

## **ВІДГУК**

офіційного опонента доктора технічних наук, професора

**Гнатюка Сергія Олександровича**

на дисертаційну роботу Дреєвої Ганни Миколаївни

«Моделі та методи аналізу та маршрутизації

фракталоподібного трафіку у комп'ютерних мережах»

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

галузь знань 12 Інформаційні технології

### **Актуальність теми дисертації**

Втрата мережевих пакетів при пікових навантаженнях на комп'ютерні мережі, яка відбувається внаслідок переповнення черг маршрутизаторів, значно впливає на якість обслуговування користувачів. На різні протоколи транспортного рівня втрата пакетів може впливати по-різному. Наприклад, при використанні протоколу UDP буде падати якість та надійність передачі даних, при використанні протоколу TCP – буде знижуватися швидкість передачі даних при невеликих значеннях втрат пакетів, а при великих втратах пакетів – буде знижуватися і швидкість, і якість роботи мережі.

Оскільки, повністю усунути ймовірність пікових навантажень на комп'ютерні мережі, як і на будь-які системи масового обслуговування, за рахунок постійного їх масштабування, не є можливим – доцільно боротися з наслідками таких перевантажень, коли вони трапляються.

Прогнозування завантаженості мережевих пристроїв з метою перенаправлення трафіку на менш завантажені за прогнозами пристрої є перспективним способом зменшення кількості втрачених IP-пакетів під час пікових навантажень на мережу. Одним з перспективних способів прогнозування властивостей трафіку є фрактальний аналіз його часових рядів. Фрактальні властивості трафіку були досліджені та доведені у численних роботах зарубіжних та вітчизняних авторів.

Виходячи з вищесказаного тема дисертаційної роботи Дреєвої Ганни Миколаївни є актуальною.

Дисертаційна робота виконана у межах пріоритетних наукових напрямів, які охоплюють актуальні проблеми, відповідно до рішення Президії Національної академії наук України від 30 січня 2019 року «Про основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 роки», «Інформатика» за темами: «Розроблення обчислювальних алгоритмів і процедур з метою вирішення практичних задач міждисциплінарного характеру для застосувань,



що належать до науково-технічної та соціально-економічної сфер діяльності людини», «Розроблення математичних методів та систем моделювання об'єктів та процесів». Дисертаційну роботу виконано у межах зареєстрованих науково-дослідних робіт Центральноукраїнського національного технічного університету: «Моделювання та аналіз складних мереж та інформаційних систем» (ДР № 0119U003587) та «Методи використання інформаційних технологій та інтелектуальних систем для аналізу даних та забезпечення інформаційної безпеки суспільства» (ДР № 0116U008161).

### **Основний зміст роботи**

У вступі обґрунтовано актуальність дисертації, визначено мету, об'єкт та предмет дослідження. Сформульовано проблему дисертаційного дослідження, наукові завдання, наведено основні наукові та практичні результати. Відзначено особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертаційної роботи на конференціях, наведено відомості про публікації та структуру роботи.

У першому розділі дисертації проведено дослідження та порівняльний аналіз моделей та методів роботи комп'ютерних мереж, а також методів аналізу, моделювання, прогнозування та маршрутизації мережевого трафіку. У першому розділі також сформовано цілі та задачі дисертаційного дослідження. Показано, що для вирішення поставленої науково-практичної задачі з підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та пікових навантажень на маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережевих пакетів доцільно застосувати методи адаптивної маршрутизації трафіку з прогнозуванням завантаженості маршрутизаторів або прогнозуванням ймовірності втрати мережевих пакетів.

У другому розділі запропоновано удосконалену математичну модель мережевого фракталоподібного трафіку, яка відрізняється від відомих представлень трафіку на рівні “пакет є” – “пакета немає” на вході маршрутизатора та запропонованими ланцюгами Маркова, які описують ймовірності станів генератора трафіку як стохастичного скінченного автомата, що дало змогу одержати рівняння для імітаційного моделювання фрактального та мультифрактального трафіків. Також запропоновано удосконалений метод генерації мережевого фрактального трафіку, який відрізняється від відомих можливістю налаштовувати фрактальну розмірність та інтенсивність трафіку перед його генерацією, а отже, моделювати різні типи трафіку. Проведено експериментальні дослідження статистичних властивостей генерованих часових рядів на основі запропонованої математичної моделі фракталоподібного трафіку.



У третьому розділі запропоновано метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку, який відрізняється від відомих використанням нової міри визначення фрактальної розмірності бінарного трафіку, що дало змогу зв'язати аналітично його статистичні та фрактальні властивості, підвищити точність визначення фрактальної розмірності та зменшити кількість арифметичних операцій при фрактальному аналізі. Проведено експериментальне дослідження якості роботи запропонованого методу аналізу мережевого трафіку, а саме, здійснено визначення фрактальної розмірності мережевого трафіку за його ймовірнісними властивостями. Також результати якості роботи запропонованого методу було порівняно з отриманими результатами за методом на основі R/S-аналізу.

У четвертому розділі було розроблено метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, який відрізняється від відомих використанням запропонованого методу генерації мережевого фрактального трафіку та параметризацією характеристик моделі, зокрема таких як кількість маршрутизаторів, густина зв'язків між ними, довжина їх черг, пропускна здатність, інтенсивність та фрактальна розмірність трафіку, максимальна кількість вихідних пакетів з одного пристрою в одиницю часу, що дозволило моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації. Також було розроблено метод адаптивної маршрутизації трафіку, який відрізняється від відомих використанням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережеских пакетів, представленої прогнозованою ймовірністю втрати мережеских пакетів маршрутизатором, яка визначається запропонованим новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку. Це дало змогу підвищити якість обслуговування у комп'ютерній мережі під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених IP-пакетів.

Основні висновки містять отримані у роботі наукові і практичні результати та відповідають заявленій меті і завданням дослідження.

### **Наукова новизна дисертаційної роботи**

– Удосконалено математичну модель мережевого фракталоподібного трафіку, яка відрізняється від відомих представленням трафіку на рівні “пакет є” – “пакету немає” на вході маршрутизатора та запропонованими ланцюгами Маркова, які описують ймовірності станів генератора трафіку як стохастичного скінченного автомата, що дозволило одержати рівняння для імітаційного моделювання фрактального та мультифрактального трафіку. На основі запропонованої математичної моделі розроблено метод генерації мережевого фрактального трафіку, який



відрізняється від відомих можливістю налаштовувати фрактальну розмірність та інтенсивність трафіку перед його генерацією, а отже, моделювати різні типи трафіку.

– **Вперше розроблено метод** аналізу мережевого фракталоподібного трафіку, який відрізняється від відомих використанням нової міри визначення фрактальної розмірності бінарного трафіку, що дозволило зв'язати аналітично його статистичні та фрактальні властивості, підвищити точність визначення фрактальної розмірності та зменшити кількість арифметичних операцій при фрактальному аналізі.

– **Набув подальшого розвитку метод** програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, який відрізняється від відомих використанням запропонованого методу генерації мережевого фрактального трафіку та параметризацією характеристик моделі, зокрема таких як кількість маршрутизаторів, густина зв'язків між ними, довжина їх черг, пропускна здатність, інтенсивність та фрактальна розмірність трафіку, максимальна кількість вихідних пакетів із одного пристрою в одиницю часу, що дозволило моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації.

– **Удосконалено метод** адаптивної маршрутизації трафіку, який відрізняється від відомих використанням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережеских пакетів, представлені прогнозованою ймовірністю втрати мережеских пакетів маршрутизатором, яка визначається запропонованим новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку, що дозволило підвищити якість обслуговування у комп'ютерній мережі під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених IP-пакетів.

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

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації забезпечується аргументованими результатами досліджень та співставленням з результатами математичного і програмного моделювання.

**Практичне значення одержаних результатів**

Отримані в дисертаційній роботі результати дають змогу підвищити якість обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та пікових навантажень на маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережеских пакетів.

Практична значимість роботи полягає в наступному:



– Розроблено алгоритми моделювання структури комп'ютерної мережі та генерації фрактального мережевого трафіку, що дають можливість моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації.

– Розроблено алгоритми для аналізу фрактальних властивостей трафіку та алгоритми для прогнозування ймовірності втрати мережевих пакетів маршрутизатором на основі статистичних та фрактальних властивостей вхідного трафіку, що дають змогу удосконалювати алгоритми маршрутизації. Запропонований метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку з більшою точністю та однозначністю результатів визначає фрактальну розмірність трафіку незалежно від довжини досліджуваного ряду, на відміну від відомого методу на основі R/S-аналізу, а також має меншу кількість арифметичних операцій. Зокрема, запропонований метод дає менший відсоток відхилення від середнього значення показника Херста, а саме: 1,8% на відміну від 2,5% для R/S-аналізу.

– Розроблено алгоритм адаптивної маршрутизації трафіку з застосуванням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів, представленої прогнозованою ймовірністю втрати мережевого пакету маршрутизатором, яка визначається новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку. Запропонований удосконалений метод адаптивної маршрутизації дає змогу зменшувати кількість втрачених мережевих пакетів під час високої інтенсивності трафіку, зокрема при інтенсивності 0,8 в середньому на 23% для персистентного трафіку, на 17% – для випадкового трафіку та на 1,5% – для антиперсистентного трафіку. Причому, конкретні значення покращень залежать від параметрів мережі.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено відповідними актами впровадження. Результати дисертаційних досліджень впроваджені і використовуються у діяльності Інтернет-сервіс провайдера ТОВ «Імперіал-Нет», а також використано у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких наукових конференціях та семінарах: закордонній I Міжнародній науково-практичній конференції «Modern Information, Measurement And Control Systems: Problems And Perspectives» (Азербайджан, Баку, 2019); 12-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів



управління» (Азербайджан – Україна – Словаччина, Баку-Харків-Жиліна, 2022); Міжнародній науковій конференції «Інформація. Комунікація. Суспільство» (Україна, Львів, 2018, 2020, 2021); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційна безпека та інформаційні технології» (Україна, Харків, 2019, 2020); XXVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2019» (Україна, Харків, 2019); Міжнародній науковій конференції «Безпека в сучасному світі» (Україна, Дніпро, 2019); XXII Міжнародному науково-практичному семінарі «Комбінаторні конфігурації та їх застосування» імені А. Я. Петренюка (Україна, Запоріжжя – Кропивницький, 2020); X Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Україна, Чернігів, 2020); Міжнародній науково-практичній конференції «Цифрова трансформація суспільства» (Україна, Кропивницький, 2022); Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві» (Україна, Кропивницький, 2022); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (Україна, Черкаси, 2022).

### **Публікації**

Основні положення дисертації опубліковано в 28 наукових працях, у тому числі: 11 наукових статей (з яких 4 входить до бази даних Scopus, 7 – у вітчизняних фахових наукових журналах), 2 монографії, а також 15 матеріалів і тез доповідей на конференціях.

### **Зауваження по роботі:**

1. На мою думку, аналітичний огляд методів адаптивної маршрутизації трафіку необхідно було деталізувати і розширити. Доречним було б наведення порівняльної таблиці відомих методів, їх переваг та недоліків.

2. Відсутні експериментальні порівняння запропонованого методу генерації мережевого фрактального трафіку з відовими методами, хоча наявні експерименти з перевірки його ефективності роботи.

3. З усіх методів прогнозування часових рядів трафіку, розглянутих у першому розділі, при порівняльних експериментальних дослідженнях розробленого методу з відовими було використано лише метод ковзного середнього. Вважаю, було б більш інформативним порівняти розроблений метод з декількома відовими.

4. На рисунках 4.1, 4.2, 4.7 наведені приклади згенерованих для експериментів структур комп'ютерних мереж, але немає пояснень, що



означають цифри на ребрах графів мереж, а саме 0.5, 1, 2 та 3.

5. В таблиці 4.2. «Результати серії експериментів для визначення якості розробленого методу маршрутизації фракталоподібного трафіку та в порівнянні його з існуючими методами при інтенсивності трафіку 0,8» наведено колонку «Максимальна кількість пакетів, що надсилалася на маршрутизатор з його підмережі в одиницю часу», у роботі відсутні пояснення, чому це значення використовується окремо від інтенсивності трафіку і чи існує взаємозв'язок між ними.

Відзначені зауваження не ставлять під сумнів основні наукові та практичні результати і суттєво не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок.**

Дисертаційна робота Дреєвої Ганни Миколаївни представляє собою завершене актуальне наукове дослідження. В роботі отримано нові науково-обґрунтовані результати, які дозволяють розвинути методи та моделі аналізу і маршрутизації мережевого трафіку для підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах шляхом зменшення кількості втрачених мережевих пакетів під час пікових навантажень на маршрутизатори.

Вважаю, що дана дисертація відповідає вимогам до дисертаційного дослідження на здобуття ступеня доктора філософії, наведеним у Постанові 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».

Дисертаційна робота може бути представлена для офіційного захисту у разовій спеціалізованій вченій раді, а її автор, Дреєва Ганна Миколаївна, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія галузі знань 12 Інформаційні технології.

### **Офіційний опонент:**

доктор технічних наук, професор,  
декан факультету комп'ютерних наук  
та технологій Національного  
авіаційного університету



Сергій ГНАТЮК

Підпис гр.

з а с в і д ч у ю

Вчений секретар

Національного авіаційного університету

*М. Мельник*