

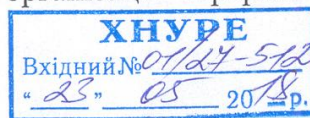
### Відгук офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Зайцева Дмитра Анатолійовича на дисертаційну роботу Невзорової Олени Сергіївни «Моделі та методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі»

### Актуальність теми дисертації

Актуальність теми дисертації визначається тим, що сучасні телекомунікаційні мережі (ТКМ) – це складні в технологічному та організаційному плані системи, кількість та територіальна розподіленість елементів яких постійно зростає, охоплюючи все нових користувачів. З іншої сторони, однією з передових концепцій побудови систем телекомунікацій є перехід до програмно-конфігурованих мереж, заснованих на застосуванні загально-цільового обчислювального обладнання для розв'язання задач керування та оптимізації функціонування мереж. Отже сучасну ТКМ можна розглядати як розподілений обчислювальний ресурс придатний до розв'язання задач обчислювальна складність яких суттєво перевищує складність класичних протоколів маршрутизації. Тому актуальним є напрямок дослідження, який пов'язаний з необхідністю оптимізації функціонування мережі та підвищення масштабованості мережних рішень. Особливо це стосується протоколів маршрутизації, які відповідають за забезпечення міжкінцевої якості обслуговування на підставі забезпечення ефективного балансування потоків в телекомунікаційній мережі.

З метою підвищення масштабованості кінцевих рішень протоколи маршрутизації вже досить тривалий час підтримують ієрархічний характер структурної побудови ТКМ з розподілом мережі на автономні системи, домени, кластери та області. Але математичною основою подібних протоколів продовжують залишатися класичні алгоритми пошуку найкоротшого шляху на графі, які функціонально не враховують особливості організації ієрархії





маршрутних задач та балансування навантаження. Тому тематика дисертаційної роботи Невзорової О.С., яка пов'язана з розробкою та вдосконаленням оптимізаційних моделей та методів ієрархічно-координаційної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах, є актуальною як з наукової, так і практичної сторони.

### **Наукова новизна дисертаційної роботи**

У дисертаційній роботі Невзорової О.С. отримано наукові результати, що в сукупності вирішують актуальну наукову задачу оптимізації процесів ієрархічної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах різних типів, шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей і методів з введенням процедур координації ієрархічних рівнів для підвищення масштабованості ТКМ та використання розподілених обчислювальних ресурсів мереж:

1. Вдосконалено потокову модель і метод ієрархічно-координаційної внутрішньодоменної маршрутизації в телекомунікаційній мережі SDN/MPLS-TE. Їх новизна полягає в тім, що при розв'язанні задач ієрархічної маршрутизації забезпечується оптимальне балансування навантаження за принципами Traffic Engineering та використовуються модифіковані маршрутні метрики, значення яких збільшуються пропорційно віддаленості каналів зв'язку від маршрутизатора-відправника або отримувача.

2. Вперше отримано потокову модель і дворівневий метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі, яка створена множиною послідовно з'єднаних між собою доменів. Новизна рішень полягає:

– в модифікації умов збереження потоку для доменів різних типів: відправників, отримувачів пакетів та транзитних доменів;

– у введенні умов міждоменної взаємодії для забезпечення зв'язності міждоменних шляхів;

– у використанні принципу цільової координації при введенні дворівневої ієрархії маршрутних рішень, розподіливши задачі між SDN-контролерами доменів та SDN-контролером мережі в цілому.



3. Вперше запропоновано метод ієрархічно-координаційної маршрутизації «від джерела» в мультидоменній телекомунікаційній мережі SDN/MPLS, новизна якого полягає у введенні трирівневої ієрархії розрахунку маршрутних змінних на основі використання принципу цільової координації. При цьому нульовий та перший рівні відповідали за реалізацію внутрішньодоменної маршрутизації «від джерела», а задача другого рівня – координація рішень щодо реалізації міждоменної взаємодії.

4. Отримав подальшого розвитку метод маршрутизації з розподілом каналного ресурсу у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі SDN/MPLS-DiffServ-TE. Новизна методу полягає:

- у забезпеченні збалансованого використання пропускну здатності каналів зв'язку, яка виділяється потокам відповідно до їх класів обслуговування (пріоритетів) в ході їх маршрутизації;

- у введенні дворівневої ієрархії розрахунків на SDN-контролері на основі використання принципу прогнозування взаємодій, що дозволило звести досить розмірну розрахункову задачу нелінійної оптимізації до ітераційного розв'язання менш розмірних задач лінійного програмування без втрати адекватності кінцевих рішень.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності результатів роботи**

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів забезпечується використанням положень добре відомого та широко апробованого математичного апарату дослідження операцій, математичного програмування, теорії ієрархічних багаторівневих систем управління, теорії графів, методів лабораторного експерименту.

Основний спосіб розподіленого ітераційного розв'язання оптимізаційних задач ґрунтується на переході від умовної до безумовної оптимізації за допомогою побудови поліному Лагранжа та його подальшої декомпозиції із застосуванням принципу цільової координації дослідженого та математично обґрунтованого у монографії Сінгха та Тітлі.

Крім того, у роботі проведено розрахунки для низки мереж із порівнянням результатів прямого способу розв'язання вихідних оптимізаційних задач із

запропонованими ієрархічно-координаційними процедурами. Зазначено, що результати збігаються в межах похибки обчислень та забезпечено прийнятну збіжність ітераційного процесу за робочим навантаженням каналів зв'язку.

Достовірність результатів роботи визначено також тим, що результати аналітичного моделювання були підтверджені результатами лабораторного експерименту на реальному мережному обладнанні.

### **Практична значимість результатів дисертаційної роботи**

Дослідження дисертаційної роботи пов'язані із реалізацією основних положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» та «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Результати дисертації використані в ході виконання наступної науково-дослідної роботи «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР №0115U002432). Дисертантом отримано патент на корисну модель.

Запропоновані у роботі математичні моделі та методи маршрутизації можуть стати основою математичного та алгоритмічно-програмного (протокольного) забезпечення маршрутизаторів і контролерів програмно-конфігурованих ТКМ різних типів. Реалізація на практиці запропонованих рішень дозволяє підвищити масштабованість маршрутних рішень за рахунок:

- зниження часу розв'язуваних маршрутних задач на підставі, по-перше, зменшення їх розміру пропорційно до числа доменів, приграничних маршрутизаторів та кількості потоків пакетів, по-друге, переходу до рішення задач лінійної оптимізації (у третьому науковому результаті), а по-третє, у використанні розподілених обчислювальних структур мереж;

- зменшення обсягів службового навантаження про стан мережі за рахунок підвищення швидкості збіжності координаційних процедур 1,5-2 до 3,5-5, а в ряді випадків і до 8 разів в залежності від розміру та зв'язності мережі, а також її завантаженості.



Крім того, як показали результати лабораторного експерименту, використання запропонованих рішень на практиці дозволить знизити середню міжкінцеву затримку пакетів від 8-12% до 14-22% (в залежності від розміру мережі) у порівнянні з використанням протоколу ієрархічної маршрутизації OSPF.

### **Повнота викладу у публікаціях та апробація результатів роботи**

Результати дисертаційної роботи досить повно викладено у шести статтях, з яких чотири у журналах, які входять до переліку, затвердженого МОН України, а дві статті опубліковано в журналах, що індексуються наукометричною базою Scopus. Апробація результатів роботи здійснювалась у ході 24 доповідей на наукових конференціях та форумах. Важливо зазначити, що 11 доповідей були на конференціях, які проходили під егідою IEEE та індексуються наукометричними базами Scopus та IEEE Xplore Digital Library. Дисертантом отримано один патент на корисну модель.

### **Оформлення дисертації та автореферату**

Дисертаційна робота Невзорової О.С. є завершеною наукова-дослідною роботою, виконаною і оформленою відповідно до вимог, затверджених МОН України. Зміст автореферату в цілому відповідає основним положенням дисертаційної роботи. Мова дисертаційної роботи ясна та чітка. Матеріал дисертації викладено коректно та логічно, з розумінням цілей та задач дослідження.

### **Зауваження щодо дисертаційної роботи**

1. У роботі розв'язано завдання оптимальної потокової маршрутизації із балансуванням навантаження для SDN/MPLS мереж але зазначені технології недостатньо глибоко розглянуто в першому розділі, де основну увагу приділено протоколам маршрутизації IP-мереж, які фактично не використовуються в MPLS доменах.
2. Недостатньо обґрунтованим є зв'язок способів формування критеріїв оптимізаційних задач розв'язаних у роботі, поданих виразами (2.12), (2.24), (3.9),

(3.21), (4.8), із цільовими характеристиками функціонування реальних мереж, такими як вартість передавання інформації та надійність.

3. Вважається доцільним явне подання елементів математичного та статистичного обґрунтування композиційно-ітераційного методу розв'язання низки оптимізаційних задач, яке фактично виконане через посилання до монографії Сінгха та Тітлі, а також через чисельне дослідження декількох мереж розмір яких дорівнює близько десяти вузлів.

4. В роботі не приділено достатньої уваги питанням обчислювальної складності алгоритмів, використаних для розв'язання оптимізаційних задач. Із зазначених у таблиці 2.4 задач деякі, наприклад цілочисельні, відомі як експонентні, що не можуть бути практично застосованими у дослідженні мереж із кількістю вузлів що перевищує декілька десятків.

5. Стосовно подальшої практичної реалізації, у роботі пропонується використання неоднорідних розподілених обчислювальних структур, які складаються із маршрутизаторів/комутаторів та серверів SDN, для розв'язання оптимізаційних задач, часова складність яких у найкращому випадку дорівнює поліному третьої ступені. Слід зауважити, що комутаторі MPLS працюють у реальному часі та використовують швидкі алгоритми перемикання пакетів часова складність яких є константа від розміру маршрутних таблиць.

6. Безсумнівною перевагою роботи є виконання експериментів із реальними мережними структурами поданих у п'ятому розділі. Хоча недостатню увагу приділено процедурам формування фактичних таблиць комутації та інших параметрів роботі комутаторів за отриманими результатами розв'язання оптимізаційних задач.

7. Стосовно системи позначення елементів математичного подання оптимізаційних задач у роботі слід зауважити що деякі нотації не є досконалими і не завжди відповідають інтуїтивному розумінню, так, наприклад використано більш ніж трьох індексів (два нижніх та один верхній теж індексований) для позначення «вектору» ікс – основних змінних оптимізації що є способом подання розріджених матриць.

Відзначені зауваження не впливають суттєво на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.



### Загальний висновок по дисертаційній роботі

На підставі розгляду змісту дисертаційної роботи, її автореферату, праць здобувача, актів впровадження, проведеного аналізу ступеня новизни наукових положень та практичної значимості отриманих наукових результатів та рекомендацій можна зробити висновок, що дисертаційна робота Невзорової О.С. являє собою закінчене наукове дослідження, в якому успішно розв'язано поставлену наукову задачу. Тема та зміст дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі».

Дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Невзорова Олена Сергіївна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі».

Офіційний опонент

професор кафедри комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій  
Міжнародного гуманітарного університету

доктор технічних наук  
професор

Д.А. Зайцев

*Підпис засвідчую*  
*Ректор Міжнародного*  
*гуманітарного університету*  
*професор*



*А.Ф. Крижановський*