

Вченому секретарю спеціалізованої  
вченої ради Д 64.052.09  
у Харківському національному  
університеті радіоелектроніки  
Єременко О.С.  
61166, Харків, пр. Науки, 14

## ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента Одарченка Романа Сергійовича  
на дисертаційну роботу Євдокименко Марини Олександрівни «Теоретичні  
основи відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка  
в телекомунікаційних мережах з використанням тензорних моделей і  
методів», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі  
спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

### **Актуальність теми дисертації**

На сьогоднішній день розвиток інфокомунікаційних технологій є одним з головних факторів цифровізації економіки України, а також її залучення до глобального інформаційного суспільства. Важливу роль при цьому, особливо в умовах світової пандемії, відіграє розгортання сучасних відмовостійких мереж, які здатні не тільки функціонувати під час відмови того чи іншого мережного елемента (сегмента), але й забезпечувати якість обслуговування для всіх видів сучасного мультимедійного трафіку. Нажаль існуючі протоколи відмовостійкої маршрутизації не підтримують одночасного забезпечення відмовостійкості та заданого рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах та потребують вдосконалення за рахунок перегляду математичних моделей та методів, покладених в їх основу. Таким чином виникає актуальна **науково-прикладна проблема**, яка полягає в розробленні моделей та методів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах із забезпеченням якості обслуговування за показниками мережної продуктивності та якості сприйняття.

### **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

Дисертація складається з шести розділів, в яких логічно, послідовно, з вичерпною 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 відмовостійкості в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах. Проаналізовано існуючі підходи щодо забезпечення QoS та QoE в сучасних телекомунікаційних системах і мережах



та перспективи розвитку методів відмовостійкої маршрутизації в напрямку реалізації схем захисту рівня якості обслуговування в ТКМ. Ґрунтуючись на результатах проведеного аналізу проведено класифікацію перспективних схем захисту рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах. Сформульовано перелік ключових вимог, що висуваються в області відмовостійкої маршрутизації для програмно-конфігурованих мереж: підтримка якості обслуговування одночасно за множиною QoS та QoE показників в залежності характеру сучасного мережного трафіку; реалізація схем захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності та якості сприйняття; забезпечення оптимальності та масштабованості маршрутних рішень із підтримкою якості обслуговування за рахунок реалізації ієрархічно-координаційних стратегій маршрутизації в телекомунікаційних мережах. Автором було правильно зроблено висновок про те, що актуальним є вдосконалення існуючих та розробка нових тензорних моделей і методів, які б згодом було покладено у перспективні протоколи маршрутизації та швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційних мережах.

У другому розділі проаналізовано та вдосконалено тензорні моделі в телекомунікаційних мережах для забезпечення якості обслуговування за множиною показників. Наведено принципи введення геометричного простору та систем координат на структурі телекомунікаційної мережі із врахуванням особливостей тензорного опису ТКМ та прикладами метризації. Формалізовано умови забезпечення якості обслуговування під час використання тензорної моделі мережі, представлені в базисі контурів та вузлових пар, та мережі, яка представлена в базисі міжполосних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Запропоновано систему введених критеріїв оптимальності розв'язання задач маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування. Проведено дослідження та порівняльний аналіз рішень задач маршрутизації з підтримкою якості обслуговування для декількох структур телекомунікаційних мереж за допомогою пакету імітаційного моделювання MATLAB.

У третьому розділі запропоновано математичні моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності. Розроблено та досліджено потокову модель швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за двома показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів. Розроблено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за трьома показниками мережної продуктивності, такими як пропускна здатність, ймовірність втрат пакетів та середня міжкінцева затримка. Проведено дослідження зазначеної системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності на різних фрагментах ТКМ.

У четвертому розділі запропоновано тензорні моделі та методи швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування, що



сприймається кінцевим користувачем. Розроблено та досліджено тензорні моделі QoE-маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора в ТКМ, представлених в базисі контурів та вузлових пар та в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Розроблено та досліджено тензорні моделі QoE-маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником мультимедійної якості в мережах, представлених в базисі контурів та вузлових пар та в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар.

У **п'ятому розділі** запропоновано моделі та методи ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування, а саме декомпозиційна модель міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів; метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування; а також методи ієрархічно-координаційної міждоменної та відмовостійкої маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. Використання розроблених в п'ятому розділі моделей та методів було досліджено для ряду фрагментів телекомунікаційних мереж.

У **шостому розділі** проведено експериментальне дослідження запропонованих маршрутних рішень та розробку науково-методичних рекомендацій щодо їх практичної реалізації. За допомогою середовища моделювання Network Simulator 3 було досліджено тензорні моделі маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показниками мережної продуктивності в телекомунікаційних мережах, представлених в базисі контурів та вузлових пар та в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. За допомогою мережевого симулятора IxChariot досліджено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем. Приведено рекомендації щодо практичного використання запропонованих моделей і методів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах.

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 результатів, отриманих в дисертаційній роботі

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

- Проведено удосконалення тензорної моделі ТКМ, яку представлено в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. В рамках запропонованого рішення дисертантом було отримано умови забезпечення якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів. Дані умови є справедливими для різних режимів завантаженості мережі та не потребують задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ. Вдосконалена тензорна модель дозволяє підвищити рівень якості обслуговування та забезпечити адаптивний характер використання каналів та шляхів ТКМ під час реалізації одношляхової та багатошляхової маршрутизації.
- Вперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів уздовж основного та резервного шляхів у телекомунікаційній мережі;
- Вдосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів уздовж основного та резервного шляхів у телекомунікаційній мережі. Новизна запропонованих моделей полягає у формалізації умов забезпечення захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності не тільки під час реалізації схем захисту каналів та вузлів, але й для захисту маршруту (маршрутів) мережі;
- Вперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням захисту рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показниками R-фактора та мультимедійної якості, в умовах реалізації схем захисту каналів, вузлів та маршруту (маршрутів). Використання розроблених рішень дозволяє забезпечити заданий рівень якості сприйняття шляхом контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів уздовж основного та резервного шляху ТКМ.
- Вдосконалено декомпозиційну модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, яка складається з множини послідовно з'єднаних доменів.
- Вдосконалено методи ієрархічно-координаційної маршрутизації та відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних ТКМ.



## **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, 2015–2016). У цій роботі автором досліджено ієрархічно-координаційний метод міждоменної маршрутизації, проаналізовано математичні моделі відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах та надано рекомендації щодо підвищення якості обслуговування в телекомунікаційних мережах.

2. «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління», ДР № 0111U002627 (Харківський національний університет радіоелектроніки, 2011–2012), де автором досліджено тензорну модель управління трафіком у безпроводових телекомунікаційних системах із підтримкою якості обслуговування за множиною таких показників, як пропускна здатність, ймовірність втрат пакетів та середня міжкінцева затримка, а також обґрунтовано тензорну формалізацію умов забезпечення якості обслуговування одночасно за множиною різнорідних показників.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій, викладених у дисертаційній роботі Євдокименко М. О., 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 результатів дослідження. Адекватність отриманих рішень та оцінка їх ефективності підтверджені результатами моделювання та допустимою збіжністю результатів аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання.

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

Отримані в дисертаційній роботі Євдокименко М. О. наукові результати можуть стати основою математичного та алгоритмічного забезпечення перспективних протоколів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних та програмно-конфігурованих мережах. Важливість для практики результатів дисертаційної роботи підтверджена актами їх впровадження, наведеними в додатку А до дисертаційної роботи. Наукові та практичні результати виконаних дисертантом досліджень використано в навчальному процесі, а саме у лекційному курсі та практичних заняттях з дисципліни «Маршрутизація в ТКС», «Алгоритми управління та адаптації в ТКС» і «Telecommunication transmission systems» 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 65 наукових працях, серед них 28 наукових статей у фахових виданнях, серед яких 14 статей у наукових фахових виданнях України та 14 статей у закордонних журналах. Тринадцять статей індексуються наукометричною базою Scopus, три статті виконані без співавторства. Дисертант доповідався на 37-ти міжнародних та всеукраїнських конференціях, з яких 25 доповідей були представлені на конференціях, які проходили під егідою IEEE та індексуються в наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library.

### **Зауваження та недоліки до дисертації**

1. У роботі не приділено достатньої уваги аналізу такого важливого для мультимедійних потоків показника мережної продуктивності, яким є джитер (варіація затримки) пакетів. У запропонованих автором рішеннях покращення джитеру здійснюються лише опосередкованим чином. Також відсутні моделі, які б описували вплив джитеру на QoE (Quality of Experience), що знову ж таки не дає змоги врахувати наявність джитеру під час забезпечення відмовостійкої маршрутизації із забезпеченням необхідного рівня QoE.

2. У четвертому розділі дисертаційного дослідження за допомогою математичної моделі (формули (4.29)-(4.45)) відбувається оцінки рівня мультимедійної якості при використанні вузькосмугового сигналу. Проте, не вказано, як зміниться дана модель та необхідні умови для забезпечення якості обслуговування у разі застосування широкосмугових сигналів, рекомендації для яких наведені, наприклад, в стандарті ITU-T G.1070.

3. Запропонований в п'ятому розділі даної роботи метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування дозволяє відмовитись від централізації управління мережею, а також розподілити управління між SDN-контролерами доменів. Проте, як було показано автором, ефективність запропонованого методу з точки зору оптимальності та оперативності одержуваних рішень багато в чому залежить від швидкості збіжності координаційної процедури. При цьому, з тексту дисертації та відповідно автореферату залишається незрозумілим, що необхідно змінити для ефективного вирішення поставленої задачі у тому випадку, коли час збіжності даних координаційних процедур (5.18), (5.19) або (5.24), (5.25) перевищить таймер перерахунку маршрутних таблиць.

4. Для моделювання та дослідження роботи інтерфейсів маршрутизаторів було використано модель системи масового



обслуговування М/М/1/Н/. Безперечно її можна використовувати для досліджуваних процесів, проте, слід відзначити, що для опису потоків пакетів та дисциплін їх обслуговування може бути використано ряд інших сучасних моделей. Тому було б доцільно також навести порівняльну характеристику оцінок ефективності маршрутизації, проведених для цих різних моделей роботи інтерфейсів.

5. Автором роботи було відзначено, що перспективними є програмно-конфігуровані мережі SDN, для яких можуть бути використані запропоновані в роботі рішення. При цьому, основна увага у роботі приділена виключно реакції мережі на відмови комутаційного обладнання, а задачі, пов'язані з аналізом відмов контролерів SDN (серверів маршрутів), у розділах зовсім не розглядались. Тому доцільніше було би також включити дослідження пов'язані із оцінкою імовірності відмов контролерів та підвищення їх надійності.

### 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.

### Загальний висновок:

1) У дисертаційній роботі Євдокименко М. О. розв'язано актуальну науково-прикладну проблему розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіка в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками QoS.

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

3) Здобувач Євдокименко Марина Олександрівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем  
Національного авіаційного університету,  
доктор технічних наук, доцент

Одарченко Р.С.

Проректор з  
навчальної роботи



Особистий підпис тр.

ЗАСВІДЧУЮ

Начальник відділу кадрів

Національного авіаційного університету