

## ВИСНОВКИ

1. Під час проведених досліджень встановлено, що окрім вимог до якості обслуговування, які вже стали класичними функціями сучасних ІКМ, на перший план також виходить функціонал щодо забезпечення високого рівня відмовостійкості, масштабованості та мережної безпеки, що особливо важливо у функціонуванні ІКМ в умовах постійних деструктивних (випадкових та антагоністичних) впливів, які призводять до суттєвої зміни як структурних, так і функціональних параметрів і властивостей мережі: її топології, пропускну здатності, керованості, стійкості тощо.

2. Незважаючи на високий науковий та прикладний рівень досягнутих у сфері управління трафіком в ІКМ результатів, до перспективних мережних рішень усе ж висунуто низку важливих концептуальних засад:

- комплексне врахування вимог щодо відмовостійкості мережі з підтримкою на алгоритмічно-програмному рівні наявних і новітніх схем перемаршрутизації та захисту елементів мережі, їх пропускну здатності та рівня QoS загалом як на рівні доступу (Fault-Tolerant Routing), так і на рівні ядра мережі (Fast ReRouting);

- підвищення рівня мережної безпеки під час 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, оснований зокрема на реалізації ієрархічних стратегій маршрутизації та управління трафіком в ІКМ загалом.

Виконання наведених вимог пов'язано з необхідністю вдосконалення наявних та розроблення нових моделей та методів, які б слугували подальшою теоретичною основою перспективних протоколів маршрутизації та технологічних засобів управління трафіком в ІКМ.

3. Подальшого розвитку набула система поточних моделей відмовостійкої маршрутизації без резервування елементів інфокомунікаційної мережі шляхами, що не перетинаються або перетинаються лише у вузлах. Новизною рішень є введення до структури моделей нелінійних умов використання шляхів заданого типу в процесі балансування навантаження. Як показали проведені дослідження, загалом запропоновані рішення

дозволили забезпечити підвищення продуктивності мережі приблизно в 1,7 разів. У цьому випадку зі зростанням розміру мережі та зв'язності маршрутизаторів вираш за продуктивністю збільшувався до 2,5–4 разів.

4. Отримала подальший розвиток потокова модель швидкої перемаршрутизації. Новизна моделі полягає, по-перше, у лінійній формі умов захисту каналу та вузла під час реалізації багатошляхової маршрутизації; по-друге, у введенні системи критеріїв оптимальності рішень щодо відмовостійкої маршрутизації з установленням ієрархії співвідношень вагових коефіцієнтів у відповідних цільових функціях. Це дозволило підвищити продуктивність ІКМ і масштабованість рішень щодо швидкої перемаршрутизації, а також знизити обчислювальну складність їх протокольної реалізації.

5. Уперше запропоновано дворівневий метод швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих мережах. Новизна методу полягає, по-перше, у введенні за принципом 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 по-друге, у забезпеченні збалансованої завантаженості каналів зв'язку мережі потоками, які протікають як основними, так і резервними маршрутами, що відповідає вимогам концепції Traffic Engineering.

6. Уперше представлено лінійну оптимізаційну модель багатошляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в ІКМ із 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 у розв'язанні 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 мережі за вимогами концепції Traffic Engineering. У роботі показано, що вираш від реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації за умови TE FRR дозволив знизити верхній поріг завантаженості каналів зв'язку в середньому від 37,12% до 59,41% у разі захисту каналу та від 31,5% до 56,3% у випадку захисту вузла, що позитивно позначається і на рівні якості обслуговування в мережі загалом.

7. Уперше запропоновано систему поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації із захистом шлюзу за замовчуванням. Новизною рішень є,

по-перше, реалізація функцій відмовостійкості шляхом уведення 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 ІКМ засобами маршрутизації.

8. Уперше представлено методи безпечної маршрутизації повідомлень 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, які перетинаються і становлять основу композитних шляхів, а також містять мережні фрагменти з послідовним та (або) паралельним з'єднанням каналів зв'язку мережі, а по-друге, оснований на оптимізації процесу вибору множини композитних шляхів і балансування ними частин повідомлення, що передається, із забезпеченням допустимих значень його ймовірності компрометації. Як показав проведений аналіз, використання запропонованого методу в межах поданих розрахункових прикладів дозволяє поліпшити ймовірність компрометації повідомлень, які передаються, у середньому від 5–10% до 25–50% з огляду на можливість використання композитних шляхів, які є підкласом шляхів, що перетинаються.

9. З'ясовано, що новизна методу безпечної швидкої перемаршрутизації полягає в тому, що в разі порушення вимог мережної безпеки, викликаного підвищенням ймовірності компрометації одного або множини композитних шляхів, які містять основний мультишлях, багатопляхова 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 загалом, або одного чи декількох заданих композитних шляхів, що розміщені в цьому основному мультишляху.

10. Під час проведеного в роботі аналізу встановлено, що дієвим засобом підвищення якості обслуговування та масштабованості ІКМ є використання ієрархічної маршрутизації, яка на сьогодні представлена множиною протокольних рішень. Проте наявні протоколи ієрархічної маршрутизації оснований лише на структурній ієрархії мережі та на досить простих комбінаторних алгоритмах пошуку найкоротшого шляху на графі, за допомогою якого описується структура ІКМ. Це значно знижує ефективність функціонування

ІКМ і передбачає перегляд і вдосконалення наявних моделей і методів ієрархічної маршрутизації, на яких оснований відомі протокольні рішення.

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

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

13. Уперше запропоновано трирівневий метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в інфокомунікаційній мережі SDN/MPLS. Новизна методу полягає у введенні трирівневої ієрархії розрахунку маршрутних змінних з послідовною координацією отриманих рішень: нульовий та перший рівні відповідали за організацію та координацію внутрішньодоменної маршрутизації,

а задача другого рівня – реалізація та координація міждоменної взаємодії. Це дозволило підвищити масштабованість рішень задачі міждоменної маршрутизації в мережі SDN/MPLS.

14. Удосконалено метод ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації, оснований 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 у процесі реалізації одношляхової, так і багатшляхової маршрутизації, що дозволило підвищити масштабованість і відмовостійкість маршрутних рішень.

Наукове видання

**ЛЕМЕШКО** Олександр Віталійович  
**ЄРЕМЕНКО** Олександра Сергіївна  
**НЕВЗОРОВА** Олена Сергіївна

**ПОТОКОВІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ  
В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ:  
ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ, БЕЗПЕКА, МАСШТАБОВАНІСТЬ**

**Монографія**

Відповідальний випусковий О.В. Лемешко  
Редактор Л.В. Кузьміна  
Комп'ютерна верстка Л.Ю. Светайло

Підп. до друку 14.02.20. Формат 60x84 1/16. Умов. друк. арк. 18,1.  
Тираж 100 прим. Ціна договірна.

Віддруковано в типографії ФОП Андреев К.В.  
61157, Харків, вул. Богомольця, 9, кв. 50.  
Свідоцтво про державну реєстрацію №24800170000045020 від 30.05.2003 р.  
er.zakaz@gmail.com; тел. 063-993-62-73



**ЛЕМЕШКО Олександр Віталійович** – завідувач кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки, доктор технічних наук, професор.  
Член IEEE, ACM.  
Має понад 300 публікацій.  
Напрями наукової діяльності: управління трафіком, оптимізація та якість обслуговування в інфокомунікаціях, безпроводові мережі, ієрархічна та відмовостійка маршрутизація, мережна безпека.

*oleksandr.lemeshko@nure.ua*



**ЄРЕМЕНКО Олександра Сергіївна** – професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки, доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник.  
Член IEEE (Senior Member), ACM.  
Має понад 160 публікацій.  
Напрями наукової діяльності: управління трафіком в інфокомунікаційних мережах, якість обслуговування, відмовостійка та безпечна маршрутизація.

*oleksandra.yeremenko@nure.ua*



**НЕВЗОРОВА Олена Сергіївна** – асистент кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки, кандидат технічних наук.  
Член IEEE.  
Має понад 40 публікацій.  
Напрями наукової діяльності: оптимізація ієрархічних систем, маршрутизація, якість обслуговування.

*olena.nevzorova@nure.ua*

