

Міністерство освіти і науки України  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О.С. ПОПОВА

**ЛЄВЄНБЕРГ ЄВГЕН ВАДИМОВИЧ**

УДК 621.391

**ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ  
САМОПОДІБНОГО ТРАФІКА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
Ложковський Анатолій Григорович,  
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
завідувач кафедри комутаційних систем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
Климаш Михайло Миколайович,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри телекомунікацій

кандидат технічних наук,  
Ляховецький Леонід Михайлович,  
ДП «Одеський науково-дослідний інститут зв'язку»,  
заступник директора з наукової роботи,  
начальник лабораторії цифрових систем передавання

Захист відбудеться 04 грудня 2019 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.816.01, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, вул. Кузнечна, 1, 65029, м. Одеса.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова, вул. Кузнечна, 1, 65029, м. Одеса.

Автореферат розісланий 31 жовтня 2019 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради, к.т.н.



Д.М. Степанов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Для телекомунікаційних систем і мереж оцінка характеристик якості обслуговування (*QoS*) трафіка є однією із найважливіших наукових задач дослідження, яка завжди виконується на основі математичного опису реакції системи на вхідні потоки заявок трафіка. У мультисервісних мережах з пакетними технологіями передавання й комутації інформації пакетному трафіку притаманні «пачкування» (*burstiness*) пакетів та значно більший рівень нерівномірності інтенсивності надходження пакетів, ніж це передбачено класичною моделлю пуассонівського потоку. Визначено, що пакетний трафік – це фрактальний процес з самоподібними властивостями та певним значенням показника Херста. Але для такої моделі трафіка ще не існує належних методів розрахунку і часто на практиці оцінка характеристик якості обслуговування мультисервісних мереж зв'язку виконується наближеними методами та засобами імітаційного моделювання.

Модель самоподібного (*self-similar*) трафіка широко застосовується для пакетних мереж зв'язку, однак достовірність оцінок якості обслуговування існуючими методами є сумнівною. Результати моделювання показують, що, наприклад, наближені оцінки Норроса сильно завищені. Однією з причин цього є невідповідність визначеного показника Херста, на якому й основана формула Норроса, реальному коефіцієнту самоподібності трафіка. Отже підвищити точність розрахунку характеристик *QoS* пакетного трафіка можна шляхом отримання уточненої формули розрахунку коефіцієнта самоподібності (показника Херста) в залежності від параметрів обраної математичної моделі самоподібного трафіка, тобто імовірнісного розподілу параметрів трафіка.

Дослідженню самоподібного трафіка та оцінці характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка приділено багато уваги і цими питаннями займалися такі вчені, як Д.В. Агеев, Г.А. Кучук, А.Г. Ложковський та ін. Серед закордонних вчених, що вивчали цю проблему, варто відзначити: I. Norros, W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson, B.B. Петров, O.I. Шелухін, С.В. Ільницький, А.І. Костромітський та ін.

Якість обслуговування трафіка пакетної мережі зв'язку забезпечується маршрутизаторами за рахунок організації вхідних черг пакетів. Використання черг усуває проблеми перевантаження у моменти бурхливого зростання інтенсивності трафіка. Однак при переповненні черги пакети втрачаються і втрата вже 10% пакетів суттєво впливає на продуктивність мережі. Якщо ж для недопущення переповнення збільшити розмір черги, то це суттєво впливає на середній час затримки пакетів та її нерівномірність (джитер). Окрім цього зі зростанням ступеня самоподібності пакетного трафіка імовірність втрати та середній час затримки пакетів у системі ще більше погіршуються порівняно з випадком трафіка аналогічної інтенсивності, але без ефекту самоподібності.

Отже, дослідження параметрів трафіка пакетних мереж зв'язку, визначення його математичної моделі та на її основі розробка нових методів розрахунку характеристик *QoS* в мультисервісних мережах зв'язку шляхом уточнення коефіцієнта самоподібності трафіка є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Напряом дисертаційного дослідження пов'язаний з концепцією розвитку зв'язку України і з пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки на період до 2020 року Закону України "Про внесення змін до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» № 2519-VI від 09.09.2010.

В дисертації надано результати наукових досліджень, виконаних автором в НДР ОНАЗ ім. О.С. Попова за темами: «Моделі самоподібного трафіку мультисервісних мереж зв'язку», № 0115U007077, 2015; «Удосконалення технологій побудови та методів проектування телекомунікаційних мереж із використанням адекватних математичних моделей трафіка», № 0116U003632, 2016-2017; «Дослідження параметрів самоподібного трафіка та їх впливу на характеристики якості обслуговування», № 0118U100372, 2018.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення точності розрахунку характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка мультисервісної мережі зв'язку. Засобом досягнення мети є вирішення наступних задач:

- аналіз статистичних параметрів потоків трафіка сучасних мереж зв'язку, побудованих за технологією комутації пакетів;
- аналіз моделі трафіка мультисервісної мережі зв'язку з пакетними технологіями передавання й комутації інформації;
- аналіз методів розрахунку характеристик якості обслуговування та дослідження сфер їх застосування;
- розробка імітаційної моделі системи розподілу інформації (СРІ) для обслуговування самоподібного трафіка з різноманітними ймовірнісними законами розподілу його параметрів;
- статистичне моделювання, аналіз результатів і визначення оцінки точності результатів моделювання та точності застосованих методів;
- удосконалення методів оцінки характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка в мультисервісній мережі.

*Об'єкт дослідження* – процеси передавання й комутації пакетного трафіка мультисервісних мереж зв'язку.

*Предмет дослідження* – методи розрахунку характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка мультисервісних мереж зв'язку.

*Методи дослідження.* Дослідження дисертаційної роботи виконано із застосуванням теорії систем масового обслуговування, теорії телетрафіка та теорії ймовірностей. За допомогою методів апроксимації, математичної статистики та критерію узгодженості удосконалено методи розрахунку ступеня самоподібності трафіка пакетних мереж зв'язку та запропоновано нову ймовірнісну функцію розподілу станів одноканальної системи з нескінченною чергою; за допомогою теорії телетрафіка оцінено характеристики якості обслуговування. Для оцінки точності запропонованих рішень застосовано методи імітаційного моделювання з використанням методів математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Удосконалено метод оцінки ступеня самоподібності пакетного трафіка шляхом розрахунку показника Херста  $H$  із апроксимації вперше встановленої його нелінійної залежності від параметру  $a = 1 \dots 2$  форми розподілу Парето, яким представлено математичну модель трафіка, що знижує похибку розрахунку показника Херста з максимальних значень 15 % до 3 %.

2. Удосконалено метод оцінки ступеня самоподібності пакетного трафіка шляхом розрахунку показника Херста  $H$  із апроксимації вперше встановленої його нелінійної залежності від параметру  $a = 0 \dots 1$  форми розподілу Вейбулла, яким представлено математичну модель трафіка, що знижує похибку розрахунку показника Херста з максимальних значень 45 % до 3 %.

3. Удосконалено метод розрахунку характеристик  $QoS$  самоподібного трафіка в одноканальній системі з нескінченною чергою шляхом використання для цього показника Херста, який визначається з відповідної апроксимації залежності показника Херста від параметра форми розподілу Парето або Вейбулла, що зменшило похибку розрахунку характеристик  $QoS$  на порядок.

4. Вперше запропоновано апроксимацію імовірнісної функції розподілу станів одноканальної системи з нескінченною чергою, коли ця функція не залежить від моментів надходження до системи пакетів самоподібного трафіка, а апроксимацією є експонентна функція з параметром розподілу  $\rho / N$ .

5. Удосконалено метод розрахунку імовірності очікування обслуговування та середнього часу затримки пакетів у накопичувальному буфері одноканальної системи з нескінченною чергою шляхом застосування для цього апроксимуючої функцій розподілу станів системи, яка не залежить від моментів надходження до системи пакетів самоподібного трафіка.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що запропоновані в роботі методи оцінки ступеня самоподібності та характеристик якості обслуговування пакетного трафіка можуть бути використаними для:

- достовірного аналізу, синтезу і прогнозування якості функціонування сучасних СРІ в умовах обслуговування мультисервісного трафіка;
- пошуку оптимальних шляхів модернізації існуючих мереж зв'язку і підвищення якості надання телекомунікаційних послуг;
- прийняття обґрунтованих і взаємопов'язаних рішень при розробці високоефективної і надійної телекомунікаційної техніки нового покоління.

Результати досліджень підвищують ефективність використання пакетних мереж зв'язку для передачі повідомлень всіх послуг – відео, даних, мови. Основні наукові положення можуть бути використані промисловими і науково-дослідними організаціями при розробці і модернізації мультисервісних мереж зв'язку з пакетними технологіями передавання й комутації інформації.

Ключові результати дисертаційної роботи впроваджено на виробництві та навчальному процесі ОНАЗ ім. О.С. Попова (акти у Додатку до дисертації).

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: [2] – розробка критеріїв вибору пакетів мови та даних з черги; [3-5, 16, 17] – імітаційні моделі та визначення точності апроксимації залежності показника Херста від параметра форми розподілу; [6-8, 11-14, 18] – дослідження методів розрахунку характеристик якості обслуговування та оцінка їх точності; [9] – аналіз комплексних характеристик якості транспортної телекомунікаційної мережі, що включають і характеристики якості обслуговування.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи представлялись на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях і семінарах:

- 72 та 73 НТК професорсько-викладацького складу, аспірантів та магістрантів – Одеса. – 2017, 2018 р.;
- VII і VIII міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє». – Одеса. – 2017, 2018 р.;
- IV міжнародна НТК «Problems of Infocommunications. Science and Technology», PIC S&T'2017. – Харків. – 2017 р.;
- XVIII міжнародна НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», ВОТТП. – Одеса. – 2018 р.;
- I міжнародна НПК «Наукоємкі технології в інфокомунікаціях», НІСТ'2018. – Харків. – 2018
- II міжнародна НТК «International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics», UkrMiCo'2018. – Одеса. – 2018 р.;

Крім цього робота представлена на науково-методичному семінарі кафедри комутаційних систем ОНАЗ ім. О.С. Попова.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 19 наукових праць, з яких: 10 – статті (1 особисто) у фахових наукових виданнях, які рекомендовані ДАК МОН України, статті [1-8] включені до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus та [1-9] у Google Scholar; 1 – стаття (особисто), опублікована в іноземному фаховому виданні [10]; 9 тез доповіді (2 особисто) – у матеріалах міжнародних конференцій та семінарів [11-19], з них 2 індексовано у наукометричній базі Scopus [11, 12].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота обсягом 130 сторінок основного тексту складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 116 найменувань на 12 сторінках, 3 додатків на 3 сторінках. Дисертація містить 22 ілюстрації та 10 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, розкрито сутність і стан наукової задачі, сформульовано мету і наукову новизну роботи, визначено основні завдання та практичну цінність отриманих результатів, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі – «Аналіз моделі трафіка телекомунікаційних мереж з пакетними технологіями комутації й передавання інформації» – проведено аналіз основних публікацій за темою дисертації; розглянуто особливості формування потоків трафіка та його параметри; досліджено математичну модель пачкового трафіка та його властивість самоподібності.

У мультисервісних мережах зв'язку з пакетними технологіями комутації й передавання інформації модель трафіка (потоки пакетів) суттєво відрізняється від відомої моделі пуассонівського потоку. Пакетний трафік формується множиною джерел запитів на надавані мережею послуги та мережними додатками, що забезпечують послуги передавання відео, даних, мови та ін. Інтенсивність навантаження результуючого потоку пакетів у кожний момент часу залежить від того, якими додатками обслуговуються джерела вимог і яке співвідношення їхньої кількості для різних додатків. На структуру трафіка впливають й технологічні особливості алгоритмів обслуговування. Наприклад, якщо у протоколах застосовується повторна передача невірно прийнятих пакетів, то моменти виникнення вимог на встановлення сеансів зв'язку сильно корелюються. Через це вхідні потоки пакетів значно змінюються й у сумарному трафіку з'являються довгострокові залежності в інтенсивності надходження пакетів. Отже, пакетний трафік уже не є простою сумою множини незалежних стаціонарних і ординарних потоків, що властиво пуассонівським потокам. Об'єднаному потоку пакетів властиве так зване «пачкування» пакетів трафіка (*burstiness*) з випадковою періодичністю та тривалістю піків навантаження.

Математична модель пакетного трафіка формується на базі статистичних даних про кількість переданих пакетів на одиницю часу або тривалості інтервалів часу між ними. На рис. 1 показані результати вимірів параметрів трафіка пакетної мережі зв'язку, а саме кількість пакетів по фіксованих інтервалах часу тривалістю, яка дорівнює середньому часу обслуговування одного пакета даних (співпадає з інтенсивністю навантаження  $\Lambda$ ).

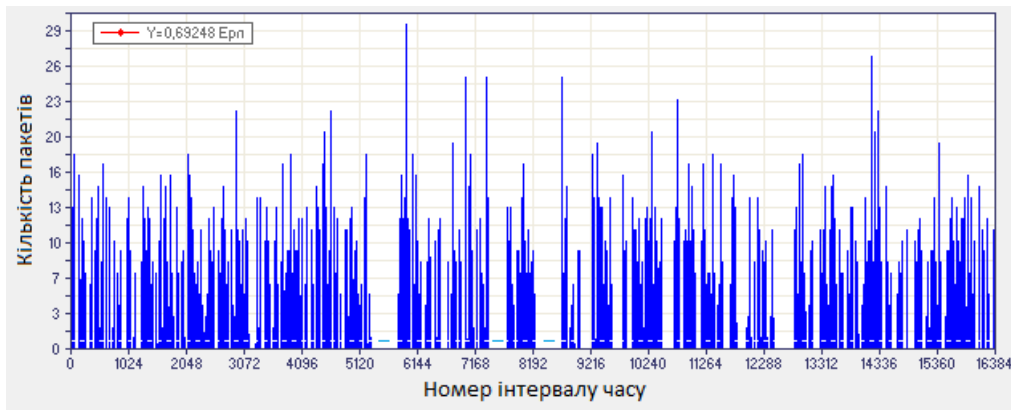


Рис. 1 – Статистичні результати вимірів параметрів пакетного трафіка

З рис. 1 видно, що пакетному трафіку властива сильна нерівномірність інтенсивності потоку пакетів. Пакети не плавно розосереджені по різних інтервалах часу, а групуються в «пачки» в одних, і цілком відсутні або їх дуже мало в інших. Тому в пачковому трафіку за порівняно невеликого середнього значення інтенсивності пакетів присутні значні викиди. Наприклад, для трафіка рис. 1 середнє значення інтенсивності є 0,69 пакети за середній час тривалості його обслуговування (штрихова лінія), а деякі викиди досягають значень до 20 і більше пакетів. Дослідженнями встановлено, що функція розподілу інтервалу часу між моментами надходження пакетів має вид, вказаний на рис. 2.

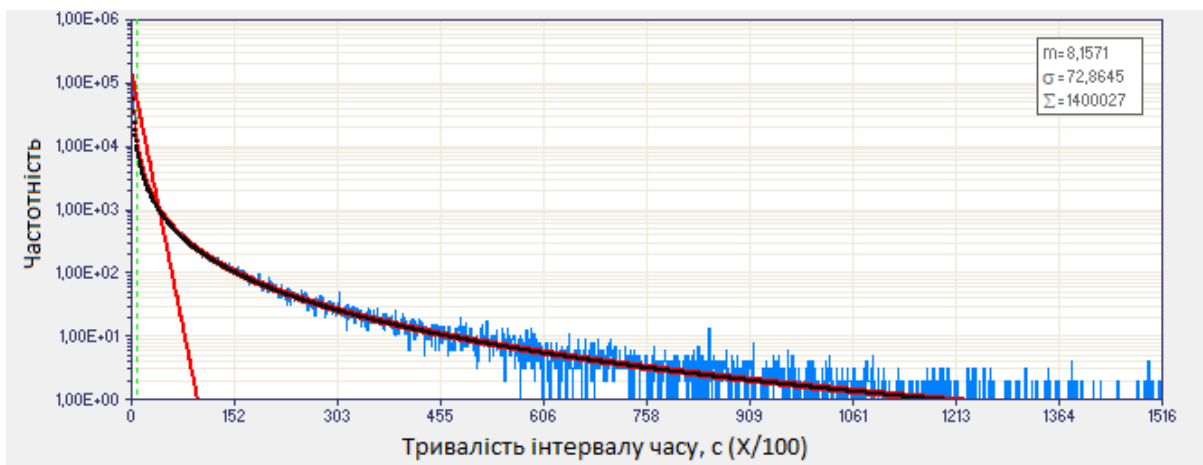


Рис. 2 – Апроксимація інтервалу часу між пакетами

Графіки на рис. 2 підтверджують, що результати статистичної обробки даних вимірів краще узгоджуються не з функцією експонентного розподілу (пряма лінія через логарифмічну шкалу), а з функціями, що мають так званий «важкий хвіст», більш вагомий, ніж за експонентного розподілу. При цьому гістограми реальних вимірів апроксимуються розподілами Парето та Вейбулла.

«Важкий хвіст» означає, що в процесі надходження пакетів існують дуже довгі інтервали пауз й їхня частка велика. Розподіли з «важким хвостом» дозволяють обґрунтувати пачкування трафіка – якщо є тривалі інтервали часу,



на яких немає жодного пакета, то, щоб «втримати» загальну середню кількість пакетів, на інших інтервалах часу ці вимоги «компенсуються» надто значною їх кількістю. Тому імовірнісний розподіл кількості пакетів на одиницю часу для трафіка з великою часткою інтервалів часу, на яких немає жодного пакета, має значну ймовірність нульової кількості вимог.

Для самоподібного трафіка, математична модель якого подається розподілами Парето або Вейбулла, коефіцієнт варіації інтервалу часу між пакетами  $v_z$  та пікфактор трафіка  $S$  істотно зростають у порівнянні з іншими моделями. Значення обох параметрів пропорційні показнику Херста  $H$ , який змінюється в межах від 0,5 до 1, однак не є однаковими за однакового  $H$  для різних законів розподілу, а тому й характеристики  $QoS$  будуть не однаковими.

На основі аналізу моделі пакетного трафіка телекомунікаційних мереж сформульовано напрямки та задачі досліджень.

Дослідження розділу 1 опубліковано у роботах [9, 12, 13, 16, 18].

**У другому розділі** – «Оцінка показника самоподібності та підвищення точності його визначення за різних моделей пакетного трафіка» – досліджено залежність показника Херста від параметру форми розподілу Парето та Вейбулла; удосконалено метод розрахунку ступеня самоподібності трафіка пакетних мереж зв'язку, математична модель якого представлена імовірнісними розподілами Парето і Вейбулла; удосконалено метод розрахунку характеристик  $QoS$  самоподібного трафіка в одноканальній системі з нескінченною чергою.

Трафік пакетних мереж зв'язку можна представити як часовий ряд кількості пакетів по фіксованим відрізкам часу. Для аналізу динаміки часових послідовностей застосовується статистичний  $R/S$ -аналіз, створений Г. Херстом. Ним у статистичних даних пакетного трафіка виявляють швидко змінюваність інтенсивності трафіка (сплески інтенсивності або пачкування), фрактальність (самоподібність), наявність періодичних і неперіодичних циклів (через певні протоколи передачі). Практично ступінь самоподібності пакетного трафіка або реальний показник Херста визначається методом найменших квадратів на основі статистичної обробки результатів вимірів параметрів трафіка.

В математичній моделі пакетного трафіку інтервал часу між пакетами самоподібного трафіка описується розподілами Парето або Вейбулла. Параметр  $a$  форми розподілу Парето (*shape parameter*) і показник Херста  $H$  прийнято вважати, що пов'язані залежністю  $H = \frac{3-a}{2}$  при  $a = 1 \dots 2$ . Параметр  $a$  форми розподілу Вейбулла і показник Херста  $H$  прийнято вважати, що пов'язані залежністю  $H = \frac{2-a}{2}$  при  $a = 0 \dots 1$ . Проте, дослідження показують, що для цих розподілів нема лінійної залежності показника Херста  $H$  від параметра форми  $a$ .

Результати розрахунку показника Херста за різних значень параметра  $a$  форми розподілу Парето, за яким моделювався інтервал часу між пакетами трафіка, наведено на рис. 3, з якого видно, що реальний показник Херста  $HR$  (пунктирна крива) залежить від параметра форми розподілу Парето не лінійно.

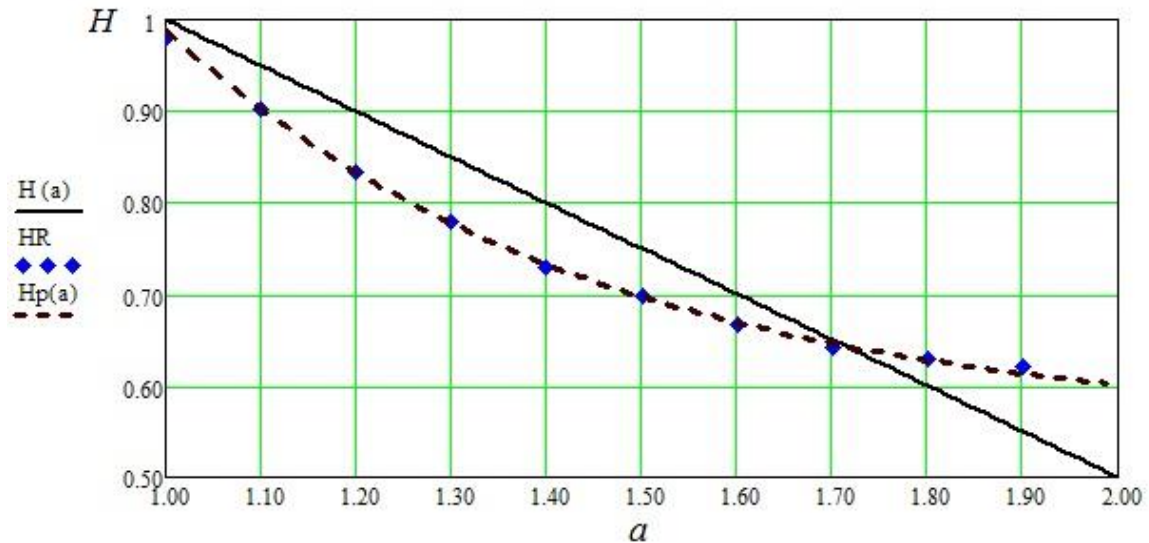


Рис. 3 – Апроксимація показника Херста  $H$  для трафіка, модельованого за законом Парето.

Для розрахунку показника Херста самоподібного трафіка, описуваного розподілом Парето, запропоновано апроксимацію виду

$$H_P = 4^{(1-1,6a)} + 0,554, \quad (1)$$

де  $a$  – параметр форми розподілу Парето.

Апроксимація (1) показника Херста (штрихова лінія рис. 3) забезпечує точність розрахунку  $H_P$  з похибкою до 3 %, що підвищує на порядок точність розрахунку характеристик  $QoS$  у порівнянні з їх розрахунком при використанні формули лінійної залежності  $H$  від  $a$ .

З урахуванням апроксимації (1) та формули Норрса у системі  $P/D/1/\infty$  середня кількість вимог системи  $N$  розраховується так:

$$N = \frac{\frac{0,5}{\rho^{1-H_P}}}{\frac{H_P}{(1-\rho)^{1-H_P}}}. \quad (2)$$

Результати розрахунку показника Херста за різних значень параметра  $a$  форми розподілу Вейбулла, за яким моделювався інтервал часу між пакетами трафіка, наведено на рис. 4, з якого видно, що реальний показник Херста  $HR$  (пунктирна крива) не лінійно залежить від параметра  $a$  розподілу Вейбулла.

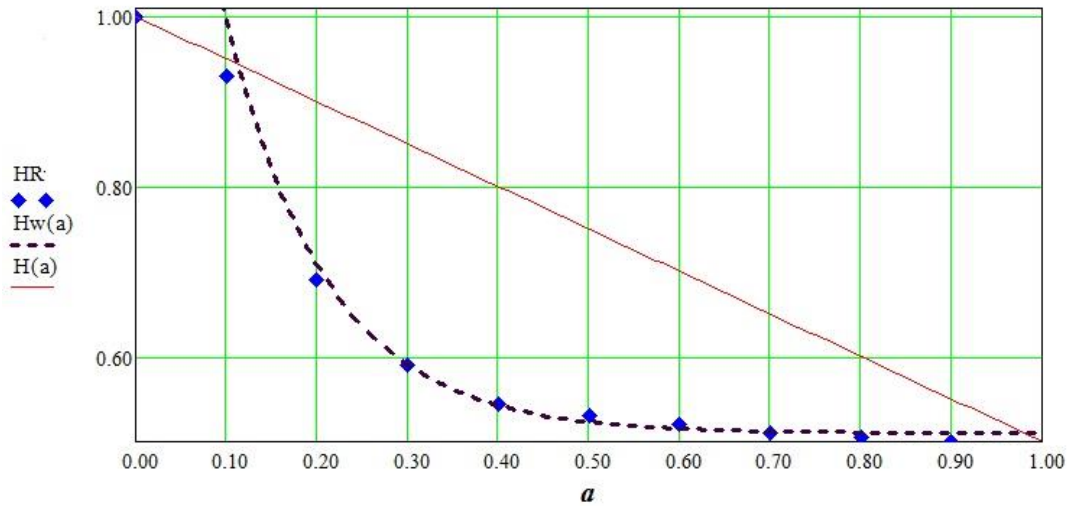


Рис. 4 – Апроксимація показника Херста  $H$  для трафіка, модельованого за законом Вейбулла

Для розрахунку показника Херста самоподібного трафіку, описуваного розподілом Вейбулла, запропоновано наступну апроксимуючу формулу:

$$H_W = 1,2e^{-9a} + 0,51. \quad (3)$$

де  $a$  – параметр форми розподілу Вейбулла.

Апроксимація (3) показника Херста (штрихова лінія рис. 4) забезпечує точність розрахунку  $H_w$  з похибкою до 3-5 %, що підвищує точність розрахунку характеристик  $QoS$  у порівнянні з їх розрахунком при використанні формули лінійної залежності  $H$  від  $a$  з точністю до 15 %.

На рис. 5 для значень  $H = 0,6 \dots 0,9$  застосовано апроксимацію виду

$$H_{W1} = 4,1e^{-19a} + 0,57, \quad (4)$$

яка забезпечує за розподілу Вейбулла ще більш точний розрахунок показника Херста з похибкою до 2 %. Саме в цьому діапазоні, в основному, й є значення показника  $H$  реального самоподібного трафіка пакетних мереж зв'язку.

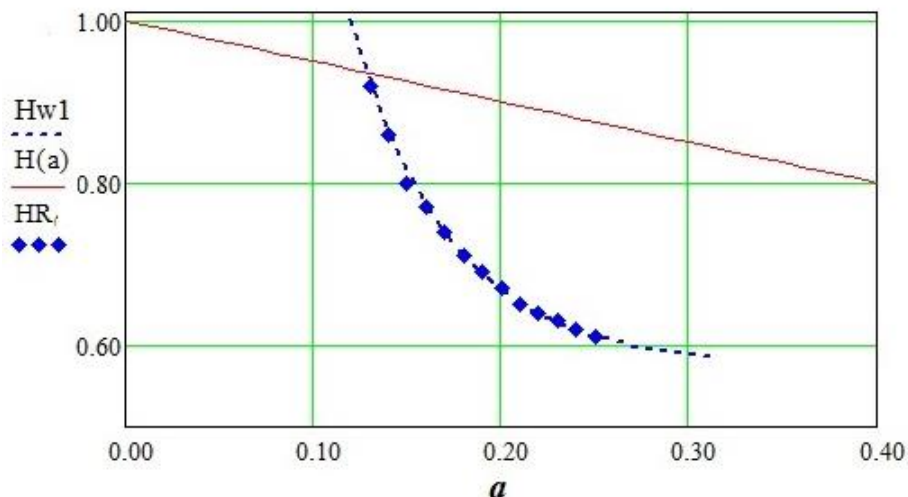


Рис. 5 – Апроксимація показника Херста  $HR$  при  $H = 0,6 \dots 0,9$

Отже, якщо реальна статистика трафіка (інтервал часу між пакетами) апроксимується розподілом Парето або Вейбулла, то необхідно визначати коефіцієнт самоподібності Херста не за формулами його лінійної залежності від параметра форми розподілу, а за формулами апроксимації (1) та (3) відповідно, що суттєво підвищує точність цього розрахунку. Наприклад, з лінійної залежності  $H$  за розподілу Вейбулла маємо, що при  $a = 0,3$  показник  $H = 0,85$ , а фактично з (3) або рис. 4 та 5 видно, що  $H = 0,6$ , тобто майже на 42 % менше.

Застосування реальних залежностей показника Херста  $H$  від параметра  $a$  форми розподілу Парето (1) або Вейбулла (3) підвищує точність розрахунку характеристик  $QoS$  порівняно з використанням лінійної залежності  $H$  від  $a$ .

Новий метод розрахунку характеристик  $QoS$  самоподібного трафіка в одноканальній системі з нескінченною чергою полягає у наступному. Після визначення за (1) або (3) відповідного до розподілу параметрів трафіка показника Херста  $H$  розраховується середня кількість вимог у системі  $N$  за формулою Норроса, наприклад, (2). Інші характеристики  $QoS$ , такі як середня кількість вимог у черзі  $Q$ , середній час перебування вимог у системі  $T$  і середній час затримки вимог у системі  $W$  розраховуються за формулами:

$$Q = N - \rho, \quad T = N / \rho, \quad W = T - 1, \quad (5)$$

де  $T$  та  $W$  дано в умовних одиницях середньої тривалості обслуговування.

Результати досліджень розділу 2 видано у роботах [3-5, 12, 16, 17].

**У третьому розділі** – «Розрахунок імовірності затримки обслуговування та середнього часу затримки пакетів у накопичувальному буфері одноканальної системи з нескінченною чергою» – досліджено ймовірнісні функції розподілу станів одноканальної системи з нескінченною чергою за самоподібного трафіка; запропоновано апроксимацію імовірнісної функції розподілу станів системи, де ця функція не залежить від моментів надходження до системи пакетів самоподібного трафіка; удосконалено метод розрахунку імовірності затримки обслуговування та середнього часу затримки пакетів у накопичувальному буфері одноканальної системи з нескінченною чергою.

Розрахунок характеристик  $QoS$  в одноканальній системі з нескінченною чергою за самоподібного трафіка передбачає знаходження показника Херста (коефіцієнта самоподібності), після чого за формулою Норроса розраховується середня кількість пакетів у системі  $N$  та інші характеристики (5). Проте цей метод не дозволяє за встановленим значенням показника Херста  $H$  розрахувати ще й такі характеристики  $QoS$ , як імовірність очікування обслуговування пакета  $P_w$  та середній час затримки пакетів  $t_q$  в накопичувальному буфері.

Оцінка характеристик  $QoS$  виконується на основі математичного опису реакції системи на вхідний потік пакетів. Під реакцією системи розуміють її стани, які через випадкову природу потоку пакетів математично описуються ймовірнісною функцією розподілу кількості зайнятих каналів та місць очікування  $p_k$ , де  $k$  – кількість пакетів у системі (у каналах і черзі). Ця функція збігається із функцією розподілу кількості пакетів у системі (обслуговуваних і тих, що чекають у черзі), оскільки кожний пакет займає один канал при обслуговуванні або одне місце у черзі при очікуванні. Отже, треба визначити функцію розподілу станів одноканальної системи з нескінченною чергою і на її основі отримати формули розрахунку ймовірності очікування обслуговування пакета та середнього часу затримки пакетів в накопичувальному буфері. Маємо: самоподібний вхідний потік, який описується розподілами Парето або Вейбулла; дисципліна обслуговування пакетів потоку – без втрат із можливістю очікування в нескінченній черзі, дисципліна обслуговування пакетів із черги – за правилом *FIFO*, схема – одноканальна.

Для пачкового трафіка характерна сильна нерівномірність інтенсивності надходження пакетів, за якої пакети групуються в «пачки» на одних інтервалах, і повністю відсутні або їх дуже мало на інших інтервалах часу. Тому, за такого трафіка у функції розподілу кількості пакетів у системі істотно зростає ймовірність  $P_0$  повної відсутності пакетів у ній, що і показано на рис. 6.

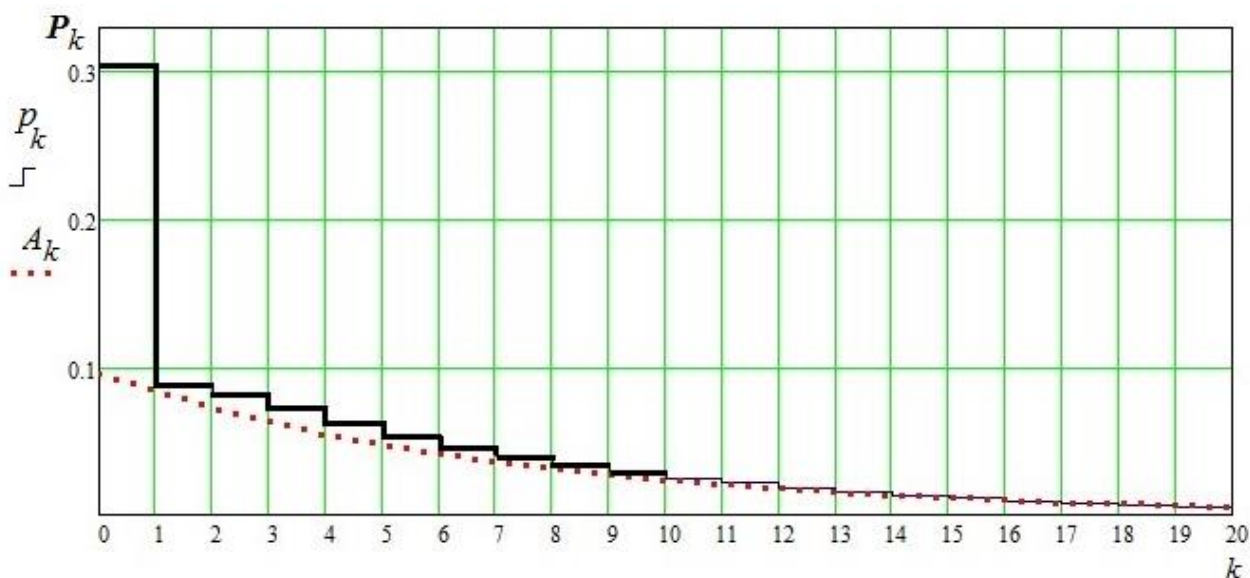


Рис. 6 – Функція розподілу станів системи  $p_k$  та її апроксимація  $A_k$

Ефективність обслуговування такого трафіка дуже низька, оскільки в процесі його оброблення у періоди спаду навантаження з ймовірністю  $P_0$  ресурси системи сильно невикористовуються, а при піках навантаження необхідно збільшувати довжину накопичувального буфера для недопущення втрат пакетів. Проектування ж пропускної здатності системи, як правило, відбувається виходячи із середнього значення інтенсивності трафіка, що не забезпечує одночасно її ефективного використання та заданого рівня  $QoS$ .

Відомо, що за непуассонівського потоку, наприклад, з довільним розподілом інтервалу часу між моментами надходження пакетів, яким може бути й самоподібний потік типу *fBM*, імовірність очікування в одноканальній системі визначається так:

$$P_w = \sum_{i=1}^{\infty} P_i' = 1 - P_0',$$

де  $P_i'$  – імовірність наявності у системі  $i$  пакетів у моменти надходження нових пакетів. Але у функції розподілу  $p_k$ , показаній на рис. 6, кожне значення  $P_i$  не залежить від моменту надходження пакета у систему (не залежить від того, надходить чи не надходить пакет у систему). Тому тут імовірність  $P_0$  з функції розподілу станів системи, яку показано на рис. 6, для розрахунку імовірності очікування  $P_w$  за вищенаведеною формулою не підходить, оскільки вона не дорівнює  $P_0'$ .

Завантаженість системи  $\rho$  (*utilization factor*) визначається як відношення інтенсивності вхідного потоку вимог  $\lambda$  до інтенсивності обслуговування  $\mu$ . У одноканальній системі за потоку пакетів з довільним розподілом інтервалу часу між моментами надходження пакетів завантаженість системи  $\rho = 1 - P_0$ , де  $P_0$  визначається з імовірнісного розподілу станів системи  $p_k$ , який не залежить від моментів надходження пакетів до системи. У стані  $P_0$  у одноканальній системі є 0 пакетів (система вільна) і тому імовірність зайнятості  $P_{\text{зн}} = 1 - P_0 = \rho$ .

За пуассонівського потоку імовірність очікування  $P_w$  збігається з імовірністю зайнятості системи  $P_{\text{зн}}$  і тому  $P_w = P_{\text{зн}} = \rho$  за будь-якого розподілу тривалості обслуговування, але за довільного потоку пакетів  $P_w \neq P_{\text{зн}}$ .

Із рис. 6 випливає, що частина функції розподілу кількості вимог у системі  $p_k$  без імовірності  $P_0$  достатньо якісно узгоджується із апроксимацією  $A_k$ , в якості якої запропоновано наступний вираз:

$$A_k = \rho \frac{\rho}{N} \exp\left(-\frac{\rho}{N} k\right), \quad (6)$$

де  $\rho$  – завантаженість системи ( $0,3 < \rho < 1$ );  $N$  – середня кількість пакетів у системі.

Апроксимація  $A_k$  є результатом помноження завантаженості системи  $\rho$  на деяку функцію з параметром  $(\rho / N)$ . У функції розподілу  $p_k$  на рис. 6 кожне значення  $P_k$  не залежить від моменту надходження пакета у систему.

Для функції розподілу станів системи  $p_k''$ , яка складається з імовірностей  $P_k''$  наявності у системі  $k$  пакетів тільки під час ненадходження нових пакетів, подія «очікування обслуговування» відбувається тільки тоді, коли у системі є два та більше пакетів, тобто імовірність очікування  $P_w = 1 - P_0'' - P_1''$ .

Частина апроксимації  $A_k$ , починаючи з  $A_1$ , близька до функції розподілу кількості пакетів у системі  $p_k$ , але без імовірності  $P_0$ . Апроксимація  $A_k$  без  $A_0$  наближено описує новий простір подій наявності у системі від одного до нескінченної кількості пакетів. У цьому новому просторі подій (без  $P_0$ ) можна розрахувати ймовірності  $P_1'''$ ,  $P_2'''$  і так далі, розглядаючи їх відповідно до

класичного визначення ймовірності – «ймовірність події дорівнює відношенню кількості сприятливих цій події випадків до загальної кількості випадків». Таким чином, наприклад, ймовірність  $P_1'''$  буде визначена так:

$$P_1''' = \frac{A_1}{\sum_{k=0}^{\infty} A_k}. \quad (7)$$

Сума всіх ймовірностей  $A_k$  в знаменнику (7) отримана із простору подій, який співпадає з простором, в якому вилучено подію «повної відсутності пакетів у системі» з ймовірністю  $P_0$  із розподілу  $p_k$ , де кожне значення  $P_k$  не залежить від того, надходить чи не надходить пакет у систему. Нормування ймовірності  $A_1$  виконується сумою ймовірностей  $A_k$  або ймовірностей простору, у якому неможлива подія «відсутність пакетів у системі», від чого пакети у системі «завжди є» (в моменти їх надходження і ненадходження). Тому численно величина ймовірності  $P_0''$  у ймовірності  $P_1'''$  вже є. Якщо у системі «завжди є» пакети, то при цьому подія, яка полягає в наявності у системі одного пакета (мінімально можлива кількість пакетів за постійної їх наявності), може бути тільки під час ненадходження нових пакетів. Тому численно й величина ймовірності  $P_1''$  у ймовірності  $P_1'''$  також уже є. Отже, ймовірність  $P_1'''$  дорівнює сумі ймовірностей  $P_0''$  та  $P_1''$  і тому  $P_1''' = P_0'' + P_1''$ .

Отже ймовірність очікування обслуговування пакета в одноканальній системі з нескінченною чергою визначиться так:

$$P_w = 1 - P_1''' = 1 - \frac{A_1}{\sum_{k=0}^{\infty} A_k}. \quad (8)$$

З урахуванням постійної частини  $\rho \frac{\rho}{N}$  апроксимуючої функції (6), яка є в чисельнику і знаменнику виразу (8), кінцевою формула розрахунку буде такою:

$$P_w = 1 - \frac{\exp\left(-\frac{\rho}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\rho}{N} k\right)}. \quad (9)$$

Далі із (5) розраховуються середній час  $T$  перебування пакетів у системі та середній час  $W$  затримки пакетів у системі. Після цього можна розрахувати середній час затримки пакетів у накопичувальному буфері за формулою

$$t_q = \frac{W}{P_w}. \quad (10)$$

де  $t_q$  дано в умовних одиницях середньої тривалості обслуговування.

Імітаційним моделюванням підтверджено точність формул (9) та (10) для розрахунку характеристик  $QoS$  у системі  $fBM/G/1/\infty$ . При цьому розходження результатів моделювання і розрахунку не перевищує 5 % при зміні завантаженості системи в діапазоні  $0,4 < \rho < 1$  (при  $\rho \geq 0,6$  похибка менше 2 %)

і зміні значень показника Херста  $0,5 < H < 0,9$ . Наприклад, з рис. 6 видно, що імовірність  $P_0 = 0,301$  і тому реальна імовірність зайнятості системи  $P_{\text{зн}} = 0,699$ . При цьому розрахунок імовірності очікування обслуговування за формулою (9) дає значення  $P_w = 0,92254$ , що тільки на 2,4 % менше реального значення імовірності очікування обслуговування  $P_w = 0,94516$ .

При практичних розрахунках у формулі (9) верхня межа підсумовування може бути не до нескінченності, а до реальної довжини накопичувального буфера системи, тобто до конструктивного  $N_{\text{max}}$ , за якого немає втрат.

Дослідження розділу 3 опубліковано у роботах [2, 6-8, 10, 11, 14-17, 19].

**У четвертому розділі** – «Імітаційне моделювання самоподібного трафіка та його обслуговування у одноканальній системі з чергою» – імітаційним моделюванням перевірено теоретично отримані результати і порівняно їх з існуючими методами розрахунку показника Херста та характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка мультисервісної мережі зв'язку.

У чисельних серіях імітаційного моделювання самоподібного трафіка методом  $R/S$ -статистики розраховувались реальні значення показника Херста, а далі методом найменших квадратів підбирались коефіцієнти апроксимацій (1), (3) та (4), за яких середнє квадратичне відхилення точок від кривої мінімально.

Моделюванням встановлено, що інтенсивність трафіка не впливає на властивості самоподібності трафіка і розрахунки показника Херста за формулою (1), (3) та (4) є на порядок точніше, ніж за формулою лінійної залежності  $H$  від  $a$ , що використовується нині.

У Табл. 1 наведено розрахунки та результати моделювання для трафіка, генерованого за розподілом Вейбула з інтенсивністю навантаження  $\rho = 0,7$ .

Таблиця 1 – Показник Херста трафіка з  $\rho = 0,7$  за розподілу Вейбулла

Показник Херста, $H$	Параметр форми розподілу, $a$						
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Моделювання, $H$	0,699	0,578	0,564	0,529	0,524	0,515	0,511
$H_w = (2 - a) / 2$	0,900	0,850	0,800	0,750	0,700	0,650	0,600
Похибка, %	28,7	47,1	41,8	41,8	33,6	26,2	17,4
Формула (3), $H_w$	0,708	0,591	0,548	0,523	0,515	0,512	0,511
Похибка, %	1,3	2,2	-2,8	-1,1	-1,7	-0,5	0

З Табл. 1 видно суттєву різницю між реальною та лінійною залежністю коефіцієнта самоподібності  $H$  від параметра форми  $a$  розподілу Вейбулла.

У Табл. 2 наведено результати обчислення (9) та моделювання трафіка за розподілом Вейбулла з  $a = 0,2$  та показником Херста  $H = 0,71$ .

Імовірність очікування обслуговування, яка розрахована за формулою (9), має відносну похибку не більше 1% протягом усього діапазону зміни завантаженості системи  $\rho = 0,1 \dots 0,9$  у порівнянні з цією ж імовірністю, але отриманою шляхом імітаційного моделювання.



Таблиця 2 – Моделювання трафіку за розподілом Вейбулла

Завантаженість, $\rho$	Імовірність очікування, $P_w$			
	Моделювання	Розрахунок за ф. (9)	Відносна похибка, %	Максимальне / Середнє, $N$
0,1	0,89648	0,90182	0,6	105/0,86
0,2	0,94171	0,94067	-0,1	176/3,01
0,3	0,96322	0,96150	-0,2	247/7,22
0,4	0,97672	0,97516	-0,2	419/15,6
0,5	0,98493	0,98383	-0,1	580/30,6
0,6	0,99048	0,98953	-0,1	831/57,2
0,7	0,99434	0,99366	-0,1	1395/108
0,8	0,99723	0,99690	-0,1	2414/258
0,9	0,99873	0,99852	-0,08	4217/596

У Табл. 3 наведено результати розрахунку (9) та моделювання трафіка за розподілом Парето з  $a = 1,55$  та показником Херста  $H = 0,71$ .

Імовірність очікування обслуговування, яка отримана за формулою (9) та шляхом імітаційного моделювання, майже однакова з відносною похибкою розрахунку не більше 5 % протягом усього діапазону зміни  $\rho = 0,4 \dots 0,9$ . Чим більше значення показника  $H$  та завантаженості  $\rho$ , тим вища точність.

Таблиця 3 – Моделювання трафіку за розподілом Парето

Завантаженість, $\rho$	Імовірність очікування, $P_w$			
	Моделювання	Розрахунок за ф. (9)	Відносна похибка, %	Максимальне / Середнє, $N$
0,1	0,25585	0,75523	195,2	8/0,12
0,2	0,45917	0,75000	63,3	13/0,29
0,3	0,61759	0,75774	22,7	20/0,57
0,4	0,74381	0,78220	4,9	26/1,0
0,5	0,82984	0,82215	-1,0	41/1,9
0,6	0,89796	0,87321	-2,8	67/3,72
0,7	0,94516	0,92254	-2,4	129/7,93
0,8	0,97598	0,96441	-1,2	308/21,4
0,9	0,99424	0,99111	-0,3	720/95,6

Прийнятна точність розрахунку отримується тоді, коли загрузка системи  $\rho > 0,3$ . Якщо значення  $H > 0,7$ , точність розрахунку буде прийнятною протягом всього діапазону зміни  $\rho$ . Якщо значення  $H < 0,7$ , навіть для розподілу Вейбулла, точність буде гіршою. З табл. 2 та 3 видно, що для однакових значень  $H$  характеристики  $QoS$  для розподілів Вейбулла та Парето різняться. Однак при цьому розходження результатів моделювання і розрахунку не перевищує 5% при зміні завантаженості системи в діапазоні  $0,4 < \rho < 1$  (при  $\rho > 0,7$  похибка менше 2%) і зміні значень показника Херста  $0,5 < H < 0,9$ .

Результати досліджень розділу 4 опубліковано у роботах [1, 11, 12, 19].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано дослідження та розв'язано науково-технічну задачу підвищення точності розрахунку характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка мультисервісної мережі зв'язку. Результатами роботи є удосконалені методи оцінки ступеня самоподібності пакетного трафіка та характеристик якості його обслуговування, які забезпечують достовірний аналіз і синтез сучасних телекомунікаційних систем з пакетними технологіями передавання й комутації інформації.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Удосконалено метод розрахунку ступеня самоподібності пакетного трафіка шляхом розрахунку показника Херста з його математичної моделі, яка представлена ймовірнісним розподілом інтервал часу між пакетами потоку за законами Парето або Вейбулла. Удосконалення полягає у використанні для цього не лінійного закону залежності показника Херста від параметра  $a$  форми ймовірнісного розподілу, а вперше запропонованих більш точних апроксимацій цієї залежності при зміні параметра розподілу в межах:  $a = 1 \dots 2$  для випадку розподілу Парето та  $a = 0 \dots 1$  для розподілу Вейбулла. Такий підхід знижує похибку розрахунку показника Херста  $H$  з максимальних значень 45 % до 3 %.

2. Удосконалено метод розрахунку характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка в одноканальній системі з нескінченною чергою шляхом використання для цього значень показника Херста, який визначається з відповідної апроксимації залежності показника Херста від параметра форми розподілу Парето або Вейбулла. Такий підхід суттєво зменшує похибку розрахунку характеристик якості обслуговування і, наприклад, при високих значеннях завантаженості системи  $\rho > 0,8$  або великих значеннях показника Херста  $H > 0,75$  (тим паче одночасно) ця точність покращується на порядок у порівнянні з використанням відомих методів.

3. Вперше запропоновано апроксимацію ймовірнісної функції розподілу станів одноканальної системи з нескінченною чергою за самоподібного трафіка, для випадку, коли ця функція не залежить від моментів надходження до системи пакетів самоподібного трафіка. При цьому апроксимація подібна до експонентної функції з параметром розподілу  $\rho / N$ .

4. Удосконалено метод розрахунку ймовірності затримки обслуговування  $P_w$  та середнього часу затримки пакетів у накопичувальному буфері  $t_q$  одноканальної системи з нескінченною чергою шляхом використання для цього нової апроксимуючої функції розподілу станів системи, яка не залежить від моментів надходження до системи пакетів самоподібного трафіка. Дана функція розподілу станів системи при реальних вимірах параметрів трафіка та обслуговування його навантаження у СРІ може бути отримана шляхом визначення ймовірностей станів системи  $p_k$ , для чого необхідно накопичений у  $k$ -му лічильнику час тривалості знаходження системи у стані  $k$  поділити на загальний час спостереження.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Левенберг Є.В. Точність розрахунку показника Херста та імовірності очікування обслуговування пакетів самоподібного трафіка / Є.В. Левенберг // Збірник наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2019. – №1. – С. 80-86.
2. Керимова С.К. Метод расчета характеристик узла доступа сети NGN при обслуживании трафика передачи речи и данных / С.К. Керимова, Е.В.Левенберг // Збірник наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2018. – №2. – С. 83-88.
3. Ложковский А.Г. Расчет характеристик самоподобного трафика, аппроксимируемого распределением Парето / А.Г. Ложковский, Е.В. Левенберг // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: „Радіоелектроніка та телекомунікації” – Вип. 885. – 2017. – С. 63-67.
4. Ложковский А.Г. Повышение точности расчета коэффициента самоподобности трафика пакетной сети связи / А.Г. Ложковский, Е.В. Левенберг // Збірник наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2017. – №2. – С. 63-68.
5. Lozhkovskiy A.G. Dependence approximation of the Hurst coefficient on the traffic distribution parameter // A.G. Lozhkovskiy, Ye.V. Levenberg / Information & Telecommunication Sciences. – 2017. – №2. – P. 18-22.
6. Lozhkovskiy A.G. Method for approximating the distribution function of the states in the single-channel system with a self-similar traffic / A.G. Lozhkovskiy, Ye.V. Levenberg // Radioelectronics and Informatics. – №3, 2018. – P. 46-49.
7. Lozhkovskiy A.G. Calculation the packets average delay time in storage buffer of the single-channel system with self-similar traffic / A.G. Lozhkovskiy, Ye.V. Levenberg // Computational problems of electrical engineering. – Vol. 7, №2, 2017. – P. 87-91.
8. Lozhkovskiy A.G. Estimating the service waiting probability in a single-channel system with self-similar traffic / A.G. Lozhkovskiy, Ye.V. Levenberg // Збірник наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2018. – №1. – С. 22-26.
9. Бондаренко О.В. Эксплуатационные показатели качества транспортной телекоммуникационной сети Украины / О.В. Бондаренко, Б.Я. Костик, Д.Н. Степанов, Е.В. Левенберг // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – №6. – С. 37-40.
10. Levenberg Ye.V. Calculation the service waiting probability with self-similar network traffic / Ye.V. Levenberg // Ученые записки. Азербайджанский Технический Университет. – 2018. – №4. – С. 37-41.
11. Lozhkovskiy A.G. Calculation of Waiting Probability in the Single-channel System with Self-similar Network Traffic / A.G. Lozhkovskiy, Ye. Levenberg // Proceedings of Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo'2018, September 10–14, 2018, – Odessa, Ukraine. – P. 456-458.
12. Lozhkovskiy A. Investigation of simulating methods for self-similar traffic flows / A. Lozhkovskiy, Ye. Levenberg // Proceedings of 4th IEEE International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and

- Technology», PIC S&T'2017, October 10–13, 2017, – Kharkiv, Ukraine. – P. 410-413. DOI: [10.1109/INFOCOMMST.2017.8246428](https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246428)
13. Левенберг Є.В. Дослідження характеристик трафіка в мережах зв'язку з пакетними технологіями передавання інформації / Є.В. Левенберг, А.В. Мальчик // матеріали 7-ї МНПК «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», Одеса, 27-28 жовтня 2017. – С. 63-65.
  14. Ложковский А.Г. Метод аппроксимации функции распределения состояний одноканальной системы с самоподобным трафиком / А.Г. Ложковский, Е.В. Левенберг // Міжнародна НТК «Наукоємкі технології в інфокомунікаціях», ХНУРЕ НІСТ'2018, Харків, 7-9 червня 2018. – С. 3-4.
  15. Левенберг Є.В. Розрахунок імовірності очікування обслуговування пакетів самоподібного трафіка / Є.В. Левенберг // матеріали 72-ї НТК проф.-викл. складу, науковців та аспірантів. – Одеса, 13-15 грудня 2017. – С. 50-52.
  16. Левенберг Є.В. Оцінка характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка / Є.В. Левенберг, О.А. Снісаренко // матеріали 7-ї МНПК «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», Одеса, 27-28 жовтня 2017. – С. 75-76.
  17. Ложковський А.Г. Оцінка параметрів самоподібного трафіка та їх впливу на характеристики якості обслуговування / А.Г. Ложковський, Є.В. Левенберг // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, ВОТТП-18-2018. – Матеріали XVIII міжнародної НТК. – Одеса, 8-13 червня, 2018. – С. 200-201.
  18. Левенберг Є.В. Дослідження характеристик пакетного трафіка та якості його обслуговування / Є.В. Левенберг, О.Л. Литвінець // матеріали 8-ї МНПК «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», Одеса, 14-16 листопада 2018. – С. 104-106.
  19. Левенберг Є.В. Точність розрахунку характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка / Є.В. Левенберг // матеріали 73-ї НТК проф.-викл. складу, науковців та аспірантів. – Одеса, 13-15 грудня 2018. – С. 63-64.

## АНОТАЦІЇ

**Левенберг Є.В. Оцінка характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка телекомунікаційних мереж.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, 2019.

У дисертації розв'язано науково-практичну задачу підвищення точності розрахунку характеристик *QoS* самоподібного трафіка мультисервісної мережі зв'язку. Результатами роботи є удосконалені методи оцінки ступеня самоподібності пакетного трафіка та характеристик якості обслуговування.

Удосконалено метод розрахунку ступеня самоподібності пакетного трафіка з визначенням показника Херста *H* із параметра *a* форми імовірнісного розподілу інтервалу часу між пакетами потоку за законами Парето і Вейбулла.

Для цього запропоновано більш точні апроксимації залежності  $H$  від  $a$ , що знижує похибку розрахунку показника Херста з 45 % до 3 %. За цими апроксимаціями удосконалено метод розрахунку характеристик  $QoS$  самоподібного трафіка в одноканальній системі з нескінченною чергою, що на порядок зменшує похибку розрахунку характеристик  $QoS$ .

Вперше запропоновано апроксимацію імовірнісної функції розподілу станів одноканальної системи з нескінченною чергою за самоподібного трафіка для випадку, коли ця функція не залежить від моментів надходження пакетів самоподібного трафіка до системи. За цією апроксимацією удосконалено метод розрахунку імовірності затримки обслуговування та середнього часу затримки пакетів у накопичувальному буфері одноканальної системи з нескінченною чергою.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, модель самоподібного трафік, показник Херста, оцінка характеристик якості обслуговування,  $QoS$ .

**Левенберг Е.В. Оценка характеристик качества обслуживания самоподобного трафика телекоммуникационных сетей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса, 2019.

В диссертации решена научно-практическая задача повышения точности расчета характеристик  $QoS$  самоподобного трафика мультисервисной сети связи. Результатами работы есть усовершенствованные методы оценки степени самоподобия пакетного трафика и характеристик качества обслуживания.

Усовершенствован метод оценки степени самоподобия пакетного трафика, с определением показателя Херста  $H$  из параметра  $a$  формы вероятностного распределения интервала времени между пакетами потока по законам Парето и Вейбулла. Для этого предложены более точные аппроксимации зависимости  $H$  от  $a$ , что снижает погрешность расчета показателя Херста  $H$  с 45 % до 3%. По этим аппроксимациям усовершенствован метод расчета характеристик  $QoS$  самоподобного трафика в одноканальной системе с бесконечной очередью, что на порядок уменьшает погрешность расчета характеристик  $QoS$ .

Впервые получена аппроксимация вероятностной функций распределения состояний одноканальной системы с бесконечной очередью при самоподобным трафике для случая, когда эта функция не зависит от моментов поступления пакетов самоподобного трафика в систему. По этой аппроксимации усовершенствован метод расчета вероятности задержки обслуживания и среднего времени задержки пакетов в накопительном буфере одноканальной системы с бесконечной очередью.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, модель самоподобного трафик, показатель Херста, оценка характеристик качества обслуживания,  $QoS$ .

**Levenberg Ye.V. Evaluation of service quality characteristics at self-similar traffic of telecommunication networks.** – On the rights of a manuscript.

The dissertation to submit for obtaining Candidate of Engineering Science (PhD) degree in specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications, Odesa, 2019.

The thesis is devoted to solving scientific and practical problem – increasing the calculation accuracy of the service quality characteristics of self-similar traffic in the multiservice communication network. The work results are improved methods of evaluation the degree of packet traffic self-similarity and service quality characteristics, which provide reliable analysis and synthesis of modern telecommunication systems with packet technology transmission and switching information.

The calculating method of the packet traffic self-similarity degree is improved by calculating the Hurst exponent from traffic mathematical model, which is represented by the probabilistic distribution of the time interval between the flow packets according to the laws of Pareto or Weibull. The improvement is to use for this not the linear law of the Hurst exponent dependence on the parameter  $a$  of the probabilistic distribution, but the proposed more accurate approximations of this dependence when changing the distribution parameter within the limits:  $a = 1...2$  for the Pareto distribution and  $a = 0...1$  for the distribution Weibull. This approach reduces the error of calculating the Hurst exponent  $H$  from the maximum values 45% to 3%.

The calculating method of the service quality characteristics a self-similar traffic in a one-channel system with infinite queue is improve by using the Hurst exponent values, which is determined from the corresponding approximation of the Hurst exponent depended on the shape parameter of distribution Pareto or Weibull. Such an approach significantly reduces the error in the calculation of service quality characteristics and, for example, with high values of the load of the system  $\rho > 0,8$  or the large values of the Hurst exponent  $H > 0,75$  (more so simultaneously), this accuracy improves by an order of magnitude compared with the use of known methods.

For the first time, of probabilistic state distribution function approximation of a one-channel system with an infinite queue for self-similar traffic are proposed for the case where this function does not depend on the moments of arrival packet in the system. In this case, the approximation is like the exponential function with the distribution parameter is  $\rho / N$ .

The calculating method of the service delay probability and the average delay time of packets in the buffer of a one-channel system with an infinite queue is improved by using a new approximating distribution function of the system states that does not depend on the packets arrival.

**Keywords:** telecommunication network, self-similar traffic model, Hurst exponent, evaluation of service quality characteristics, QoS.

## Список позначень та скорочень

$a$	– параметр форми імовірнісного розподілу ( <i>shape parameter</i> )
$H$	– показник Херста (коефіцієнт самоподібності)
$p_k$	– розподіл кількості пакетів у системі, не залежний від їх приходу
$r_k$	– розподіл кількості пакетів у системі, залежний від їх приходу
$P_w$	– імовірність очікування обслуговування пакетів
$P_B$	– імовірність втрати (блокування) пакетів
$P_{зН}$	– імовірність зайнятості системи (канали й місця в черзі)
$N$	– середня кількість пакетів у системі
$T$	– середня тривалість перебування пакетів у системі
$Q$	– середня кількість пакетів у черзі
$t_q$	– середня тривалість очікування пакетів у черзі
$W$	– середня тривалість очікування пакетів у системі
$S$	– пікфактор трафіка (коефіцієнт скупченості навантаження)
$z$	– тривалість інтервалу часу між пакетами
$v_z$	– коефіцієнт варіації інтервалу часу між пакетами
$\lambda$	– інтенсивність потоку пакетів
$\mu$	– інтенсивність обслуговування пакетів
$\rho$	– завантаженість системи (інтенсивність, <i>utilization factor</i> )
$QoS$	– <i>Quality of Service</i> (якість обслуговування)
$fBM$	– <i>fractional Brownian motion</i> , модель самоподібного трафіка
$FIFO$	– <i>First in first out</i> (перший обслуговується першим)
$CPI$	– система розподілу інформації

Підписано до друку 29.10.2019 р.  
Формат 60x88/16 Обсяг 0,9 друк. арк.  
Тираж 100 прим. Зам. № 6404.

Віддруковано у редакційно-видавничому центрі  
Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова.  
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Пішонівська, 5  
**© ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019**