

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Іяс Каялі Ріад Вафаа

УДК 004.7:519.2

**МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ САМОПОДІБНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ПОТОКІВ У МУЛЬТИСЕРВІСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Кіріченко Людмила Олегівна,
Харківський національний
університет радіоелектроніки,
професор кафедри прикладної математики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Борисенко Олексій Андрійович,
Сумський державний університет,
МОН України, професор кафедри
електроніки і комп'ютерної техніки;

доктор технічних наук, професор
Краснобаєв Віктор Анатолійович,
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка, МОН України,
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії.

Захист відбудеться «___» _____ 2014 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.01 у Харківському національному університеті радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «___» _____ 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.А. Винокурова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнє десятиліття відзначилося стрімким розвитком мережі Інтернет і появою та поширенням нових мультимедійних сервісів, що працюють у режимі реального часу. Розвиток комп'ютерних систем та технологій і розширення обсягів інформаційних послуг ґрунтуються значною мірою на науково-технологічних розробках в області комп'ютерних мереж. Результатом розвитку комунікаційних технологій на шляху до забезпечення зростаючих вимог якості обслуговування стала поява цілого ряду технологій, серед яких широке практичне застосування знайшла технологія мультипротокольної комутації міток (Multiprotocol Label Switching – MPLS), яка характеризується високою гнучкістю і наявністю механізмів управління трафіком.

Над питаннями створення і удосконалення методів маршрутизації в комп'ютерних мережах і, зокрема, розвитку технології MPLS працювали такі науковці та дослідники, як Поповський В.В., Беркман Л.Н., Кунах Н.І., Зуєв В.О., Костік Б.Я., Манько О.О., Кравченко Ю.В., Хращевський Р.В. та ін. Із розвитком комп'ютерних мереж і технологій вибір застосовуваних методів і протоколів маршрутизації не втратив своєї актуальності. Особливо важливим є вивчення впливу самоподібних властивостей трафіку на якість обслуговування в мультисервісних мережах зв'язку.

Експериментальні дослідження, що проведені в останні десятиліття, свідчать, що трафік в багатьох мультисервісних комп'ютерних мережах має самоподібні властивості. Причина такого ефекту полягає в особливостях розподілу файлів по серверах, їх розмірах, в типовій поведінці користувачів і в значній мірі пов'язана із змінами мережевих ресурсів і топології мережі. Самоподібний трафік викликає значні затримки і втрати пакетів, навіть коли сумарна інтенсивність всіх потоків далека від максимально допустимих значень.

Існує велика кількість публікацій, присвячених аналізу фрактальних властивостей трафіку. Самоподібні властивості інформаційних потоків виявлені в локальних і глобальних мережах, зокрема в трафіках Ethernet, АТМ, додатках TCP, IP, VoIP. Значний внесок у розвиток теорії самоподібних процесів, дослідження фрактальних властивостей телетрафіку і побудову моделі фрактального трафіку внесли К. Park, W. Willinger, P. Abry, MS Taqqu, I. Norros, Потапов А.А., Цибаков Б.С., Шелухін О.І. та інші вчені.

В останнє десятиліття почали активно досліджуватися методи управління фрактальним трафіком для підвищення якості обслуговування мережі, зокрема, вибір та застосування методів і протоколів маршрутизації. Однак, незважаючи на зростаючу кількість робіт у цьому напрямку, низка питань залишається відкритою. До них слід віднести дослідження механізмів підвищення якості обслуговування і методів управління трафіком у мультисервісних мережах, у тому числі мережах MPLS, що функціонують за умов самоподібного і, зокрема, мультифрактального трафіку.

Таким чином, актуальною і важливою науково-технічною задачею є розробка методів управління інформаційними потоками і ресурсами мультисервісних комп'ютерних мереж, які враховують фрактальні властивості

трафіку і дозволяють забезпечити високий рівень якості обслуговування. Завдання, які при цьому постають, обумовили напрямок досліджень наданої дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з планом основних наукових досліджень. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках договорів на замовлення Міністерства освіти і науки України: № Ф25/713 «Аналіз і поведінка систем з великою нелінійністю: синергетичний підхід» № ДР 0107U010621 та № Ф25/253 «Розробка математичних моделей інформаційних систем з великою нелінійністю» № ДР 0108U009112. Здобувачем були досліджені фрактальні властивості інформаційних потоків даних в комп'ютерних мережах.

Мета і завдання досліджень. Метою даної роботи є розробка модифікованих методів маршрутизації інформаційних потоків в мультисервісних комп'ютерних мережах, які враховують фрактальні властивості трафіку і дозволяють забезпечити високий рівень якості обслуговування.

Відповідно до поставленої мети необхідно розв'язати такі наукові задачі:

– провести огляд і аналіз моделей фрактального мережного трафіку, методів управління потоками даних у мультисервісних комп'ютерних мережах та досліджень впливу фрактальних властивостей трафіку на якість обслуговування в мережах;

– удосконалити математичну модель мультифрактального каскадного процесу для застосування його як моделі телекомунікаційного трафіку, що дозволить генерувати реалізації різних видів трафіку із заданими фрактальними властивостями;

– за допомогою імітаційного моделювання дослідити вплив самоподібних та мультифрактальних властивостей трафіку на показники якості обслуговування в мережі для найбільш затребуваних алгоритмів маршрутизації;

– удосконалити потокову модель мультисервісної комп'ютерної мережі MPLS з урахуванням обмежень для різних класів обслуговування вхідного трафіку, який має фрактальні властивості;

– на основі удосконаленої MPLS-моделі розробити методи підвищення якості управління фрактальним трафіком і ресурсами в мультисервісних комп'ютерних мережах;

– провести імітаційне моделювання запропонованих методів управління фрактальним трафіком і вирішити практичні завдання.

Об'єкт дослідження – процеси управління трафіком в мультисервісних комп'ютерних мережах.

Предмет дослідження – методи динамічної маршрутизації самоподібних інформаційних потоків у мультисервісних комп'ютерних мережах.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань в роботі використовувалися методи фрактального і статистичного аналізів даних (для дослідження властивостей самоподібності та розрахунку характеристик мережевого трафіку); методи теорії ймовірностей і випадкових процесів (для побудови математичних моделей фрактального трафіку); методи лінійного програмування, теорії графів та оптимізації (для побудови математичних моделей

мультисервісних мереж); імітаційне моделювання (для розробки методів управління потоками даних, перевірки запропонованих моделей і вироблення практичних рекомендацій).

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертації отримано такі нові наукові та практичні результати.

1. Вперше запропоновано метод оцінки вартості маршрутизації, який, на відміну від існуючих, заснований на урахуванні фрактальних властивостей мережного трафіку, що дозволяє підвищити ступінь використання каналів передачі даних за рахунок перенаправлення найбільш критичних інформаційних потоків на менш завантажені альтернативні канали зв'язку.

2. Удосконалено потокову мережну MPLS-модель, яка, на відміну від існуючих, враховує обмеження на більш повний набір характеристик мережі для різних класів обслуговування і зміну в часі декількох параметрів трафіку, що дозволяє розробити методи управління трафіком з урахуванням більшої кількості вимог якості обслуговування.

3. Отримали подальший розвиток методи управління ресурсами мережі, які розроблені на основі удосконаленої MPLS-моделі, а саме: метод вибору структури мережі за критерієм мінімальної вартості, який, на відміну від існуючих, враховує фрактальні властивості трафіку і обмеження на показники якості для основних класів обслуговування; метод балансування навантаження в мережі для рівномірного використання каналів передачі трафіку, який, на відміну від існуючих, використовує штрафну функцію, параметри якої визначаються вимогами для кожного класу обслуговування; метод реконфігурації мережі MPLS при відмовах, який, на відміну від існуючих, враховує фрактальні властивості трафіку і класи обслуговування при перерозподілі потоків у каналах зв'язку. Сукупність запропонованих методів дозволяє підвищити швидкість передачі даних, більш рівномірно розподілити навантаження і підвищити якість обслуговування трафіку різних класів у мережі MPLS.

4. Отримала подальший розвиток математична модель мультифрактального процесу на основі біноміального стохастичного каскаду шляхом визначення значень параметрів моделі для моделювання різних видів трафіку. Це дозволяє застосовувати її як генератор трафіку для імітаційного моделювання мультисервісних комп'ютерних мереж.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи можуть бути використані при розробці алгоритмів функціонування вузлів телекомунікаційного обладнання для підвищення якості обслуговування і ефективності обробки трафіку, що має властивість самоподібності. Розроблені методи управління трафіком і ресурсами комп'ютерних мереж дозволяють забезпечити задану якість послуг і підвищити ефективність використання устаткування і каналів передачі в умовах самоподібного навантаження. Застосування розроблених моделей трафіку дозволяють проаналізувати можливість максимально ефективного використання ресурсів мережі на етапі її проектування.

Розроблені моделі і методи впроваджені в компанії «Маркет-репорт», де вони використовуються для запобігання перевантаженню вузлів мережі за

рахунок перерозподілу потоків даних на критичних ділянках (акт від 17.05.2013). Також результати роботи впроваджені в навчальний процес у Харківському національному університеті радіоелектроніки (акт від 10.10.2013).

Особистий внесок здобувача. Усі представлені в роботі результати отримані автором самостійно. Їх основний зміст викладений у роботах [1-16]. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: [1] – досліджено вплив мультифрактальних властивостей трафіку на утворення черг і втрат; [2] – проведено імітаційне моделювання роботи мережі при самоподібному трафіку і наявності вузького місця в системі; [3] – досліджено вплив методів маршрутизації на якість обслуговування при самоподібному трафіку; [4] – запропоновано методи управління самоподібним трафіком у мережах MPLS; [5] – запропоновано модель телекомунікаційного трафіку на основі мультиплікативного стохастичного каскаду запропоновано метод управління фрактальним трафіком в мережі MPLS; [6] – удосконалено математичну модель мережі MPLS та запропоновано методи управління ресурсами мережі; [7] – запропоновано метод управління фрактальним трафіком в мережі MPLS; [9] – проведено генерування самоподібного трафіку для імітаційного моделювання; [10] – на основі імітаційного моделювання проведено порівняльний аналіз методів маршрутизації; [12] – проведено дослідження механізмів підвищення QoS; [13] – проведено моделювання та дослідження властивостей мультифрактального трафіку; [14] – проведено аналіз статистичних властивостей телекомунікаційного трафіку; [15] – запропоновано методи управління мультифрактальним трафіком у MPLS; [16] – проведено аналіз характеристик мультифрактального трафіку на основі моделі стохастичного каскаду.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені, доповідалися і обговорювалися на таких наукових конференціях: 14-му та 15-му міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті» (Харків 2010, 2011 рр.), 10-й та 11-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, 2010, 2011 рр.), 17-й Міжнародній конференції з автоматизації та управління «Автоматика – 2010» (Харків, 2010 р.), 10-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології» (Одеса, 2011 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (Черкаси, 2012 р.), 6-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2012 р.); XVIII-й Міжнародній конференції «Knowledge–Dialogue–Solution» (Київ, 2012 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 16 наукових працях, у тому числі: 1 колективна монографія (розділ), 6 статей у фахових періодичних виданнях України з технічних наук (серед яких 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз) та 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 137 найменувань (15 стор.) та

2-х додатків (на 8 сторінках). Повний обсяг дисертації складає 160 сторінок, з них 132 сторінки основного тексту, містить 37 рисунків та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дослідження, розглядаються проблеми, які виникають через властивості самоподібності в телекомунікаційних системах, формулюється мета та завдання дослідження, визначаються об'єкт, предмет та методи досліджень, висвітлюється наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві, відзначається апробація результатів дисертації та кількість публікацій, виконаних за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто основні поняття і властивості телекомунікаційного мережного трафіку, що має самоподібні та мультифрактальні властивості. Самоподібність випадкових процесів полягає в збереженні статистичних характеристик при зміні масштабу часу. Параметр, званий показником Херста H , являє собою ступінь самоподібності. Поряд з цим показник характеризує міру довгостроковій залежності, тобто спадання автокореляційної функції за степеневих законом. Самоподібний трафік має особливу структуру, яка зберігається на багатьох масштабах – в реалізації завжди присутня деяка кількість дуже великих викидів за відносно невеликим середнім рівнем трафіку. В останнє десятиліття інтенсивно вивчаються мультифрактальні властивості трафіку. Мультифрактальний трафік визначається як розширення самоподібного трафіку за рахунок обліку масштабованих властивостей статистичних характеристик другого і вище порядків.

У роботі показано, що найбільш важливою задачею є розробка методів управління потоками даних і ресурсами мультисервісних комп'ютерних мереж, які враховують самоподібні і мультифрактальні властивості трафіку. Особливу увагу приділено технології Multiprotocol Label Switching (MPLS), яка забезпечує побудову магістральних мереж, підвищену швидкість обробки трафіку і велику гнучкість з точки зору організації додаткових сервісів. Проведено аналіз публікацій, присвячених аналізу впливу методів маршрутизації на якість обслуговування в мультисервісних мережах зв'язку, що функціонують в умовах самоподібного трафіку. Показано, що розробка методів управління фрактальними інформаційними потоками, які дозволяють забезпечити високий рівень якості обслуговування (QoS) в комп'ютерних мережах, є актуальним завданням.

У другому розділі методами імітаційного моделювання проведено порівняльний аналіз показників якості обслуговування комп'ютерної мережі для алгоритмів динамічної та статичної маршрутизації при пуасонівському і самоподібному вхідному трафіку. Оптимальна маршрутизація здатна істотно збільшити пропускну здатність мережі. Також можна використовувати маршрутизацію для розподілу навантаження за допомогою функцій управління трафіком.

Більшість дослідників вважають, що основною причиною самоподібності трафіку є протокол TCP. У роботі був проведено аналіз механізму впливу

протоколу TCP на властивості мережного трафіку і дослідження механізмів управління перевантаженням для різновидів протоколів сімейства TCP (NewReno, Reno, Tahoe і ін.). Проведено імітаційне моделювання роботи мережі за наявності вузького місця в системі. Показано, що в цьому випадку надходження великих обсягів трафіку викликає хаотичний режим в динаміці вікна перевантаження, що призводить до перевантаження комп'ютерної мережі.

У роботі проведено порівняльний аналіз функціонування протоколів маршрутизації: статичного і динамічних RIP, OSPF, IGRP і EIGRP. Для цього в роботі було проведено імітаційне моделювання в мережевому симуляторі ns-2. У ході роботи була побудована модельна мережа, що складається з декількох відправників, отримувачів та встановлених між ними маршрутизаторів. На вхід надходив самоподібний трафік із параметрами, які задаються користувачем, одним із яких був показник Херста, який характеризує довгострокову залежність процесу. В ході проведення чисельного експерименту змінювалися алгоритми маршрутизації, розміри буфера маршрутизаторів, пропускна смуга між маршрутизаторами. У процесі дослідження враховувалися такі параметри як пропускна здатність, затримка передачі даних, надійність передачі інформації, відносна завантаженість вузла мережі.

Для даної системи зв'язку проведено дослідження впливу методів маршрутизації на якість обслуговування в мультисервісних мережах. У ході імітаційного моделювання були виявлені переваги і недоліки розглянутих протоколів, що визначаються реакцією на зміну топології системи, швидкістю реакції визначення метрики шляху і перераховування таблиць маршрутизації, відмовостійкістю методів при піковому навантаженні тощо. Була отримана динаміка основних показників якості обслуговування: кількості втрачених пакетів, середнього часу доставки пакетів та їх затримки.

На рис. 1 наведено динаміку втрачених пакетів при пуасонівському і самоподібному вхідному трафіку для статичної маршрутизації та протоколів RIP і OSPF. У цьому випадку параметр самоподібності $H = 0.8$. Очевидно, що втрати при самоподібній навантаженості зростають більш ніж на порядок, але для різних протоколів різною мірою.

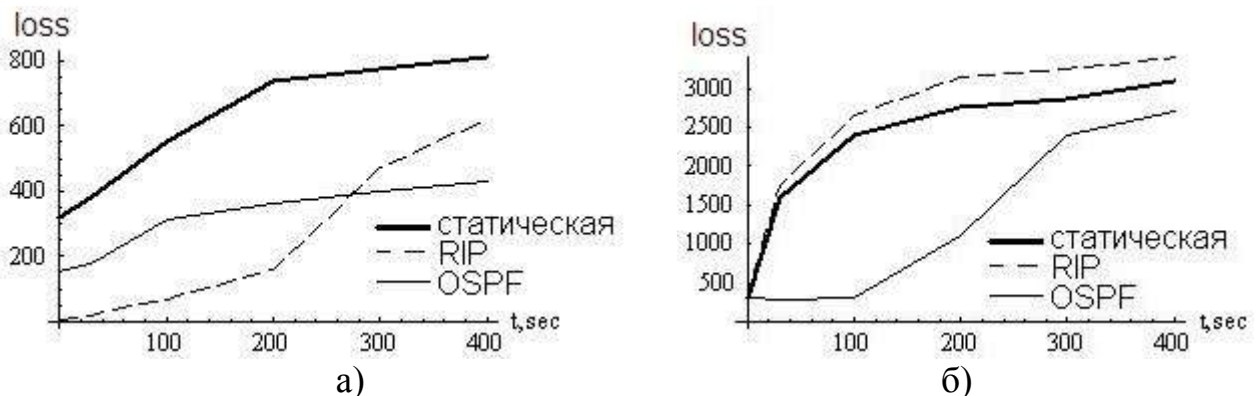


Рисунок 1 – Кількість втрачених пакетів: а) при пуасонівському вхідному трафіку; б) при самоподібному вхідному трафіку

На рис. 2 представлена зміна часу затримки пакетів. Потрібно відзначити, що час затримки для самоподібного трафіку в середньому вдвічі більше, ніж для пуасонівського.

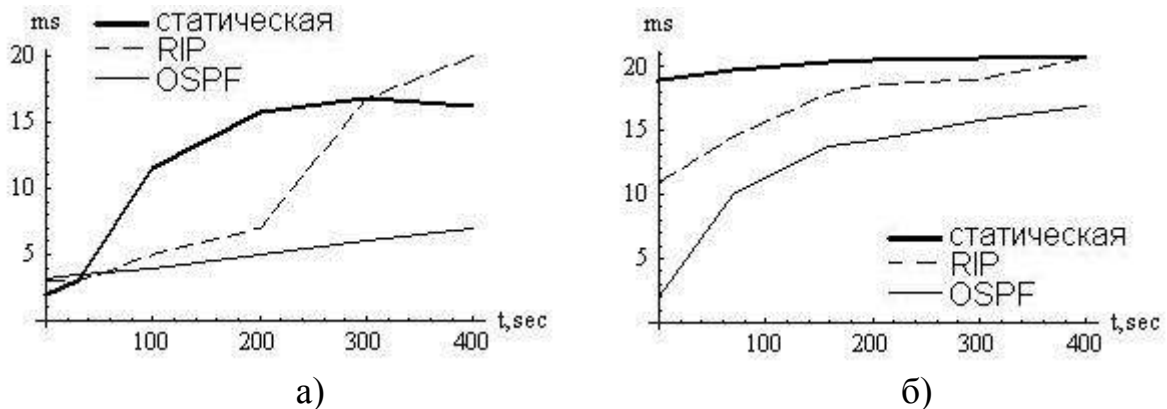


Рисунок 2 – Середній час затримки пакетів: а) при пуасонівському вхідному трафіку; б) при самоподібному вхідному трафіку

За результатами досліджень запропоновано рекомендації щодо вибору алгоритмів маршрутизації в мультисервісних мережах із фрактальним трафіком у залежності від мережних параметрів і характеристик.

У третьому розділі отримала подальший розвиток модель мультифрактального трафіку на основі біноміального стохастичного каскаду в області визначення значень параметрів моделі для різних видів трафіку. Генерація модельних реалізацій телекомунікаційного трафіку дозволяє ефективно використовувати імітаційне моделювання для аналізу мультисервісних комп'ютерних мереж.

Побудова біноміального мультиплікативного стохастичного каскаду полягає в рекурсивному перерозподілі міри інтервалу на два двійчастих підінтервали пропорційно заданим ваговим коефіцієнтам, якими є незалежні значення заданої випадкової величини. Як випадкову величину, що породжує вагові коефіцієнти, запропоновано використовувати величину, що має несиметричний бета-розподіл. Варіація параметрів розподілу дозволяє генерувати трафік із заданими параметром самоподібності H і функцією мультифрактального спектру $f(\alpha)$. Це дозволяє вибирати як ступінь довгострокової залежності, яка визначається значенням показника Херста, так і ступінь неоднорідності трафіку, що характеризується шириною мультифрактального спектру.

У роботі було проведено дослідження фрактальних властивостей і оцінювання мультифрактальних характеристик телекомунікаційного трафіку різних типів (Ethernet, ATM, додатків TCP, IP, VoIP та інші). Отримано чисельні залежності, які значенням параметра Херста H ставлять у відповідність різні функції мультифрактального спектру $f(\alpha)$. Отримані залежності дозволяють моделювати реалізації трафіків із показником Херста $0.6 \leq H < 1$ і шириною мультифрактального спектру $1 < \Delta\alpha < 8$, що охоплює досить великий клас інформаційних трафіків, які мають фрактальні властивості.

Моделювання реалізацій мультифрактального трафіку має такі етапи:

– за реалізацією трафіку $Y(t)$ $t=1, \dots, \tau$, який має фрактальні властивості, знаходимо оцінки його характеристик: математичного сподівання \bar{Y} , функцію мультифрактального спектру $\hat{f}(\alpha)$ і параметр самоподібності \tilde{H} ;

– за даними чисельних досліджень обираємо параметри випадкової величини з бета-розподілом, яка генерує вагові коефіцієнти мультифрактального каскаду з характеристиками $f(\alpha)$ і H ;

– за допомогою ітераційної процедури будуємо реалізацію біноміального мультиплікативного каскаду $X(t)$, $i=1, 2, \dots, 2^n$, необхідної довжини 2^n , де n – кількість ітерацій;

– отриманий ряд $X(t)$ множимо на величину $2^n \cdot \bar{Y}$.

Модель телекомунікаційного трафіку із заданими параметрами дозволяє проводити імітаційне моделювання завантаження каналу. За її допомогою було проведено ряд експериментів проходження трафіку однакової інтенсивності та з різними значеннями мультифрактального спектру і показника Херста через вузол мережі з необмеженим буфером. Результати експерименту показали, що як більше значення параметра Херста, так і більше значення діапазону мультифрактального спектру відповідають більшим чергам у необмеженому буфері, а, отже, і великим втратам при буфері заданого розміру.

Для визначення залежності втрат і довжини черги від завантаження системи при проходженні мультифрактального трафіку, була проведена серія експериментів проходження трафіку через вузол мережі. При проведенні імітаційного моделювання середня завантаженість системи змінювалася від 50 до 95 відсотків. Досліджувалася залежність середнього розміру черги в нескінченному буфері і кількості втрат при обмеженому буфері від величини завантаження каналу для модельних реалізацій трафіку з однаковим показником Херста і різною шириною мультифрактального спектру. На рис. 3 наведені залежності середнього розміру буферної пам'яті для буфера нескінченного розміру (а) і кількості втрат при значенні буферної пам'яті $B=256000$ (б) для реалізацій трафіків із середньою інтенсивністю $I=1000$. Завантаження системи показано на осі абсцис. Модельні реалізації, отримані на основі мультифрактального каскаду, мали ширину мультифрактального спектру $\Delta\alpha=3$ (лінія 1), $\Delta\alpha=2.5$ (лінія 2) і $\Delta\alpha=2$ (лінія 3). Значення параметра Херста у всіх випадках $H=0.77$.

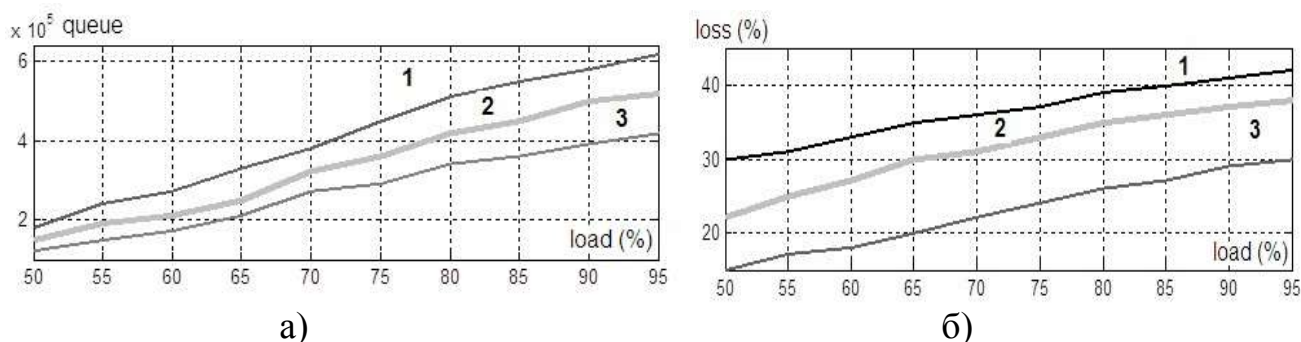


Рисунок 3 – Залежність розміру черг і втрат від завантаження каналу: а) середня довжина черги; б) відсоток втрат

Таким чином, черги і втрати, породжувані трафіком із мультифрактальними властивостями, визначаються показником Херста і шириною мультифрактального спектру, що відповідає ступеню неоднорідності трафіку, тобто розкиду даних. Як характеристику неоднорідності потоку даних у роботі запропоновано ввести коефіцієнт нормованого розкиду значень даних:

$$S_{norm}(T) = S / \bar{X}, \quad (1)$$

де T – часовий інтервал, на якому фіксується потік даних; S – середньоквадратичне відхилення; \bar{X} – середнє значення.

Коефіцієнт $S_{norm}(T)$ є безрозмірним і не залежним від інтенсивності процесу, що дозволяє використовувати його для порівняння неоднорідних даних. У разі мультифрактальних реалізацій величина $S_{norm}(T)$ характеризує ступінь неоднорідності (ширину мультифрактального спектру). Таким чином, при роботі в режимі реального часу, можна перейти від розрахунку мультифрактального спектру, який є досить витратним за часом, до обчислення коефіцієнта нормованого розкиду трафіку. Результати імітаційного моделювання, отримані для модельних мультифрактальних реалізацій, дозволяють легко перейти від величини діапазону мультифрактального спектру до величини коефіцієнта нормованого розкиду.

У четвертому розділі удосконалено потокову модель мультисервісної комп'ютерної мережі MPLS, що дозволяє враховувати фрактальні властивості трафіку, і на її основі розроблені методи підвищення якості управління трафіком і ресурсами.

В основі архітектури MPLS лежить принцип обміну міток. На межі мережі MPLS маршрутизатор комутації міток LER (Label Edge Router) позначає пакети спеціальними мітками, що визначають подальший маршрут слідування пакета до місця призначення, вказуючи в мітці кожного пакета місце призначення, інформацію про якість обслуговування, шлях слідування пакета до місця призначення та ін.

Усі функції класифікації пакетів за класами на підставі необхідної якості обслуговування QoS, а також реалізацію додаткових сервісів фільтрації, явної маршрутизації, вирівнювання навантаження в мережі та управління трафіком беруть на себе граничні маршрутизатори LER. Таким чином, весь обсяг інтенсивних обчислень припадає на граничну область, а високопродуктивна комутація виконується в ядрі, що дозволяє ефективно оптимізувати конфігурацію пристроїв MPLS залежно від їх розташування в мережі. Процес розподілу міток між маршрутизаторами приводить до встановлення всередині мережі MPLS шляхів з комутацією по мітках LSP (Label Switching Path). Між двома граничними маршрутизаторами (відправником та одержувачем) може існувати декілька альтернативних маршрутів. Основне завдання полягає у виборі оптимального шляху LSP для каналу трафіку із заданими вимогами QoS.

У запропонованій математичній моделі мережа представляється у вигляді графа $G=(V,E)$, де $V=\{1,2,\dots,N\}$ і $E=\{1,2,\dots,M\}$ – множини N маршрутизаторів і M ліній зв'язку між ними. Пряма лінія зв'язку m має місткість u_m (в одиницях / сек). Уся множина вузлів в мережі MPLS розбивається на дві підмножини: $V^+=\{V_i^+, i=1, n_{LER}\}$ – множина граничних маршрутизаторів LER і $V^-=\{V_i^-, i=1, n_{LSR}\}$ – множина комутаторів міток LSR.

У свою чергу кожен елемент множини V^+ може бути і джерелом трафіку, і одержувачем. Якщо маршрутизатор є джерелом трафіку, то розуміється, що на даний маршрутизатор надходить трафік з суміжної мережі (IP, MPLS, ATM або ін.). Трафік має бути доставлений на вузол одержувача, який також є точкою дотику із суміжними мережами. Будемо розглядати випадок, коли кожен граничний маршрутизатор LER є і джерелом, і одержувачем, а LSR не може бути одержувачем трафіку, що надійшов на нього із суміжної мережі.

Припустимо, що в кожен момент $t \in T$ на один із маршрутизаторів надходить трафік інтенсивністю $\lambda(t)$, що належить до одного з класів обслуговування $q \in Q$ з вимогами QoS, якому відповідають значення максимально допустимої затримки τ_q і максимально допустимого відсотку втрат l_q . Весь вхідний трафік розбивається на потоки класів обслуговування $F^q = [f_{P_y}^q(t)]$ таким способом, щоб забезпечити передачу вимог усіх класів $Q(t)$ у повному обсязі.

Тоді множина всіх каналів QoS трафіку Y (в одній лінії зв'язку m може існувати множина каналів $y \in Y$) має вигляд:

$$Y = Y(d_y, P_y, L_y), \quad (2)$$

де d_y – смуга пропускання каналу; $P_y = \{p_y^1, \dots, p_y^{L_y}\}$ – допустима множина шляхів для шляху L_y певна для кожного каналу трафіку.

У цьому випадку інтенсивність трафіку можна позначити як $\lambda_{P_y}^q(t)$, що означає таке: в момент t на граничний маршрутизатор надходить трафік інтенсивністю λ , який належить до q -го класу обслуговування, який необхідно доставити на вихідний маршрутизатор по будь-яких шляхах із множини P_y , щоб не перевищити заданих максимально допустимих значень затримки τ_q і максимально допустимого відсотку втрат.

Кожен вузол мережі V в t -й момент характеризується продуктивністю μ , коефіцієнтом відносних втрат $X_V^q(t) \in X$ і середнім часом очікування пакета в черзі $T_V^q(t) \in T$. На величину втрат для всіх вузлів мережі накладаються обмеження:

$$0 \leq X_V^q(t), \sum_V^{P_y} X_V^q(t) \leq l_q, \quad (3)$$

де $V = \overline{1, P_y}$, l_q – заданий максимальньо допустимий відсоток втрат. Втрати визначаються як відношення кількості відкинутих даних до кількості даних, які надійшли на обслуговування.

Обмеження, що накладаються на час затримки для всіх вузлів мережі $V = \overline{1, P_y}$, визначаються в аналогічний спосіб:

$$0 \leq T_V^q(t), \sum_V^{P_y} T_V^q(t) \leq \tau_q, \quad (4)$$

де $V = \overline{1, P_y}$, τ_q – задане максимальньо допустиме значення затримки.

Значення вартості маршрутизації c_m присвоюється лінії зв'язку m і може залежати від низки параметрів: швидкості, довжини, надійності та ін. Вартість шляху p_y^l дорівнює сумі вартості ліній зв'язку:

$$C_y^l = \sum_{m \in p_y^l} c_m. \quad (5)$$

Якщо $x_y^l(t)$ представляє пропускну здатність, яка спрямовується на допустимий шлях p_y^l каналу передачі у трафіку $\lambda_{p_y}^q(t)$, тоді виконується:

$$\sum_{t \in T; l=1}^{L_y} x_y^l(t) = d_y, \quad \forall y \in Y, \quad \forall l \in \{1, \dots, L_y\}. \quad (6)$$

Загальне навантаження на лінії зв'язку m визначається за формулою:

$$f_m = \sum_{\lambda_{p_y}^q(t) \in Y} \sum_{l=1}^{L_y} a_{y,l}^m x_y^l(t), \quad \forall m \in E, \quad (7)$$

де $a_{y,l}^m = 1$, якщо шлях P_y використовує лінію зв'язку m , $a_{y,l}^m = 0$ в іншому випадку; $x_y^l(t)$ – пропускну здатність відповідно до (6).

Представлена модель дозволяє розробити комплекс методів для оптимізації характеристик і структур мереж із технологією MPLS.

У роботі удосконалено *метод вибору структури мережі* за критерієм мінімальної вартості, в якому потрібно знайти структуру мережі у вигляді набору каналів зв'язку $L_y \in Y$, вибрати пропускну здатності каналів зв'язку d_y і знайти

розподіл потоків $F^q = [f_{P_y}^{q,H,S_{norm}}(t)]$ при заданих значеннях показника Херста $H > 0.5$ і розкиду даних трафіку S_{norm} , таким чином, щоб забезпечити передачу вимог усіх класів $Q(t)$ в повному обсязі. У цьому випадку мінімізації підлягає вартість мережі: $c_{\sum y} = \sum_{P_y} c_y(\{d_y\}) \rightarrow \min$ за всіма значеннями $y \in Y$ при заданих обмеженнях (3-4).

У цьому випадку вираз для середньої затримки має вигляд:

$$\bar{T}_V^q(t) = \frac{1}{Q_{\sum}^{(t)}} \sum_{P_y \in E} \frac{f_{P_y}^q \sum_{V=1}^q f_{P_y}^{(V)}}{f_m}, \quad (8)$$

де $Q_{\sum}^{(t)} = \sum \lambda_{P_y}^q(t)$ – сумарна інтенсивність трафіку; E – множина ліній зв'язку; f_m – загальне навантаження на лінії зв'язку m ; $f_{P_y}^{q,H,S_{norm}}$ – величина потоку q -го класу з показником Херста H і розкидом значень трафіка S_{norm} на каналі P_y в момент часу t .

У методі балансування навантаження вирішується завдання забезпечення ефективності використання мережних ресурсів шляхом рівномірного розподілу навантаження між лініями зв'язку. Величина функції вартості балансування навантаження ϕ_m для лінії зв'язку m визначається на основі загального навантаження на лінію зв'язку f_m (7):

$$\phi_m \geq f_m w_p, \quad \forall m \in E,$$

де w_p – стандартна функція балансування завантаження каналу.

Смисл функції ϕ_m – штрафувати відправку пакетів по лінії зв'язку по мірі збільшення її використання. Повне визначення функції багато в чому залежить від мережі та вимог, що пред'являються до трафіку. В цьому випадку необхідно мінімізувати функцію $\sum_{m \in E} \phi_m$ за всіма лініями зв'язку m . Балансування навантаження QoS трафіку в мережі покращує негативний вплив високопріоритетного трафіку на низькопріоритетний трафік, оскільки високопріоритетний трафік першочергово обслуговується при подачі на вузол зв'язку.

У роботі вдосконалено метод реконфігурації мережі MPLS при відмовах. Передбачається, що в мережі передається q класів потоків відповідно до вимог $Q(t) = \lambda_{P_y}^q(t)$ та показниками QoS (3-4, 8). Введено також обмеження для всіх класів у вигляді $T_V^q(t) \leq T_{зад}^q$. Також задано розподіл потоків всіх класів

$F(q) = \left[f_{P_y}^{q,H,S_{norm}}(t) \right]$ залежно від значень показника Херста та розкиду значень трафіку.

Припустимо, що сталася відмова каналу зв'язку $m_v \in E$. Потрібно реконфігурувати всі маршрути з'єднання каналу зв'язку m_v , який відмовив, таким чином, щоб максимально задовольнити відповідним вимогам, при збереженні інших з'єднань за обсягом трафіку. Тобто потрібно знайти такий розподіл потоків $\left[f_{P_y}^{q,H,S_{norm}}(t) \right]$, при якому забезпечується наступні вимоги:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{L_y: P_y \in \Pi_{L_y}} \lambda_{P_y}^{q(kop)}, \quad T_V^q(F_{kop}^q) \leq T_{зад}^q,$$

де Q_{Σ} – сума потоків із q класами обслуговування відповідно до вимог $Q(t) = \lambda_{P_y}^q(t)$ та показниками QoS; F_{kop}^q – скоригований потік у каналі зв'язку P_y після реконфігурації q -го класу сервісу з показником Херста H і розкидом значень трафіку S_{norm} .

Для оптимальної реконфігурації мережі MPLS спочатку визначаються всі вимоги (з'єднання) L_y , які використовували канал зв'язку P_y , і відключаються тимчасово від мережі і перераховуються потоки в каналі зв'язку $F^q = \left[f_{P_y}^{q,H,S_{norm}}(t) \right]$, $L_y \in Y$. Потім визначаються резерви за пропускними здатностями всіх каналів зв'язку і оптимальним способом перерозподіляються потоки відмовлених вимог так, щоб забезпечити досягнення критерію $Q_{\Sigma} \rightarrow \max$.

Далі для всіх q виконуються підетапи за вищенаведеною схемою. Внаслідок роботи алгоритму знаходяться оптимальні реконфігуровані шляхи LSP для з'єднань L_y , отримали відмову в обслуговуванні через відмову відповідного каналу зв'язку або перевищення вартості. Через обмежену пропускну здатність мережі при цьому деякі сполуки обслуговуватися не будуть. При цьому, враховуючи черговість реконфігурації, відмову в обслуговуванні отримують найменш пріоритетні з'єднання, а величина загального потоку, переданого в мережі після реконфігурації, буде мінімальною.

У роботі запропонований *метод розрахунку вартості маршрутизації* з урахуванням самоподібної структури трафіку, що дозволяє запобігати перевантаженню мережі при пікових викидах трафіку. Вартість шляху C_y^l і пропускну здатність $x_y^l(t)$, яка спрямовується на допустимий шлях, визначаються відповідно до (5-6).

Цільова функція, що мінімізує вартість маршруту на множині шляхів $P_y = \left\{ p_y^1, \dots, p_y^{L_y} \right\}$, виглядає таким чином:

$$\sum_{y \in Y} \sum_{l=1}^{L_y} C_y^l x_y^l(t) \rightarrow \min, \forall y \in Y, l \in \{1, \dots, L_y\}. \quad (9)$$

При проходженні по мережі трафіку із сильними фрактальними властивостями потрібно своєчасне збільшення пропускних здатностей ліній зв'язку. У роботі показано, що при значеннях $H \geq 0,9$ або при персистентному трафіку з нормованим розкидом $S_{norm} \geq 3$ величина втрат даних перевищує 5-10%.

Щоб відобразити зміну самоподібних властивостей потоків, вартості шляхів C_y^l оновлюються в регулярні проміжки часу і перераховуються за формулою

$$C_{new}^l = \begin{cases} C_y^l, & H \leq 0,5; \\ C_y^l + (H - 0,5)C_0, & 0,5 < H < 0,9, S_{norm} \leq 1; \\ C_y^l + (H - 0,5)(S_{norm} - 1)C_0, & 0,5 < H < 0,9, 1 < S_{norm} < 3; \\ C_y^l + C_0, & H \geq 0,9 \text{ або } H > 0,5, S_{norm} \geq 3, \end{cases}$$

де $C_y^l = \sum_{m \in p_y^l} c_m$ визначається згідно з цільовою функцією (9); значення C_0

вибирається адміністратором мережі з урахуванням топології мережі.

Алгоритм маршрутизації не змінюється (вартість шляху $C_{new}^l = C_y^l$), якщо трафік є звичайним пуассонівським потоком ($H = 0,5$) або не має довгострокової залежності ($H < 0,5$). При значеннях $0,5 < H < 0,9$ і малим розкидом даних ($S_{norm} \leq 1$) значення C_y^l збільшується пропорційно значенню показника Херста ($H < 0,5$). При значенні показника Херста $0,5 < H < 0,9$ і великим розкидом даних ($1 < S_{norm} < 3$) значення C_y^l збільшується пропорційно обом характеристикам. Вартість із максимальним значенням $C_y^l + C_0$ призначається при значенні $H \geq 0,9$ або при персистентному трафіку з нормованим відхиленням $S_{norm} \geq 3$.

У п'ятому розділі дисертації наведено результати практичного застосування запропонованих методів і моделей. Широке поширення і розвиток телекомунікаційних мереж MPLS обумовлює необхідність досліджень, розробок і впровадження нових моделей трафіку і методів, які забезпечують отримання оцінок характеристик мережних взаємодій. Моделювання фрактального трафіку надає можливість генерувати реалізації телекомунікаційного трафіку із заданими фрактальними властивостями, досліджувати його вплив на завантаження мережі, адекватно розраховувати необхідні характеристики мережі (розмір буфера, пропускну здатність каналів, затримки в мережі та ін.).

Запропоновані в роботі методи управління ресурсами мережі були протестовані на відкритій платформі графічного моделювання мереж HUAWEI на основі існуючої мережі компанії «Маркет-репорт». Джерелом реалізацій трафіку в експериментах були реалізації реального мережного трафіку, зняті в мережі

компанії «Маркет-репорт», і генеровані за їх параметрами модельні реалізації. Було проведено тестування локальної мережі підприємства «Маркет-репорт» і визначено діапазон параметрів мережного трафіку, який проходить. Тестування показало, що трафік є мультифрактальним із показником Херста $0,6 < H < 1$, нормованим показником розкиду $0,8 < S_{norm} < 2,2$ та інтенсивністю $1500 < X < 10000$ (Мб/с).

У побудованій модельній мережі було проведено дослідження впливу мультифрактальних властивостей трафіку на якість обслуговування мережі, а саме: визначення граничних пропускних здатностей різних фрагментів мережі і залежності втрат пакетів від завантаження окремих вузлів мережі і каналів зв'язку; визначення необхідної пропускної здатності каналів для забезпечення високого рівня якості обслуговування; перерозподіл маршрутів проходження трафіку і перенаправлення найбільш критичних інформаційних потоків на менш завантажені альтернативні вузли та ін.

При проведенні експериментів за допомогою модельних реалізацій трафіку були отримані різні параметри мережі при різноманітних режимах її роботи при різному завантаженні. Було протестовано метод розрахунку вартості маршрутизації з урахуванням фрактальної структури трафіку і метод зміни напрямку потоків за допомогою методу балансування навантаження в мережі для рівномірного використання каналів передачі трафіку різних класів.

В табл. 1 наведені узагальнені оцінки параметрів якості обслуговування, які свідчать про переваги управління потоками даних у мережі за допомогою методів балансування навантаження та розрахунку вартості маршрутизації. Результати експерименту показали, що використання методу розрахунку вартості маршрутизації значно підвищує якість обслуговування в мережі, однак застосування цього методу є досить ресурсоємним і, отже, дорогим. Застосування методу балансування навантаження також підвищує якість обслуговування в мережі, а ресурсів потребує менше і є дешевшим. Таким чином, можна вибрати метод, який буде найбільш прийнятним для кожної конкретної мережі.

Таблиця 1 – Середні оцінки параметрів якості функціонування мережі

Методи \ Оцінки	Середній коефіцієнт завантаженості каналу	Середнє значення втрачених даних, %	Середнє значення джиттера, мс	Середнє значення MOS
Без методів підвищення QoS	0,7	3,6	97	2
Метод балансування навантаження	0,65	2,5	79	3,2
Метод розрахунку вартості маршрутизації	0,61	1,8	40	4

Використання розроблених у дисертаційній роботі методів оптимізує управління трафіком, дозволяє динамічно розподіляти мережні ресурси, зменшує

частку ручної праці при технічному обліку мережних ресурсів, зменшує витрати за рахунок моделювання мережі, підвищує якість обслуговування мережі. Результати експериментів були реалізовані і вони забезпечили такий ефект: підвищення ступеня використання каналів передачі даних, за рахунок перенаправлення найбільш критичних інформаційних потоків на менш завантажені альтернативні канали; підвищення якості обслуговування на 17%; зменшення втрат даних до 1,8%. Результати досліджень впроваджені і використовуються в компанії «Маркет-репорт», що підтверджено відповідним актом впровадження.

У додатках наведені документи щодо впровадження результатів досліджень та розрахункові дані, що потрібні для моделювання реалізацій мультифрактального трафіку.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена модифікації методів маршрутизації інформаційних потоків в мультисервісних комп'ютерних мережах, які враховують фрактальні властивості трафіку і дозволяють забезпечити високий рівень якості обслуговування. Аналіз отриманих у дисертаційній роботі наукових і практичних результатів дозволяє зробити такі висновки.

1. Проведено огляд і аналіз сучасного стану теорії фрактального мережного трафіку, методів управління потоками даних і ресурсами мультисервісних комп'ютерних мереж та впливу фрактальних властивостей трафіку на якість обслуговування в мережі.

2. Розглянуто основні методи і моделі забезпечення якості обслуговування в мультисервісних комп'ютерних мережах з точки зору застосування їх при передачі по мережі фрактального трафіку. Проведено аналіз механізму впливу протоколу TCP на самоподібність мережного трафіку, і за допомогою імітаційного моделювання виконано дослідження механізмів управління перевантаженням для різних протоколів TCP.

3. Методами імітаційного моделювання виконано порівняння показників якості обслуговування мережі для найбільш затребуваних алгоритмів маршрутизації при пуассонівському і самоподібному вхідному трафіку. На підставі результатів досліджень запропоновано рекомендації щодо вибору алгоритмів маршрутизації в мультисервісних мережах із фрактальним трафіком у залежності від мережних параметрів і характеристик.

4. Отримала подальший розвиток модель мультифрактального процесу на основі біноміального стохастичного каскаду шляхом визначення значень параметрів моделі для моделювання різних видів трафіку із заданими параметрами самоподібності та функцією мультифрактального спектру. Це дозволяє застосовувати її як генератор реалізацій трафіку для імітаційного моделювання мультисервісних комп'ютерних мереж.

5. Проведено імітаційне моделювання завантаженості каналу мережі від параметрів мультифрактального трафіку, який проходить, що дозволяє при заданих розмірах буферної пам'яті і пропускну здатності каналу визначати

гранично допустиме навантаження даної мережі. Для перевірки адекватності моделі використовувався метод перевірки статистичної гіпотези про рівність середніх значень черги і втрат даних.

6. Запропоновано вдосконалену математичну модель мережі MPLS, яка представляється у вигляді графа, що містить набір маршрутизаторів і ліній зв'язку між ними. Усі значення параметрів моделі мають залежність від часу. Така модель дозволяє описувати поведінку MPLS-мережі в часі для різних класів обслуговування вхідного трафіку, при заданих обмеженнях на час очікування пакета в черзі і кількість втрачених пакетів.

7. На основі розробленої MPLS-моделі отримали подальший розвиток такі методи управління ресурсами мережі, які враховують фрактальні властивості трафіку: вибір оптимальної структури мережі за критерієм мінімальної вартості при обмеженнях на показники якості обслуговування; мінімізація вартості маршрутизації; балансування навантаження в мережі для рівномірного використання каналів передачі трафіку різних класів; реконфігурація мережі MPLS при відмовах.

8. Запропоновано метод оцінки вартості маршрутизації, який заснований на обліку фрактальних властивостей мережевого трафіку і заданих обмеженнях на час очікування і кількість втрачених пакетів. Сукупність запропонованих методів дозволяє підвищити швидкість передачі даних, більш рівномірно розподілити навантаження і підвищити якість обслуговування трафіку різних класів у мережі MPLS.

9. З використанням розробленого генератора фрактального трафіку проведено імітаційне моделювання запропонованих методів маршрутизації в мережах MPLS, яке показало можливість оптимізації управління трафіком і динамічного розподілу мережних ресурсів.

10. Результати проведених чисельних експериментів були реалізовані в корпоративній мережі компанії «Маркет-репорт» і забезпечили такий ефект: підвищення ступеня використання каналів передачі даних за рахунок перенаправлення найбільш критичних інформаційних потоків на менш завантажені альтернативні канали, підвищення якості обслуговування на 17%, зменшення втрат даних до 1,8%.

11. Розроблені моделі та методи впроваджені в компанії «Маркет-репорт», де вони використовуються для запобігання перевантаженню вузлів мережі за рахунок перерозподілу потоків даних на критичних ділянках. Також результати роботи впроваджені в навчальний процес у Харківському національному університеті радіоелектроніки, що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kirichenko, L. Modeling telecommunications traffic using the stochastic multifractal cascade process // L. Kirichenko, T. Radivilova, E. Kayali // Problems of Computer Intellectualization / ed. K. Markov, V. Velychko, O. Voloshin. – Kiev–Sofia: ITNEA. – 2012. – P. 55–63. (стаття у колективній монографії).

2. Кириченко, Л. О. Исследование нелинейной динамики изменения окна перегрузки TCP протокола / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, А. В. Карпухин, А. В. Борисов, Э. Кайали // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2010. – №5. – С. 281–286.

3. Кириченко, Л. О. Влияние методов маршрутизации на качество обслуживания в мультисервисных сетях при самоподобной нагрузке / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2011. – 1/2 (49). – С. 15–18. (Входит до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, РИНЦ, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, American Chemical Society, ResearchBib, Directory Indexing of International Research Journals.)

4. Кириченко, Л. О. Анализ методов повышения QoS в сетях MPLS с учетом самоподобия трафика / Л. О. Кириченко, Э. Кайали, Т. А. Радивилова // *Системні технології*. – 2011. – Вип. 3. – С. 52–59.

5. Кириченко, Л. О. Моделирование телекоммуникационного трафика с использованием стохастических мультифрактальных каскадных процессов / Л. О. Кириченко, К. А. Демерчян, Э. Кайали, А. Ю. Хабачёва // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2012. – №1 (26). – С. 48–53. (Входит до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, INSPEC, INIS, EBSCO, DOI, Ulrich's.)

6. Радивилова, Т. А. Описание модели сети MPLS и методов управления трафиком / Т. А. Радивилова, Э. Кайали // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2012. – Вип. 3 (23). – С. 184–189.

7. Кириченко, Л. О. Расчет стоимости маршрутизации в сети MPLS с учетом фрактальных свойств трафика / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. – 2012. – Вып. 161. – С. 116–121.

8. Кайали, Э. Исследование влияния методов маршрутизации на качество обслуживания в сети при передаче самоподобного трафика / Э. Кайали *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 14-й междунар. молодежный форум, материалы конф.* – Харьков, 2010. – С. 298.

9. Кириченко, Л. О. Анализ функционирования протоколов маршрутизации при передаче самоподобного трафика / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // *Современные информационные и электронные технологии: 10-я междунар. науч.-практич. конф., 24-28 мая 2010 г.: труды конф.* – Одесса, 2010. – Т.1. – С. 141.

10. Кириченко, Л. О. Сравнительный анализ методов маршрутизации IGRP, EIGRP, OSPF при входном самоподобном трафике / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // *Автоматика – 2010: 17-а міжнар. конф. з автомат. упр., 27–29 вересня 2010 р.: тези доп.* – Харків, 2010. – Т. 2. – С. 231–232.

11. Кайали, Э. Исследование влияния самоподобия трафика на качество обслуживания в сети MPLS / Э. Кайали // *Радиоэлектроника и молодежь в XXI век: 15-й юбилейн. междунар. молодежный форум, материалы конф.* – Харьков, 2011. – С. 171.

12. Кириченко, Л. О. Управление самоподобным трафиком и ресурсами сети в MPLS / Л. О. Кириченко, Э. Кайали, Т. А. Радивилова, Л. Э. Чалая // Современные информационные и электронные технологии: 11-я междунар. науч.-практич. конф., 23-27 мая 2011 г.: труды конф. – Одесса, 2011. – С. 132.

13. Кириченко, Л. О. Моделирование мультифрактального телекоммуникационного трафика / Л. О. Кириченко, Э. Кайали, Т. А. Радивилова // Математичне моделювання та інформаційні технології (ММІТ-2011): Десята всеукр. наук.-техн. конф., 23-25 листопада 2011 р.: зб. тез. – Одеса, 2011. – С. 94–95.

14. Кириченко, Л. О. Моделирование и анализ характеристик стохастических мультифрактальных каскадных процессов / Л. О. Кириченко, К. А. Демерчян, Э. Кайали, А. Ю. Хабачёва // Інформаційні технології в освіті науки і техніці (ІТОНТ-2012): Міжнар. наук.-практ. конф., 25–27 квітня 2012 р.: тези доп. – Черкаси, 2012. – Т. 1. – С. 163–164.

15. Кириченко, Л. О. Управление мультифрактальным трафиком в сети MPLS / Л. О. Кириченко, Э. Кайали, Т. А. Радивилова // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: VI Міжнар. наук.-практ. Конф., 19–21 вересня 2012 р.: тези доп. – Запоріжжя, 2012. – С. 222–224.

16. Kirichenko, L. O. Modeling telecommunications traffic using the stochastic multifractal cascade process / L.O. Kirichenko, T.A. Radivilova, E. Kayali // Knowledge – Dialogue – Solution (KDS 2012): XVIII International Conference, September 10-12, 2012. – Kyiv, 2012. – P. 8.

АНОТАЦІЯ

Іяс Каялі Ріад Вафаа. Методи маршрутизації самоподібних інформаційних потоків у мультисервісних комп'ютерних мережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2014.

Дисертаційна робота присвячена модифікації методів маршрутизації інформаційних потоків у мультисервісних комп'ютерних мережах, які враховують фрактальні властивості трафіку і дозволяють забезпечити високий рівень якості обслуговування.

Набула подальший розвиток модель мультифрактального процесу, яка заснована на побудові біноміального стохастичного каскаду, шляхом визначення діапазонів параметрів моделі, що дозволяють моделювати різні типи фрактальних трафіків. Це дозволило отримати генератор трафіку для імітаційного моделювання комп'ютерних мереж.

Удосконалено модель мережі MPLS, що дозволяє описувати поведінку в часі для різних класів обслуговування фрактального трафіку для заданих обмежень. Розроблено методи управління інформаційними потоками, які враховують фрактальні властивості трафіку. Розроблені методи управління трафіком і ресурсами комп'ютерних мереж дозволяють забезпечити задану якість

послуг і підвищити ефективність використання устаткування і каналів передачі в умовах самоподібного навантаження.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, модель мережі MPLS, методи управління трафіком, самоподібний та мультифрактальний мережний трафік, показник Херста.

АННОТАЦІЯ

Эйаз Кайали Риад Вафаа. Методы маршрутизации самоподобных информационных потоков в мультисервисных компьютерных сетях. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена модификации методов маршрутизации информационных потоков в мультисервисных компьютерных сетях, которые учитывают фрактальные свойства трафика и позволяют обеспечить высокий уровень качества обслуживания.

Проведен анализ механизма воздействия протокола TCP на самоподобие сетевого трафика и с помощью имитационного моделирования выполнено исследование механизмов управления перегрузкой для различных протоколов TCP. Показаны достоинства и недостатки каждого протокола при самоподобном трафике. В работе проведены численные исследования влияния фрактальных свойств трафика на показатели качества обслуживания мультисервисных сетей. Выполнено сравнение показателей качества обслуживания сети для наиболее востребованных алгоритмов маршрутизации при пуассоновском и самоподобном входном трафике. На основании результатов исследований предложены рекомендации по выбору алгоритмов маршрутизации в мультисервисных сетях с фрактальным трафиком в зависимости от сетевых параметров и характеристик.

Получила дальнейшее развитие модель мультифрактального процесса, основанная на построении биномиального стохастического каскада. Предложена итерационная процедура построения консервативного стохастического каскада с бета-распределением весовых коэффициентов. Численно исследованы мультифрактальные свойства каскадов, порождаемых бета-распределениями с разными значениями параметров. Получены численные зависимости, которые значениям показателя Херста ставят в соответствие различные функции мультифрактального спектра. Определены диапазоны значений параметров модели, которые позволяют моделировать различные типы трафика с фрактальными свойствами. Это дает возможность получить генератор реализаций трафика для имитационного моделирования компьютерных сетей.

Предложена усовершенствованная математическая модель сети MPLS, которая позволяет описывать поведение MPLS-сети во времени для различных классов обслуживания входящего трафика, при заданных ограничениях на время ожидания пакетов в очереди и количество потерянных пакетов. На основе

разработанной MPLS-модели получили дальнейшее развитие методы управления трафиком и ресурсами сети, которые учитывают фрактальные свойства трафика: выбор оптимальной структуры сети по критерию минимальной стоимости, балансировка нагрузки в сети для равномерного использования каналов передачи трафика различных классов, реконфигурация сети MPLS при отказах. Предложен метод оценки стоимости маршрутизации, который основан на учете фрактальных свойств сетевого трафика и заданных ограничениях на время ожидания и количество потерянных пакетов. Совокупность предложенных методов позволяет повысить скорость передачи данных, более равномерно распределить нагрузку и повысить качество обслуживания трафика различных классов в сети MPLS.

С использованием разработанного генератора фрактального трафика проведено имитационное моделирование предложенных методов маршрутизации в сетях MPLS, которое показало возможность оптимизации управления трафиком и динамического распределения сетевых ресурсов. Разработанные модели и методы внедрены на предприятии, где они используются для предупреждения перегрузки узлов сети за счет перераспределения потоков данных на критических участках.

Ключевые слова: компьютерная сеть, модель сети MPLS, методы управления трафиком, самоподобный и мультифрактальный сетевой трафик, показатель Херста.

ABSTRACT

Eyas Kayali Ryad Wafaa. Routing methods of self-similar information flows in multiservice computer networks. – As the Manuscript.

Dissertation for a candidate of technical science (Ph.D.) degree in specialty 05.13.05 – computer systems and components. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2014.

The dissertation is devoted to the modification of the methods of routing information flows in multiservice computer networks, which allow provide a high level service quality by taking account the fractal properties of the traffic

The model of multifractal process based on the construction of the binomial stochastic cascade is developed. The ranges of model parameters which allow to simulate different types of fractal traffic are estimated. This enabled to get traffic generator for simulation of computer networks.

An improved model of network MPLS, which allows to describe the behaviour in time for the different classes of service is introduced. Traffic management methods which take into account the fractal properties of the traffic are developed. The totality of the proposed methods can improve the speed of data transmission, more uniformly distribute the load and improve the quality of service of different classes of traffic in the network MPLS.

Keywords: computer network, model MPLS, traffic management techniques, self-similar and multifractal network traffic, Hurst exponent.

Підп. до друку __.__.__.
Умов. друк. арк. 0,9.
Ціна договірна.

Формат 60x84 1/16.
Облік. вид. арк. 1,0.
Зам. №

Спосіб друку – ризографія.
Тираж 100 прим.

ХНУРЕ, Україна, 61166, Харків, просп. Леніна ,14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Леніна, 14