

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента Бешлея Миколи Івановича
на дисертаційну роботу Ель Хаж Слейман Батул Гаді
«Оптимізаційні моделі відмовостійкої та безпечної маршрутизації в
телекомунікаційній мережі шляхами, що не перетинаються»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка,
галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Актуальність теми дисертації

Актуальність проведеного у дисертаційній роботі дослідження обґрунтовано тим, що на теперішній час забезпечення відмовостійкості та безпеки у телекомунікаційних мережах (ТКМ) є одним з найважливіших завдань. Це пояснюється зростаючою гетерогенністю, збільшенням складності та масштабів мережної інфраструктури, постійним зростанням кількості кібератак та вторгнень, стрімким збільшенням обсягів трафіку за рахунок величезного попиту на інтернет-ресурси, безперервним підвищенням вимог до якості обслуговування, а часом і використанням застарілого обладнання без відповідного оновлення програмного забезпечення тощо. У зв'язку з цим до телекомунікаційних мереж постійно зростають вимоги щодо забезпечення заданого рівня відмовостійкості та мережної безпеки. Таким чином, відповідно до вимог сьогодення, виникає актуальна **науково-прикладна задача**, що полягає в оптимізації процесів відмовостійкої та безпечної маршрутизації за шляхами, які не перетинаються, в телекомунікаційних мережах шляхом розробки, вдосконалення та дослідження відповідних математичних моделей.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертація складається з п'яти розділів, в яких досить повно та на високому науково-технічному рівні викладено отримані наукові результати. Структура дисертаційної роботи логічна та послідовна. Актуальність дисертації добре обґрунтована та повністю відповідає проблематиці сучасного стану досліджень в області забезпечення відмовостійкості та мережної безпеки в телекомунікаційних мережах.

У **першому розділі** здобувачкою представлено основні тенденції розвитку телекомунікаційних мереж, здійснено огляд перспективних рішень

у сфері відмовостійкої, безпечної та QoS маршрутизації в телекомунікаційних мережах із подальшим аналізом методів та механізмів відмовостійкої та безпечної маршрутизації в телекомунікаційних мережах, а також засобів маршрутизації, яка забезпечує розрахунок шляхів, що не перетинаються. У першому розділі також сформовано цілі та задачі дисертаційного дослідження. Показано, що важливим напрямком вдосконалення моделей та методів маршрутизації є використання шляхів, які не перетинаються, що дозволяє ввести, а в подальшому ефективно та оптимально використати надлишковість мережного ресурсу для системного підвищення рівня QoS, відмовостійкості та мережної безпеки.

У **другому розділі** розроблено систему математичних моделей маршрутизації, які забезпечують розрахунок шляхів, що не перетинаються, із забезпеченням покращення рівня якості обслуговування. У межах запропонованих математичних моделей задачі розрахунку шляхів, що не перетинаються, подані в оптимізаційній формі. Для розв'язання сформульованих у розділі оптимізаційних задач використовувались методи цілочисельного та змішаного цілочисельного лінійного програмування, які закладені в Optimization Toolbox середовища MATLAB.

У **третьому розділі** система математичних моделей маршрутизації, які забезпечують розрахунок шляхів, що не перетинаються, із забезпеченням покращення рівня якості обслуговування, що запропоновані у розділі 2, отримують свій подальший розвиток з метою організації безпечної QoS-маршрутизації за шляхами, які не перетинаються. Їхній розвиток здійснено у напрямку підвищення як рівня якості обслуговування, так і мережної безпеки. У межах запропонованих математичних моделей задачі розрахунку шляхів, що не перетинаються, представлені в оптимізаційній формі. Залежно від форми обраного критерію оптимальності та введеної системи обмежень на маршрутні змінні у результаті розрахунків визначалась множина шляхів із максимальною або наперед заданою кількістю, використання якої орієнтоване на покращення показників ефективності ТКМ: пропускної здатності та ймовірності компрометації пакетів (повідомлень).

Рішення щодо організації безпечної маршрутизації конфіденційних даних у ТКМ ґрунтуються на врахуванні таких важливих показників мережної безпеки, як ймовірність компрометації каналу, маршруту та шляхів, що не перетинаються. Ускладнення математичних моделей безпечної маршрутизації, пов'язане з сумісним описом процесів забезпечення якості обслуговування та мережної безпеки, не призвело до втрати лінійного характеру виразів, які до них входили. Це у кінцевому випадку традиційно

позитивно впливало на обчислювальну складність кінцевих алгоритмічно-програмних та протокольних рішень.

У **четвертому розділі** запропоновано вдосконалення базової математичної моделі, що представлена в другому розділі, під розв'язання задач відмовостійкої маршрутизації, а саме швидкої перемаршрутизації, коли одночасно з визначенням основного маршруту обчислюється й множина резервних шляхів. Потоки пакетів починають використовувати резервні шляхи у разі відмови основного маршруту, що підвищує оперативність реакції мережі на можливе її перевантаження, збої в програмному та апаратному забезпеченні комутаційного та серверного обладнання. Запропоноване в цьому підрозділі рішення буде орієнтоване на реалізацію схем захисту шляху $n:1$ та пропускної здатності мережі, тобто один основний та n резервних шляхів не мають перетинатися за транзитними вузлами (маршрутизаторами), а відповідно й за каналами зв'язку ТКМ.

У **п'ятому розділі** запропоновано систему рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у роботі рішень для відмовостійкої та безпечної маршрутизації в телекомунікаційних мережах. Рекомендації доповнені прикладами автоматизованого збору та обробки інформації про стан мережної безпеки елементів ТКМ за допомогою розробленого для цього програмного забезпечення. Представлені фрагменти коду у середовищі MATLAB та на мові Python, який може виконуватись для розрахунку шуканих маршрутів на контролері (сервері) мережі.

Висновки дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень. Аналіз публікацій, апробацій та актів впровадження свідчить про повноту викладу в дисертаційній роботі отриманих наукових результатів.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

В рамках дисертаційної роботи Ель Хаж Слейман Батул Гаді отримані наступні нові наукові результати:

- вдосконалено математичні моделі QoS-маршрутизації в телекомунікаційній мережі за шляхами, що не перетинаються. Наукова новизна першої математичної моделі полягає у введенні нових умов балансування пропускної здатності маршрутів та використанні оновленого критерія оптимальності маршрутних рішень, що дозволило забезпечити у процесі маршрутизації максимізацію як кількості, так і сумарної пропускної здатності розрахованих шляхів. Наукова новизна другої математичної моделі полягає у введенні нових білінійних умов забезпечення гарантованої сумарної пропускної здатності маршрутів,

що дало змогу розрахувати шляхи, які мають пропускну здатність, не нижчу за встановлений поріг (вимоги).

- отримали подальший розвиток математичні моделі безпечної QoS-маршрутизації за шляхами, які не перетинаються. Новизна запропонованих моделей полягає у використанні комплексного критерію оптимальності маршрутних рішень, який поруч з показниками пропускну здатності враховує параметри мережної безпеки каналів зв'язку – імовірності їхньої компрометації. Це дозволило забезпечити розрахунок такої множини шляхів у ТКМ, які, по-перше, не перетинались; по-друге, їхня кількість була максимально можливою; по-третє, їхня сумарна пропускна здатність була або максимально можливою, або не нижче заданої; по-четверте, ймовірність компрометації цих шляхів була мінімальною.
- удосконалено модель швидкої перемаршрутизації з підтримкою схем захисту шляху $n:1$ та пропускну здатності мережі, адаптованих під одношляхову та багатошляхову стратегії маршрутизації. Новизна запропонованої моделі полягає у введенні оновлених умов захисту пропускну здатності мережі, що дозволило реалізувати схему захисту шляху $n:1$ без пропорційного збільшення розмірності оптимізаційної задачі.

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

Проблематика дисертації та результати дослідження відповідають змісту положень «Стратегії національної безпеки України», «Концепції розвитку цифрових компетентностей до 2025 року», рекомендацій щодо «Реформ у галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвитку інформаційного простору України» тощо.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їх достовірність

Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується аргументованими результатами досліджень та співставленням з результатами імітаційного моделювання. Дисертанткою проведено детальний та ретельний аналіз 115 використаних джерел наукової літератури, які включають в себе дослідження як вітчизняних, так і зарубіжних вчених з теми дисертаційного дослідження.

Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Практична значимість результатів, що отримані в дисертації Ель Хаж Слейман Батул Гаді, полягає в можливості їх використання в телекомунікаційних мережах на рівні SDN-контролерів для управління процесами маршрутизації. Крім того, отримані наукові та практичні результати використано в навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки, а саме у лекційному курсі та практичних заняттях з дисципліни «Routing in Infocommunications» при підготовці студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка», які проводяться для студентів Харківського національного університету радіоелектроніки.

Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях

Дисертаційна робота Ель Хаж Слейман Батул Гаді достатньо апробована, матеріали дисертації доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях і опубліковані у 17 наукових працях, з яких 1 монографія, 1 стаття – у фаховому науковому періодичному виданні, у тому числі 4 статі індексуються наукометричною базою Scopus, 9 тез-доповідей – у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій, з яких 7 індексуються наукометричною базою Scopus.

Зауваження та недоліки до дисертації

1. Підтримка великої кількості маршрутів у мережі – досить складне технологічне завдання. У роботі не наведені обґрунтування та рекомендації щодо обмеження на максимальну кількість задіяних маршрутів у телекомунікаційній мережі.

2. У роботі не наведено опису необхідності введення операції логарифмування при формуванні маршрутної метрики (3.2) для реалізації безпечної маршрутизації у телекомунікаційній мережі.

3. У четвертому розділі основна увага присвячена реалізації та дослідженню схеми захисту маршруту та його пропускної здатності. Проте поза увагою залишились інші менш складні, але також важливі схеми локального захисту – резервування вузла та каналу.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, а її оформлення в цілому відповідає встановленим вимогам МОН України.

Загальний висновок:

В цілому дисертація Ель Хаж Слейман Батул Гаді представляє собою завершену наукову працю, в якій розв'язано актуальну науково-прикладну задачу щодо покращення показників якості обслуговування та мережної безпеки із забезпеченням відмовостійкості телекомунікаційної мережі при реалізації схем захисту (резервування) елементів мережі у випадку їх ймовірних одиничних або множинних відмов. За своєю формою, об'ємом та змістом, рівнем наукової новизни та практичної значимості отриманих результатів дисертація відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

Загалом здобувачка Ель Хаж Слейман Батул Гаді за рівнем своєї підготовки та кваліфікації заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент:

доцент кафедри телекомунікацій
Навчально-наукового
Інституту телекомунікацій,
радіоелектроніки та електронної техніки
Національного університету
«Львівська політехніка»,
доктор технічних наук, доцент



Микола БЕШЛЕЙ

Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»
к.т.н., доцент



Роман БРИЛИНСЬКИЙ