

Вченому секретарю спеціалізованої  
вченої ради Д 64.052.09  
у Харківському національному  
університеті радіоелектроніки

61166, м. Харків, пр. Науки, 14

## ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Климаша Михайла Миколайовича на дисертаційну роботу Єременко Олександри Сергіївни «Методи управління трафіком із забезпеченням відмовостійкості та мережної безпеки на основі використання динамічних тензорних моделей телекомунікаційних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

### Актуальність теми дисертації

На сьогоднішній день інформаційно-комунікаційні технології є головним фактором розвитку економіки та конкурентоспроможності України та рушієм її інтеграції у світовий інформаційний простір. Важливу роль при цьому відіграє розгортання телекомунікаційних мереж (ТКМ), орієнтованих на впровадження концепції мереж майбутнього (Future Networks, FN). Крім того, на передній план виходить забезпечення не тільки гарантованої якості обслуговування для всіх видів сучасного мультимедійного трафіку користувачів, а й високих рівнів відмовостійкості та мережної безпеки.

Слід зазначити, що саме засоби маршрутизації та управління трафіком спроможні реалізувати зазначені аспекти функціонування ТКМ, а отже мають задовольняти вимогам щодо підтримуваного функціоналу, обчислювальної складності, масштабованості тощо. Незважаючи на постійне вдосконалення теоретичних та технологічних рішень в цій області до перспективних протоколів управління трафіком висувуються вимоги щодо підтримки якості обслуговування за множиною показників (швидкісних, часових, надійності), комплексного забезпечення відмовостійкості (відновлення, резервування), надання необхідного рівня мережної безпеки при передачі потоків даних в мережі та збалансованого використання ресурсів (канальних, буферних) ТКМ.

Таким чином, **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, що розв'язується в дисертаційній роботі, є актуальною.





## **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

Дисертація складається з п'яти розділів, в яких логічно, послідовно, з виснажливою повнотою та на високому науково-технічному рівні викладено сутність виконаних досліджень і отриманих наукових результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз теоретичних та технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування, відмовостійкості та мережної безпеки при управлінні трафіком в телекомунікаційних системах. Встановлено основні вимоги, що висувуються до телекомунікаційних систем і мереж: підтримка якості обслуговування одночасно за декількома QoS-показниками; комплексне врахування вимог щодо відмовостійкості мережі з підтримкою схем перемаршрутизації та захисту елементів мережі, їх пропускну здатності та рівня QoS на рівні доступу та ядра мережі; підвищення рівня мережної безпеки при передаванні конфіденційних даних. При цьому, крім вимог щодо якості обслуговування, забезпечення високого рівня відмовостійкості та мережної безпеки обумовлено постійні впливи на функціонування ТКМ деструктивних факторів, які призводять до зміни структурних і функціональних параметрів мережі. Зроблено висновок про те, що актуальним є вдосконалення існуючих та розроблення нових моделей і методів, які б слугували теоретичною основою перспективних протоколів маршрутизації та засобів управління трафіком у ТКМ.

У **другому розділі** розроблено систему динамічних тензорних моделей маршрутизації та управління трафіком в ТКМ з підтримкою якості обслуговування в телекомунікаційних мережах. Запропоновано систему критеріїв оптимальності розв'язків задач багатошляхової маршрутизації в ТКМ. Проведено дослідження запропонованих моделей в різних режимах роботи мережних інтерфейсів з аналізом динаміки процесу управління трафіком та числових значень основних показників якості обслуговування. Запропоновано та досліджено дворівневий метод внутрішньодоменної ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації на основі резервування ресурсів. Представлено динамічну модель багатошляхової маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником ймовірності своєчасної доставки пакетів в телекомунікаційній мережі. Проведено аналіз процесу багатошляхової маршрутизації, оптимізованого за показником імовірності своєчасної доставки. Досліджено адекватність динамічних тензорних моделей QoS-маршрутизації та управління трафіком в ТКМ засобами імітаційного моделювання, представленими пакетом MATLAB/Simulink.

У **третьому розділі** запропоновано систему теоретичних рішень щодо завдань відмовостійкої маршрутизації в ТКМ, представлених відповідними математичними моделями та методами. Рішення охоплюють випадки організації відмовостійкої маршрутизації – без та з резервуванням елементів ТКМ. У розділі представлено систему поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів телекомунікаційної мережі за шляхами, що перетинаються за вузлами. Досліджено ефективність запропонованих рішень. Запропоновано поточкові моделі швидкої перемаршрутизації в ТКМ з формалізацією умов забезпечення захисту вузла,



каналу, маршруту та пропускної здатності при реалізації одно та багатошляхової стратегії з балансуванням навантаження в ТКМ. Розроблено та досліджено метод ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ТКМ. Наведені рішення щодо відмовостійкої маршрутизації із захистом шлюзу за замовчуванням при використанні різних стратегій маршрутизації в ТКМ. Запропонована тензорна модель відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в мультисервісній телекомунікаційній мережі за показниками пропускної здатності та середньої затримки пакетів «з кінця в кінець».

У **четвертому розділі** запропоновано методи безпечної маршрутизації повідомлень за композитними шляхами, які перетинаються та для яких можливо забезпечити контроль ймовірності компрометації повідомлень. Рішення охоплюють принципи проактивного та реактивного підходів до забезпечення заданого рівня мережної безпеки за показником імовірності компрометації повідомлень. Методи безпечної маршрутизації використовують композитні шляхи, тобто особливий клас шляхів, що перетинаються, із балансуванням за ними частин повідомлення, що передається, та із забезпеченням допустимих значень імовірності його компрометації. Реактивне рішення представлено методом швидкої безпечної перемаршрутизації із забезпеченням захисту як композитного шляху в цілому, так і довільного шляху, що входить до композитного шляху на підставі розрахунку множини основних та резервних безпечних шляхів.

У **п'ятому розділі** запропоновано рекомендації щодо практичного використання отриманих у роботі наукових результатів у сучасних та перспективних ТКМ при реалізації моделей та методів QoS-маршрутизації та управління трафіком в програмно-конфігурованих мережах централізованої, гібридної, ієрархічної та багаторівневої архітектур.

Висновки дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень. Список використаних джерел та посилань на них у тексті дисертації свідчить про те, що під час роботи було проаналізовано всі сучасні результати наукових досліджень провідних вчених світу. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи достатньо висвітлені в публікаціях у наукових фахових виданнях та апробовані на міжнародних і науково-технічних конференціях.

### **Наукова новизна та практична значущість результатів, отриманих в дисертаційній роботі**

Проведені дослідження забезпечили розв'язання поставленої науково-прикладної проблеми, при цьому були отримані такі нові наукові результати:

– вдосконалено систему динамічних тензорних моделей QoS-маршрутизації та управління трафіком, представлених у системах координат контурів і вузлових пар, а також міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар за підтримкою наскрізної якості обслуговування за показниками швидкості передавання та середньої міжкінцевої затримки пакетів;



– набув подальшого розвитку дворівневий метод внутрішньодоменної ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації на основі резервування ресурсів за підтримкою міжкінцевої якості обслуговування за показниками швидкості передавання та середньої міжкінцевої затримки пакетів завдяки використанню тензорної моделі ТКМ;

– вперше запропоновано динамічну модель багатошляхової маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником імовірності своєчасної доставки пакетів у телекомунікаційній мережі;

– набула подальшого розвитку система поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів телекомунікаційної мережі за шляхами, що не перетинаються або перетинаються лише за вузлами;

– набула подальшого розвитку потокова модель швидкої перемаршрутизації з лінійною формою умов захисту каналу та вузла при реалізації багатошляхової маршрутизації та введенні системи критеріїв оптимальності рішень щодо відмовостійкої маршрутизації зі встановленням ієрархії співвідношень вагових коефіцієнтів у відповідних цільових функціях;

– вперше запропоновано дворівневий метод швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих мережах;

– вперше запропоновано лінійну оптимізаційну модель багатошляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційній мережі з захистом каналу, вузла та пропускної здатності;

– вдосконалено метод ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації, заснований на декомпозиційному представленні потокової моделі маршрутизації та використанні принципу цільової координації;

– вперше запропоновано систему поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації з захистом шлюзу за замовчуванням;

– вперше запропоновано математичну модель відмовостійкої QoS-маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі з реалізацією схеми захисту рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів;

– вперше запропоновано методи безпечної маршрутизації повідомлень за шляхами, які перетинаються, що належать до класу проактивних і реактивних рішень щодо забезпечення заданого рівня мережної безпеки.

### **Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами**

Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт:

1. «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах», ДР №0115U002432 (Харківський національний університет радіоелектроніки, 2017 рік). У цій роботі автором запропоновано динамічну тензорну модель багатошляхової QoS-маршрутизації при нестационарному



режимі роботи мережних інтерфейсів та рекомендації щодо підвищення масштабованості та продуктивності рішень відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах.

2. «НИТКА-3», ДР №0116U000066 (Харківський національний університет радіоелектроніки, 2017 рік), де автором запропоновано дворівневий метод швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих мережах при введенні, відповідно до принципу прогнозування взаємодій дворівневої ієрархії, розрахунків маршрутних змінних, які відповідають за формування основних і резервних шляхів з реалізацією схем захисту каналу, вузла, шляху та їх пропускної здатності, та забезпеченні збалансованої завантаженості каналів зв'язку мережі потоками, що протікають як за основними, так і за резервними маршрутами, що відповідає вимогам концепції Traffic Engineering; а також методи безпечної маршрутизації повідомлень за шляхами, які перетинаються, що відносяться до класу проактивних і реактивних рішень щодо забезпечення заданого рівня інформаційної безпеки.

### **Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій**

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій, викладених у дисертаційній роботі Єременко О.С., забезпечується 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. Адекватність отриманих рішень та оцінка їх ефективності підтверджені результатами моделювання, а саме допустимою збіжністю результатів аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання.

### **Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі**

Отримані в дисертаційній роботі Єременко О.С. наукові результати 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. Важливість для практики результатів дисертаційної роботи підтверджена актами їх впровадження, наведеними в додатку до дисертаційної роботи. Наукові та практичні результати виконаних дисертантом досліджень використано в навчальному процесі, а саме у лекційному курсі та практичних заняттях з дисципліни «Управління та маршрутизація в ТКС» при підготовці студентів спеціальності «Телекомунікації», які проводяться для студентів Харківського національного університету радіоелектроніки.



## **Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях**

Проведений аналіз показав, що здобувач має необхідний обсяг наукових публікацій та апробацій. Результати дисертаційної роботи викладені в 91 науковій праці, серед них 30 наукових статей у фахових виданнях, серед яких 24 статті у наукових фахових виданнях України та 6 статей у закордонних журналах. Шість статей індексуються наукометричною базою Scopus, вісім статей виконано без співавторства. Дисертант доповідала на 60-ти міжнародних та всеукраїнських конференціях, причому 23 доповіді були представлені на конференціях, які проходили під егідою IEEE та індексуються в наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library.

## **Зауваження щодо дисертації та недоліки**

1. Дисертант в ході дослідження демонстрував особливості рішень щодо управління трафіком та маршрутизації в телекомунікаційних мережах, які використовують симплексні канали зв'язку. Можливість використання дуплексних каналів, скоріш за все, потребує проведення додаткових досліджень.

2. Як показано, наприклад, на рис. 2.20 та 2.22, міжкінцева затримка пакетів має нестаціонарний характер, на який впливають, як встановлено в ході досліджень, завантаженість мережі та QoS-вимоги. Варто допустити, що на цей процес також впливає топологія мережі, число та характеристики маршрутів, проте результати дослідження були продемонстровані на обмеженій множині мережних структур.

3. В другому розділі роботи наведено результати порівняльного аналізу (рис. 2.32) за ймовірністю своєчасної доставки пакетів згідно запропонованої динамічної моделі маршрутизації лише із однією моделлю, що відповідає принципам Traffic Engineering. Доцільно було би порівняти отримані результати також із рішеннями, які, зокрема, відповідають існуючим протокольним рішенням, що засновані на маршрутних метриках.

4. У роботі не вказано, як необхідно реагувати протоколам відмовостійкої маршрутизації при відмовах елементів резервних маршрутів.

5. У дисертації не запропоновано алгоритму розрахунку композитних шляхів у мережі, які в подальшому можливо використовувати в процесах безпечної маршрутизації.

## **Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення**

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення в цілому відповідає встановленим вимогам МОН України. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертаційної роботи, висвітлює всі отримані результати, сформульовані висновки та запропоновані рекомендації.

### Загальні висновки:

1) У докторській дисертаційній роботі Єременко О.С. на тему: «Методи управління трафіком із забезпеченням відмовостійкості та мережної безпеки на основі використання динамічних тензорних моделей телекомунікаційних систем» розв'язано актуальну науково-прикладну проблему 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.

2) Дисертаційна робота за своїм науковим змістом та стилем оформлення цілком відповідає вимогам чинного «Порядку присудження наукових ступенів», а також положенням паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Зміст автореферату відповідає положенням дисертаційної роботи.

3) Дисертаційна робота належним чином опублікована та апробована.

4) Положення, що наведені у дисертації за науковою новизною, практичним значенням, значущістю одержаних результатів і рекомендацій для подальшого розвитку галузі телекомунікацій у сукупності відповідають рівню докторських дисертаційних робіт у галузі технічних наук.

5) Таким чином, вважаю за можливе зробити висновок, що здобувач Єременко Олександра Сергіївна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри телекомунікацій  
Національного університету  
«Львівська політехніка»



М.М. Климаш

Підпис професора Климаша М.М. засвідчую,

Вчений секретар  
Національного університету  
«Львівська політехніка»



Р.Б. Брилинський