначається за допомогою зворотних функцій коефіцієнтів готовності ліній доступу.

Таким чином, при вирішенні технологічного завдання щодо відмовостійкої маршрутизації необхідно розв'язати задачу змішаного цілочисельного нелінійного програмування в ході мінімізації (55) з урахуванням умов (48), (52), (53) або задачу нелінійного програмування з обмеженнями (49)-(52), (54). Чим більше розмір ТКМ та чим більше існує варіантів вибору шлюзу за замовчуванням і можливих шляхів у транспортній мережі, тим ефективнішою є саме оптимізаційна постановка задачі при узгодженому вирішенні цих завдань. У цих визначених умовах скоординовані рішення забезпечують більш високу ефективність відмовостійкої маршрутизації в мережі у порівнянні з існуючими, в яких завдання вибору шлюзу та маршрутизації вирішуються окремо.

У третьому розділі запропонована математична модель відмовостійкої QoS-маршрутизації в мультисервісній ТКМ, новизною якої є те, що за її допомогою забезпечується реалізація схеми захисту рівня якості обслуговування не тільки за показниками пропускної здатності, але й за середньою міжкінцевою затримкою пакетів, що є особливо актуальним для потоків, чутливих до значень часових показників якості обслуговування – VoIP, IPTV. Отримати подібне рішення вдалось на підставі тензорного опису процесу відмовостійкої маршрутизації, описаного детально в другому розділі, коли, наприклад, аналоги умов (3)

$$\lambda_{req}^k \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right)^{-1} \leq \tau_{req}^k, (k \in K) \quad (56)$$

вводились для основного мультишляху, а умови

$$\lambda_{req}^k \left(\bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[\bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right)^{-1} \leq \tau_{req}^k (k \in K). \quad (57)$$

– для резервного мультишляху. Взаємозв'язок потоків, які протікають основними та резервними маршрутами, при захисті вузла, каналу та пропускної здатності мережі в цілому враховувався на рівні формування тензорних метрик. Наприклад, для стаціонарного випадку координати метричного тензора, віднесенного до основного мультишляху у виразі (56), визначались виразом:

$$g_{v(k)}^{zz} = \lambda_{v(k)}^z (\varphi_z - B_{v(k)}^z), \quad (58)$$

де $\lambda_{v(k)}^z$ та $B_{v(k)}^z$ – інтенсивності відповідно k -го та агрегованого потоку в каналі $v_z = (i, j) \in V$ основного шляху. При цьому

$$B_{v(k)}^z = \lambda_{req}^k x_{i,j}^k + \sum_{p \in K, p \neq k} \lambda_{req}^p \cdot \max[x_{i,j}^p, \bar{x}_{i,j}^p]. \quad (59)$$

Координати метричного тензора, віднесеного до резервного мультишляху у виразі (57), визначались виразами, аналогічними до (58) та (59). Крім того, в лівій частині нерівностей (56) та (57) записано вирази для розрахунку середньої міжкінцевої затримки (τ_{MP}^k та $\bar{\tau}_{MP}^k$) пакетів, які передаються основним та резервним мультишляхами відповідно. Тоді в модель вводяться умови:

$$\tau_{MP}^k \leq \bar{\tau}_{MP}^k \leq \tau_{req}^k, \quad (k \in K), \quad (60)$$

за яких середня міжкінцева затримка пакетів вздовж основного мультишляху має бути не гіршою за відповідну затримку для резервного мультишляху.

В ході розв'язання задачі відмовостійкої QoS-маршрутизації в ТКМ в залежності від особливостей вихідних даних доцільно використовувати один з раніше описаних критеріїв оптимальності (32) або (33). У роботі на числових прикладах продемонстрована працездатність запропонованої тензорної моделі відмовостійкої QoS-маршрутизації з деталізацією процедур геометризації структури ТКМ – вибору простору, систем координат та формування матриць коваріантного перетворення введених базисів. В результаті розв'язання поставленої оптимізаційної задачі отримані основний та резервний мультишляхи, вздовж яких забезпечувався заданий рівень якості обслуговування за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів.

У четвертому розділі розроблено метод безпечної маршрутизації повідомлень за шляхами, що перетинаються, який відноситься до класу проактивних рішень щодо забезпечення мережної безпеки. У разі використання шляхів, що перетинаються, процедура числової оцінки ймовірності компрометації повідомлення, яке передається, помітно ускладнюється, а в ряді випадків в аналітичному вигляді стає неможливою. В даному розділі пропонується використовувати клас шляхів, що перетинаються, але для яких можливо здійснити аналітичну оцінку ймовірності компрометації повідомлення.

Нехай простим називається шлях, якщо він утворений послідовним з'єднанням каналів зв'язку мережі. Тоді композитні шляхи включають в себе декілька простих шляхів, які перетинаються. Проте, щоб забезпечувалася можливість розрахунку ймовірності компрометації композитного шляху в ході безпечної маршрутизації, він повинен містити два типи фрагментів, що складаються з послідовного або з паралельного з'єднання каналів зв'язку. На рис. 7 показано структуру мережі, яка містить один композитний шлях, який включає в

себе канали двох простих шляхів, які перетинаються між собою. Перший простий шлях представлений вузлами $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$, а другий – $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4$.

У роботі введені наступні позначення: \tilde{M} – кількість використовуваних композитних шляхів, що не перетинаються; \tilde{M}_i – кількість фрагментів в i -му композитному шляху; M_i – кількість каналів зв'язку в i -му композитному шляху; p_i^j – ймовірність компрометації j -го каналу зв'язку i -го композитного шляху; \tilde{p}_i^j – ймовірність компрометації j -го фрагмента i -го композитного шляху; \tilde{p}_i – ймовірність компрометації i -го композитного шляху; \tilde{P}_{msg} – ймовірність компрометації повідомлення в цілому при його передачі частинами за композитними шляхами; γ_P – допустима ймовірність компрометації повідомлення в мережі; n_i – цілочисельна змінна, яка характеризує кількість частин повідомлення, що передаються за i -м композитним шляхом.

Ймовірність компрометації i -го композитного шляху, що складається з \tilde{M}_i фрагментів, може бути розрахована відповідно до наступного виразу:

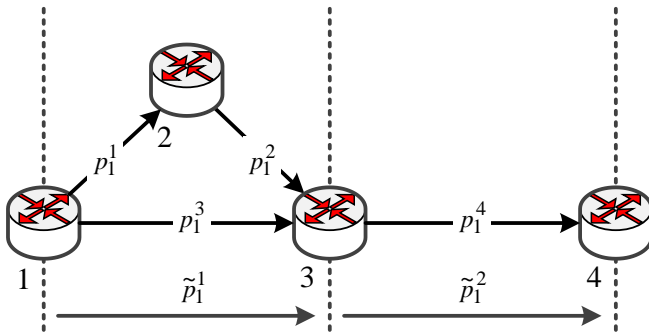


Рис. 7. Приклад композитного шляху

$$\tilde{p}_i = 1 - \prod_{j=1}^{\tilde{M}_i} (1 - \tilde{p}_i^j). \quad (61)$$

Тоді для розрахунку ймовірності компрометації повідомлення необхідно використовувати вираз:

$$\tilde{P}_{msg} = \prod_{i=1}^{\tilde{M}} \tilde{p}_i. \quad (62)$$

У загальному випадку один композитний шлях може містити кілька послідовно з'єднаних фрагментів з паралельним з'єднанням каналів зв'язку. Позначимо через h_i максимальне число паралельно з'єднаних каналів зв'язку за всіма фрагментами i -го композитного шляху. Тоді має місце умова

$$h_i \leq n_i \leq T - 1, \quad (i = \overline{1, \tilde{M}}), \quad (63)$$

виконання якої дозволить таким чином розподілити частини повідомлення за паралельно з'єднаними каналами мережних фрагментів композитних шляхів, щоб в кожному з них передавалося ненульове число таких частин повідомлення та були справедливі вирази (61) та (62). Крім того, має виконуватися наступна умова з урахуванням композитного характеру використовуваних шляхів:

$$N - n_i < T, \quad (i = \overline{1, \tilde{M}}). \quad (64)$$

В основу методу безпечної маршрутизації частин повідомлення, яке передається за множиною композитних шляхів, покладено рішення оптимізаційної задачі, пов'язаної з використанням критерію оптимальності

$$\min_{n_i} \prod_{i=1}^{\tilde{M}} \tilde{p}_i(n_i), \quad (65)$$

що гарантує мінімізацію ймовірності компрометації переданого повідомлення. Як обмеження, крім умов (61)-(64), варто врахувати вирази

$$\sum_{i=1}^{\tilde{M}} n_i = N, \quad (66) \quad P_{msg} \leq \gamma P. \quad (67)$$

Результати дослідження підтвердили ефективність запропонованого методу. Так, наприклад, використання композитного шляху на структурі ТКМ, представленої на рис. 7, забезпечило зниження ймовірності компрометації повідомлення у порівнянні з використанням одного простого шляху $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ в середньому на 20-55% при $p_1^4 = 0,1 \div 0,3$ та на 5-20% при $p_1^4 = 0,5 \div 0,9$ (рис. 8 а); а у порівнянні з використанням одного простого шляху $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ в середньому на 5-50% при $p_1^4 = 0,1 \div 0,3$ та на 3-15% при $p_1^4 = 0,5 \div 0,9$ (рис. 8 б).

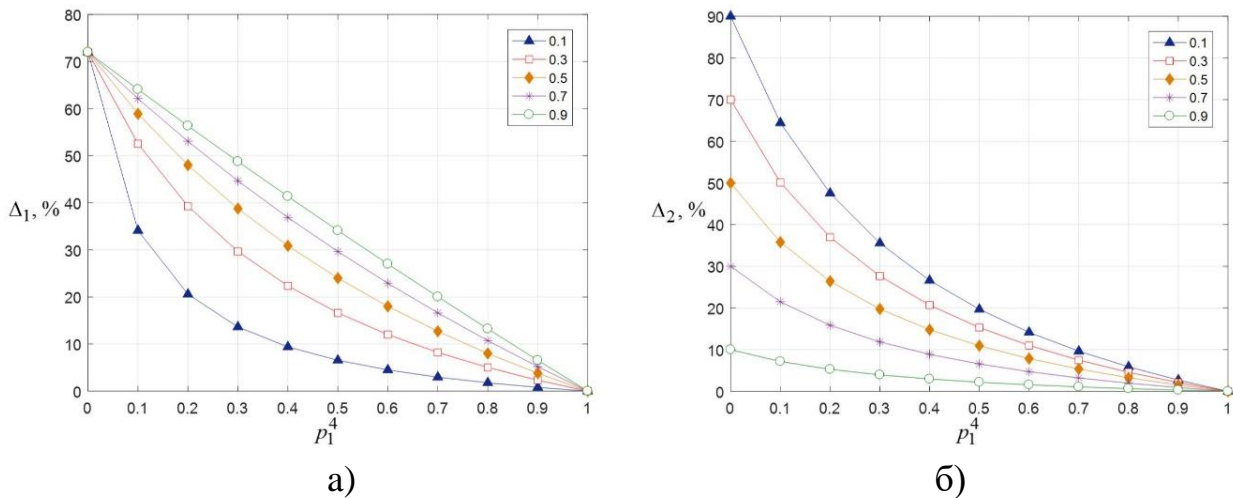


Рис. 8. Залежність виграшу по ймовірності компрометації від використання запропонованого методу в порівнянні з механізмом SPREAD

В рамках запропонованого методу безпечної швидкої перемаршрутизації (Secure Fast ReRouting, S-FRR), який відповідає вимогам реактивного підходу, в ході розрахунку резервного мультишляху пропонується реалізувати наступні дві схеми захисту основного мультишляху:

- схема захисту основного мультишляху в цілому, при якій основний і резервний мультишляхи не перетинаються ні за вузлами, ні за каналами;

– схема захисту окремого шляху (композитного або простого) основного мультишляху, при якій резервний мультишлях не повинен містити канали та вузли шляху, який захищається.

Реалізація кожної зі схем захисту націлена на відновлення заданого рівня мережної безпеки після відмови від основного мультишляху та переходу до використання резервного мультишляху. У зв'язку з цим уточнимо раніше введені та введемо додаткові позначення: \tilde{p}_i^{pr} – ймовірність компрометації i -го композитного або простого шляху основного мультишляху; \tilde{p}_i^b – ймовірність компрометації i -го композитного або простого шляху резервного мультишляху; \tilde{P}_{msg}^{pr} – ймовірність компрометації повідомлення в цілому при його передачі частинами за композитними або простими шляхами основного мультишляху; \tilde{P}_{msg}^b – ймовірність компрометації повідомлення в цілому при його передачі частинами за композитними або простими шляхами резервного мультишляху; n_i та \bar{n}_i – цілочисельні змінні, які характеризують кількість частин повідомлення, що передаються за i -м композитним або простим шляхом, що входить відповідно до складу основного або резервного мультишляху.

Для розрахунку ймовірності компрометації повідомлення, яке передається за множиною композитних шляхів, необхідно використовувати вирази

$$\tilde{P}_{msg}^{pr} = \prod_{i=1}^{\tilde{M}} \tilde{p}_i^{pr} \quad \text{і} \quad \tilde{P}_{msg}^b = \prod_{i=1}^{\tilde{M}} \tilde{p}_i^b. \quad (68)$$

Ймовірності компрометації мережних фрагментів \tilde{p}_i^{pr} і \tilde{p}_i^b є функціями від кількості частин повідомлення, що передаються ними, тобто від n_i і \bar{n}_i . Тоді з урахуванням (61) мають місце умови

$$\tilde{p}_i^{pr} = \begin{cases} 1 - \prod_{j=1}^{\tilde{M}_i} (1 - \tilde{p}_i^j), & n_i > 0; \\ 1, & n_i = 0, \end{cases} \quad \text{і} \quad \tilde{p}_i^b = \begin{cases} 1 - \prod_{j=1}^{\tilde{M}_i} (1 - \tilde{p}_i^j), & \bar{n}_i > 0; \\ 1, & \bar{n}_i = 0, \end{cases} \quad \text{при} \quad \sum_{i=1}^{\tilde{M}} \bar{n}_i = N \quad (69)$$

Для захисту елементів ТКМ необхідно забезпечити виконання наступних умов:

$$\sum_{i=1}^{\tilde{M}} n_i \bar{n}_i = 0, \quad (70) \quad n_i \bar{n}_i = 0. \quad (71)$$

При цьому умова (70) вводиться при захисті основного мультишляху в цілому, а умова (71) – при захисті конкретного i -го композитного або простого шляху.

Для того, щоб при використанні як основного, так і резервного мультишляху виконувалися вимоги щодо ймовірності компрометації повідомлення, яке за ними передається, вводиться за аналогією з (67) наступна умова:

$$P_{msg}^{Pr} \leq P_{msg}^b \leq \gamma_P. \quad (72)$$

Тоді в основу методу S-FRR покладено рішення оптимізаційної задачі нелінійного цілочисельного програмування з критерієм оптимальності

$$J = \sum_{i=1}^{\tilde{M}} \tilde{p}_i n_i + \sum_{i=1}^{\tilde{M}} \tilde{p}_i \bar{n}_i \quad (73)$$

і обмеженнями, представленими умовами (63), (64), (66), (68)-(72). При цьому обмеження (70)-(72) є нелінійними, а змінні, що розраховуються, n_i і \bar{n}_i носять цілочисельний характер. У критерії (73) значення \tilde{p}_i , розраховані відповідно до виразів (69), є вартісними ваговими коефіцієнтами. Цим забезпечується безпечна маршрутизація в мережі, коли максимальна кількість частин повідомлення буде передаватися за шляхом з мінімальною ймовірністю компрометації. Навпаки, за шляхом з найвищою ймовірністю компрометації передаватиметься мінімальна кількість частин повідомлення або не буде передано жодної.

Застосування методу S-FRR дозволяє в реальному часі забезпечувати задані значення ймовірності компрометації повідомлень, що передаються, навіть в умовах динамічної зміни стану мережі на підставі розрахунку й оперативного переходу на використання резервних композитних шляхів при багатошляховій передачі частин конфіденційного повідомлення.

У **п'ятому розділі** запропоновано рекомендації щодо практичного використання отриманих у роботі наукових результатів в сучасних та перспективних телекомунікаційних системах і мережах, які охоплюють множину варіантів реалізації моделей і методів QoS-маршрутизації та управління трафіком в архітектурах SDN-мереж різних типів – від класичної централізованої до гібридних, в тому числі ієрархічних та багаторівневих. Впровадження результатів дисертаційних досліджень підтверджено відповідними актами впровадження.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі вирішена **науково-прикладна проблема**, яка полягає в розвитку теорії управління трафіком з підтримкою якості обслуговування за множиною показників в умовах нестационарного режиму роботи телекомунікаційної мережі із забезпеченням її відмовостійкості та мережної безпеки. За результатами вирішення поставленої проблеми зроблено такі висновки:

1. До перспективних мережних рішень висувається ряд важливих концептуальних вимог: підтримка якості обслуговування одночасно за множиною різномірних QoS-показників особливо в умовах високої динаміки зміни стану мережі, викликаної нестационарним режимом роботи інтерфейсів маршрутизаторів, що найбільш актуально для мережних процесів реального масштабу часу; комплексне врахування вимог щодо відмовостійкості мережі з підтримкою на

алгоритмічно-програмному рівні існуючих і новітніх схем перемаршрутизації та захисту елементів мережі, їх пропускну здатності та рівня QoS в цілому як на рівні доступу, так і на рівні ядра мережі; підвищення рівня мережної безпеки в ході передачі різноманітних конфіденційних даних. Виконання наведених вимог пов'язано з необхідністю вдосконалення існуючих та розробкою нових моделей і методів, які б слугували подальшою теоретичною основою перспективних протоколів маршрутизації та засобів управління трафіком у ТКМ.

2. Вдосконалено систему тензорних моделей QoS-маршрутизації та управління трафіком, новизна яких полягає у введенні динамічних тензорних метрик, які отримані на підставі використання стаціонарної точкової апроксимації нестационарного потоку під час опису стану мережі системою нелінійних диференціальних рівнянь. Це дозволило врахувати зміну в часі структурних і функціональних параметрів телекомунікаційної мережі та характеристик потоків пакетів в ході тензорного моделювання процесів маршрутизації та управління трафіком та отримати динамічні умови забезпечення якості обслуговування за показниками швидкості передачі та середньої міжкінцевої затримки пакетів у нестационарному режимі роботи мережних інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ.

3. Набув подальшого розвитку дворівневий метод внутрішньодоменної ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації на основі резервування ресурсів. Новизна методу полягає в забезпеченні узгодженого розв'язання задач розподіленої маршрутизації «від джерела» та резервування каналного ресурсу на основі використання принципу цільової координації, а також у підтримці міжкінцевої якості обслуговування за показниками швидкості передачі та середньої міжкінцевої затримки пакетів завдяки використанню тензорної моделі ТКМ.

4. Вперше запропоновано динамічну модель багатошляхової маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником імовірності своєчасної доставки пакетів у телекомунікаційній мережі. Новизною представленого рішення є те, що розрахунок множини шуканих маршрутів та розподіл каналного ресурсу мережі відбувається на основі врахування нестационарного характеру роботи інтерфейсів маршрутизаторів мережі. Реалізація запропонованої моделі дозволила забезпечити однакові з моделлю Traffic Engineering значення ймовірності своєчасної доставки, але за більш жорстких (на 30-37%) QoS-вимог щодо середньої міжкінцевої затримки пакетів.

5. Набула подальшого розвитку система поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів телекомунікаційної мережі за шляхами, що не перетинаються або перетинаються лише за вузлами. Новизною рішень є введення в структуру моделей нелінійних умов використання шляхів заданого типу в процесі балансування навантаження. Як показали проведені дослідження в цілому запропоновані рішення дозволили забезпечити підви-

щення продуктивності мережі приблизно в 1,7 разів. При цьому зі зростанням розміру мережі та зв'язності вузлів вираш збільшувався до 2,5-4 разів.

6. Отримала подальший розвиток потокова модель швидкої перемаршрутизації. Новизна моделі полягає в лінійній формі умов захисту каналу та вузла під час реалізації багатошляхової маршрутизації; а також у введенні системи критеріїв оптимальності рішень зі встановленням ієрархії співвідношень вагових коефіцієнтів у відповідних цільових функціях. Це дозволило підвищити продуктивність ТКМ і масштабованість рішень щодо швидкої перемаршрутизації, а також знизити обчислювальну складність їх протокольної реалізації.

7. Вперше запропоновано дворівневий метод швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих мережах. Новизна методу полягає у введенні відповідно до принципу прогнозування взаємодій дворівневої ієрархії розрахунків маршрутних змінних, що відповідають за формування основних і резервних шляхів з реалізацією схем захисту каналу, вузла, шляху та їх пропускної здатності, а також у забезпеченні збалансованої завантаженості каналів зв'язку потоками, що протікають як за основними, так і за резервними маршрутами, що відповідає вимогам концепції Traffic Engineering.

8. Вперше запропоновано лінійну оптимізаційну модель багатошляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ТКМ. Новизною запропонованої моделі є те, що узгоджене рішення завдань щодо балансування навантаження і швидкої перемаршрутизації із захистом каналу, вузла та пропускної здатності забезпечується в ході розв'язання задачі лінійного програмування. Це дозволило знизити обчислювальну складність розрахунку основного та резервного шляхів і забезпечити збалансовану завантаженість каналів зв'язку відповідно до вимог концепції Traffic Engineering. Використання моделі дозволило знизити верхній поріг завантаженості каналів зв'язку в середньому від 37,12% до 59,41% при захисті каналу та від 31,5% до 56,3% при захисті вузла, що позитивно позначається і на рівні якості обслуговування в мережі в цілому.

9. Вдосконалено метод ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації, заснований на декомпозиційному представленні потокової моделі маршрутизації та використанні принципу цільової координації. Новизною методу є забезпечення захисту приграничних маршрутизаторів ядра мережі на підставі розрахунку основних та резервних міждоменних шляхів як при реалізації одношляхової, так і для багатошляхової маршрутизації, що дозволило підвищити масштабованість і відмовостійкість маршрутних рішень.

10. Вперше запропоновано систему поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації з захистом шлюзу за замовчуванням. Новизною рішень є, по-перше, реалізація функцій відмовостійкості шляхом введення додаткових керуючих змінних, відповідальних за вибір основного та резервного шлюзів за замовчу-

ванням з балансуванням навантаження між ними, по-друге, забезпечення погодженого розв'язання задач щодо захисту шлюзу за замовчуванням і швидкої перемаршрутизації в транспортній мережі, що дозволило підвищити рівень відмовостійкості телекомунікаційної мережі засобами маршрутизації.

11. Вперше запропоновано математичну модель відмовостійкої QoS-маршрутизації в мультисервісній ТКМ, новизною якої є те, що за її допомогою забезпечується реалізація схеми захисту рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів. Отримати подібне рішення вдалось на підставі тензорного опису процесу відмовостійкої маршрутизації, що дозволило отримати шукані умови захисту, а також сформулювати та розв'язати оптимізаційну задачу щодо розрахунку основних та резервних маршрутів, вздовж яких забезпечувався заданий рівень QoS.

12. Вперше запропоновано методи безпечної маршрутизації повідомлень за шляхами, які перетинаються. Новизна методу безпечної маршрутизації полягає в тому, що він, по-перше, допускає використання особливого класу шляхів, що перетинаються, по-друге, заснований на оптимізації процесу вибору множини композитних шляхів і балансування за ними частин повідомлення, що передається, із забезпеченням допустимих значень його ймовірності компрометації, а в-третє, в разі порушення вимог мережної безпеки, викликаного підвищенням ймовірності компрометації одного або множини композитних шляхів багатошляхова передача частин конфіденційного повідомлення буде здійснюватися вже за заздалегідь розрахованою множиною резервних шляхів. Як показав проведений аналіз, використання запропонованого методу в рамках поданих розрахункових прикладів дозволяє поліпшити ймовірність компрометації повідомлень, які передаються, в середньому від 5-10% до 25-50% з огляду на можливість використання композитних шляхів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Еременко А. С. Процесс повторных передач сегментов TCP по тайм-ауту согласно теории управления. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. №4/3 (52). С. 22–26.
2. Персиков А. В., Еременко А. С. Система оценивания эффективности применения криптографической защиты трафика NGN. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2011. №33. С. 101–108.
3. Еременко А. С. Исследование производительности потоковой передачи данных посредством протокола TCP. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2011. №34. С. 80–87.
4. Еременко А. С. Сравнительный анализ моделей производительности соединений TCP и их использование в объединенных сетях. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. №5/9 (53). С. 34–39.

5. Персиков А. В., Еременко А. С. Прототип улучшенного протокола обмена данными между системами обнаружения и противодействия атакам. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2011. №43. С. 91–101.
6. Еременко А. С., Персиков А. В., Солоп Н.В. Исследование методов адаптивной потоковой передачи мультимедийных данных с использованием ТСР/НТТР. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. №2/9 (62). С. 42–47.
7. Стерин В. Л., Еременко А. С., Тарики Н. Динамическая модель синтеза одноранговой виртуальной частной сети. *Проблеми телекомунікацій*. 2014. № 3 (15). С. 12–29. URL: http://pt.journal.kh.ua/2014/3/1/143_sterin_vpn.pdf.
8. Lemeshko O. V., Arous K. M., Yeremenko O. S. Fault-Tolerant Unicast, Multicast and Broadcast Routing Flow-based Models. *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*. 2015. Vol. 3, Issue 4A. P. 343–350.
9. Al-Dulaimi M.K.H., Al-Dulaimi A.M.K., Yeremenko O.S., Al-Janabi H.D. Bandwidth Management Model in LTE Downlink with Resource Allocation Type 1. *Системи обробки інформації: збірник наукових праць*. 2015. Вип. 5 (130). С. 111–116.
10. Гаркуша С. В., Гаркуша Е. В., Еременко А. С. Модель распределения подканалов в беспроводной Mesh-сети стандарта IEEE 802.16, представленной в виде гиперграфа. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2015. Вип. 2 (43). С. 32–38.
11. Стерин В. Л., Еременко А. С., Тарики Н. Исследование динамической модели структурно-функционального синтеза телекоммуникационной системы. *Научно-технический сборник «Радиотехника»*. 2015. № 180. С. 33–42.
12. Лемешко А. В., Еременко А. С. Усовершенствование модели безопасной маршрутизации сообщения с оптимальной балансировкой числа его фрагментов по непересекающимся маршрутам. *Захист інформації*. 2015. ТОМ 17, №2. С. 135-142. DOI: 10.18372/2410-7840.17.8776.
13. Yeremenko O. S., Ali S. A. Secure Multipath Routing Algorithm with Optimal Balancing Message Fragments in MANET. *Radioelectronics and Informatics*. 2015. № 1 (68). С. 26–29.
14. Еременко А. С. Потокковая модель многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в телекоммуникационной сети. *Проблеми телекомунікацій*. 2015. № 1 (16). С. 85–93. URL: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_yeremenko_disjoint.pdf.
15. Еременко О. С., Андрушко Д. В. Модель маршрутизації в телекомунікаційній мережі з використанням шляхів, що перетинаються за вузлами. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» серія: «Радіоелектроніка та телекомунікації»*. 2015. № 818. С. 181–188.

16. Еременко А. С., Лебеденко Т. М., Старкова Е. В. Анализ влияния состояния интерфейса на динамику загруженности очереди на маршрутизаторе телекоммуникационной сети. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2015. №3. С. 45–51.
17. Еременко А. С. Методика расчета вероятности компрометации сообщения при использовании пересекающихся маршрутов с последовательно-параллельной или комбинированной структурой. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2015. №6(40). С. 64–71.
18. Лемешко А. В., Еременко А. С., Тарики Н., Арус К. М. Повышение масштабируемости и производительности решений по отказоустойчивой маршрутизации в телекоммуникационных сетях. *Системи обробки інформації*. 2016. № 1(138). С. 152–156.
19. Лемешко А. В., Еременко А. С. Динамическое представление тензорной модели многопутевой QoS-маршрутизации в нестационарном режиме работы сетевых интерфейсов. *Проблеми телекомунікацій*. 2016. № 1 (18). С. 3–21. URL: http://pt.journal.kh.ua/2016/1/1/161_lemeshko_dynamic.pdf.
20. Yeremenko O. Development of the dynamic tensor model for traffic management in a telecommunication network with the support of different classes of service. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, Issue 9 (84). P. 12–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85602 (**SCOPUS**)
21. Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O. Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting. *Transport and Telecommunication Journal*. 2017. Vol. 18, Issue 2. P. 155–167. DOI: 10.1515/ttj-2017-0015 (**SCOPUS**)
22. Lemeshko O., Yeremenko O., Tariki N. Solution for the Default Gateway Protection within Fault-Tolerant Routing in an IP Network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*. 2017. Volume 8, Number 1. P. 19–26. (**SCOPUS**)
23. Lemeshko A. V., Yeremenko O. S., Tariki N. Improvement of flow-oriented fast reroute model based on scalable protection solutions for telecommunication network elements. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, Issue 6. P. 477–490. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i6.30 (**SCOPUS**)
24. Еременко А. С., Тарики Н., Евдокименко М. А. Оптимизационная модель отказоустойчивой маршрутизации с билинейными условиями защиты пути. *Радиоелектроніка і інформатика*. 2017. № 2 (77). С. 9–14.
25. Yeremenko O., Lemeshko O., Persikov A. Secure Routing in Reliable Networks: Proactive and Reactive Approach. *Advances in Intelligent Systems and Computing II, CSIT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2018. Vol. 689. P. 631–655. DOI: 10.1007/978-3-319-70581-1_44 (**SCOPUS**)

26. Lemeshko O., Yeremenko O. Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*. 2017. Vol. 68, Issue 6. P. 444–454. DOI: 10.1515/jee-2017-0079 (SCOPUS)

27. Лемешко О. В., Єременко О. С. Розробка та дослідження лінійної оптимізаційної моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017. № 4 (79). С. 18–25.

28. Єременко А. С. Двухуровневый метод иерархическо-координационной QoS-маршрутизации на основе резервирования ресурсов. *Радиотехника*. 2018. Вып. 192. С. 71–83.

29. Єременко О. С. Тензорна модель відмовостійкої маршрутизації з підтримкою якості обслуговування в мультисервісній телекомунікаційній мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. № 2 (21). С. 16–31. URL: http://pt.journal.kh.ua/2017/2/1/172_yeremenko_qosfrr.pdf.

30. Єременко О. С., Леbedenko Т. М., Каплун С. А., Костенко В. О. Імітаційна модель функціонування інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж, побудована з використанням пакета Simulink. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. № 2 (21). С. 61–72. URL: http://pt.journal.kh.ua/2017/2/1/172_yeremenko_simulink.pdf.

31. Lemeshko O. V., Garkusha S. V., Yeremenko O. S., Hailan A. M. Policy-based QoS Management Model for Multiservice Networks. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings*, Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147124.

32. Yeremenko O. S. Enhanced Flow-based Model of Multipath Routing with Overlapping by Nodes Paths. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the IEEE Second International Scientific-Practical Conference*, Kharkiv, Ukraine, 13–15 October, 2015. Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2015. P. 42–45. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357264.

33. Yeremenko O. S., Lebedenko T. M., Vavenko T. V., Semenyaka M. V. Investigation of Queue Utilization on Network Routers by the Use of Dynamic Models. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the IEEE Second International Scientific-Practical Conference*, Kharkiv, Ukraine, 13–15 October, 2015. Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2015. P. 46–49. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357265.

34. Lemeshko O., Yeremenko O. Dynamic presentation of tensor model for multipath QoS-routing. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proceedings of the 13th International Conference*, Lviv,

Ukraine, 23-26 February, 2016. IEEE, 2016. P. 601–604. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452128.

35. Yeremenko O., Tariki N., Hailan A. M. Fault-tolerant IP routing flow-based model. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 13th International Conference, Lviv, Ukraine, 23-26 February, 2016. IEEE, 2016. P. 655–657. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452143.

36. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Hailan A. M. Investigation of Multipath QoS-Routing Dynamic Tensor Model. *Electronics and Information Technology (EIT)*: Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 23-27 May, 2016. IEEE, 2016. P. 59–62. DOI: 10.1109/ICEAIT.2016.7500992.

37. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S. Dynamics Analysis of Multipath QoS-Routing Tensor Model with Support of Different Flows Classes. *Smart Systems and Technologies (SST)*: Proceedings of the International Conference, Osijek, Croatia, 12-14 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 225–230. DOI: 10.1109/SST.2016.7765664.

38. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Hailan A. M. QoS solution of traffic management based on the dynamic tensor model in the coordinate system of interpolator paths and internal node pairs. *Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*: Proceedings of the International Conference, Kiev, Ukraine, 11-16 Sept. 2016. IEEE, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739625.

39. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Tariki N., Hailan A. M. Fault-Tolerance Improvement for Core and Edge of IP Network. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*: Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, Ukraine, 6-10 Sept. 2016. IEEE, 2016. P. 161–164. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2016.7589895.

40. Yeremenko O., Tariki N., Vavenko T. Default Gateway Protection Scheme in Fault-Tolerant IP Routing. *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. 223–226. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905389.

41. Lemeshko O., Yeremenko O. Routing Tensor Model Presented in the Basis of Interpolator Paths and Internal Node Pairs. *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. 201–204. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905381.

42. Yeremenko O., Nevzorova O., Ali S. A. Two-level method of fault-tolerant inter-area routing. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronic (CADSM)*: Proceedings of the 14th International Conference, Lviv, Ukraine, 21–25 February, 2017. IEEE, 2017. P. 105–108. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916096.

43. Lemeshko O., Yeremenko O., Hailan A. M. Design of QoS-Routing Scheme under the Timely Delivery Constraint. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronic (CADSM)*: Proceedings of the 14th International Conference, Lviv, Ukraine, 21–25 February, 2017. IEEE, 2017. P. 97–99. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916094.
44. Yeremenko O. S., Lemeshko O. V., Tariki N. Fast ReRoute Scalable Solution with Protection Schemes of Network Elements. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*: Proceedings of the First Ukraine Conference, Kiev, Ukraine, 29 May – 2 June 2017. IEEE, 2017. P. 783–788. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100353.
45. Yeremenko O. S., Lemeshko O. V., Nevzorova O. S., Hailan A. M. Method of Hierarchical QoS Routing Based on the Network Resource Reservation. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*: Proceedings of the First Ukraine Conference, Kiev, Ukraine, 29 May – 2 June, 2017. IEEE, 2017. P. 971–976. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100393.
46. Yeremenko O., Lemeshko O., Tariki N., Hailan A. M. Research of Optimization model of Fault-Tolerant Routing with Bilinear Path Protection Criterion. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 4–7 July, 2017. IEEE, 2017. P. 219–222. DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020105.
47. 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. DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020114.
48. Radivilova T., Kirichenko L., Yeremenko O. Calculation of routing value in MPLS network according to traffic fractal properties. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 4–7 July, 2017. IEEE, 2017. P. 250–253. DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020112.
49. Yeremenko O., Lemeshko O., Persikov A. Enhanced Method of Calculating the Probability of Message Compromising Using Overlapping Routes in Communication Network. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*: Proceedings of the XIIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, Ukraine, 5–8 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 87–90. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2017.8098743.
50. Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O., Vavenko T. Three-level Method of Hierarchical Coordination Routing in Multi-Area Network. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*: Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 11-15 September, 2017. IEEE, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095410.

51. Lemeshko O., Yeremenko O., Hailan A. M. Two-level Method of Fast Re-Routing in Software-Defined Networks. *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. 376–379. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246420.

52. Lemeshko O., Yeremenko O. Linear Optimization Model of MPLS Traffic Engineering Fast ReRoute for Link, Node, and Bandwidth Protection. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 14th International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February, 2018*. IEEE, 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336365.

53. Lebedenko T., Yeremenko O., Harkusha S., Ali A.S. Dynamic Model of Queue Management based on Recourse Allocation in Telecommunication Networks. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 14th International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February, 2018*. IEEE, 2018. P. 1-4. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336371.

54. Спосіб безпечної маршрутизації секретного повідомлення з оптимальним балансуванням його фрагментів за шляхами, які не перетинаються: пат. 105743 Україна: МПК H04L 12/00, H04W 40/00, H04K 1/00 (2016.01) / Лемешко О.В., Єременко О.С.; власник патенту Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2015 06071; заявл. 18.06.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. №7. – 6 с. : іл.

АНОТАЦІЯ

Єременко О.С. Методи управління трафіком із забезпеченням відмовостійкості та мережної безпеки на основі використання динамічних тензорних моделей телекомунікаційних систем. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми, яка полягає в розвитку теорії управління трафіком з підтримкою якості обслуговування за множиною показників в умовах нестационарного режиму роботи телекомунікаційної мережі із забезпеченням її відмовостійкості та мережної безпеки. Вдосконалено та досліджено систему динамічних тензорних моделей QoS-маршрутизації та управління трафіком з формулюванням динамічних умов забезпечення якості обслуговування. Проведено розробку та дослідження моделей і методів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах. Розроблено методи безпечної маршрутизації та швидкої перемаршрутизації за шляхами, що перетинаються. Проведено оцінку ефективності та розробку нау-

ково-методичних рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації рішень в області забезпечення відмовостійкості та мережної безпеки при управлінні трафіком з підтримкою якості обслуговування в мультисервісних телекомунікаційних мережах.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, модель, метод, управління трафіком, маршрутизація, відмовостійкість, мережна безпека, потік, пропускна здатність, міжкінцева затримка, балансування, якість обслуговування.

ABSTRACT

Yeremenko O.S. Methods of traffic management with ensuring fault-tolerance and network security based on use of dynamic tensor models of telecommunication systems. – 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, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the relevant scientific problem, which consists in the development of the theory of traffic management with support of Quality of Service (QoS) for a set of parameters under the conditions of non-stationary mode of the telecommunication network (TCN) operation with ensuring its fault-tolerance and network security.

The analysis conducted in the dissertation showed that the key technological tools for ensuring the QoS, fault-tolerance, and network security in modern TCN are protocol means of routing and traffic management in general, to the efficiency level of which the increasingly stringent requirements regarding the computational complexity and scalability of the obtained network solutions are put forward.

The development and research of the system of dynamic tensor models of QoS-routing and traffic management and formulation of the conditions for ensuring the Quality of Service are carried out. The two-level method of intra-domain hierarchical coordination QoS-routing based on resource reservation with the support of end-to-end Quality of Service on the parameters of the transmission rate and the average end-to-end packet delay through the use of the tensor TCN model has been further developed. The dynamic model of multipath routing with the provision of Quality of Service has been proposed for the parameter of the probability of timely delivery of packets in TCN for the first time.

The system of the flow-based models of fault-tolerant routing has been further developed without reservation of elements of the telecommunication network using paths that do not intersect or overlap only by nodes. The flow-based model of fast rerouting with a linear form of conditions for the protection of the link and the node has been further developed. The two-level method of fast rerouting with load balanc-

ing in Software-defined Networks has been proposed for the first time. The linear optimization model for multipath fast rerouting with load balancing in a telecommunication network with link, node, and bandwidth protection has been proposed for the first time. The method of hierarchical coordination inter-area fast rerouting was improved based on the decomposition representation of the flow-based routing model and the use of the goal coordination principle in providing the protection of the backbone network border routers based on the calculation of the primary and backup inter-area paths or multipaths. The system of fault-tolerant routing models with default gateway protection has been proposed for the first time with the introduction of additional control variables responsible for selecting the primary and backup gateways with load balancing between them, and ensuring the agreed solution of the tasks of default gateway protection and fast rerouting in the transport network. The tensor model of fault-tolerant QoS routing in a multiservice telecommunication network has been proposed for the first time, which provides the implementation of a protection scheme for the level of Quality of Service on the parameters of bandwidth and average end-to-end packet delay.

Methods of secure routing and secure fast rerouting for the provision of a given level of network security in TCN, related to the class of proactive and reactive solutions, are proposed for the first time. The novelty of the secure routing method lies in the fact that it allows the use of overlapping paths, which form the basis of composite paths and contain network fragments with a serial and (or) parallel connection of communication links, and is based on the optimization of the process of selecting a set of composite paths and balancing the parts of the transmitted message on them with the provision of acceptable values of its compromise probability. The novelty of the method of secure fast rerouting is that under nonfulfillment of the requirements of network security, caused by increased probability of compromising of one or more composite paths included in the primary multipath, transmission of parts of the confidential message by multipath with the provision of specified values of the probability of its compromise will be implemented over a set of precomputed backup composite paths.

The evaluation of efficiency and development of scientific and methodological recommendations concerning the practical use of the solutions proposed in the dissertation in the field of providing fault-tolerance and network security in traffic management with support of Quality of Service in the traditional multiservice TCN and Software-defined Networks were conducted.

Keywords: telecommunication network, model, method, traffic management, routing, fault-tolerance, network security, flow, bandwidth, end-to-end delay, balancing, Quality of Service.

АННОТАЦИЯ

Еременко А.С. Методы управления трафиком с обеспечением отказоустойчивости и сетевой безопасности на основе использования динамических тензорных моделей телекоммуникационных систем. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научной проблемы, которая заключается в развитии теории управления трафиком с поддержкой качества обслуживания по множеству показателей в условиях нестационарного режима работы телекоммуникационной сети с обеспечением ее отказоустойчивости и сетевой безопасности. Усовершенствована и исследована система динамических тензорных моделей QoS-маршрутизации и управления трафиком с формулировкой динамических условий обеспечения качества обслуживания. Проведена разработка и исследование моделей и методов отказоустойчивой маршрутизации в телекоммуникационных сетях. Разработаны методы безопасной маршрутизации и быстрой перемаршрутизации по пересекающимся путям. Проведена оценка эффективности и разработка научно-методических рекомендаций по практическому использованию предложенных в диссертации решений в области обеспечения отказоустойчивости и сетевой безопасности при управлении трафиком с поддержкой качества обслуживания в мультисервисных ТКС.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, модель, метод, управление трафиком, маршрутизация, отказоустойчивость, сетевая безопасность, поток, пропускная способность, межконцевая задержка, балансировка, качество обслуживания.

Підп. до друку 29.08.18. Формат 60x84 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