

**Уривський Леонід Олександрович**

доктор технічних наук, професор

*Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
м. Київ, Україна*

ORCID ID: 0000-0001-5148-6985

*leonid\_uic@ukr.net***Сколець Анастасія Владиславівна**

магістр

*Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
м. Київ, Україна*

ORCID ID: 0009-0000-3681-2930

*krikliyanastya@gmail.com***Стрелковська Юлія Олександрівна**

кандидат наук, доцент

*Worthing college, Sanditon Way 1, Worthing, United Kingdom**м. Уорthing, Велика Британія*

ORCID 0000-0002-9835-0222

*4800632s@gmail.com***ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ОБСЛУГОВУВАННЯ ПРИ ЗБІЛЬШЕННІ КІЛЬКОСТІ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ САМОПОДІБНОГО ВХІДНОГО ПОТОКУ**

**Анотація.** Дослідження присвячено аналізу функціонування телекомунікаційних систем в умовах самоподібного навантаження, характерного для сучасних мереж 4G/5G, хмарних сервісів та технологій Інтернету речей (IoT). На відміну від традиційного пуассонівського потоку, реальний мережевий трафік характеризується властивістю довготривалої залежності, що зумовлює виникнення корельованих сплесків навантаження, істотне зростання довжини черг і затримок обслуговування. Для кількісного опису ступеня самоподібності використано параметр Херста ( $H$ ), який дозволяє оцінити вплив структури вхідного потоку на основні показники якості обслуговування (QoS). У роботі виконано порівняльний аналіз математичних моделей  $M/M/n$  та  $Wb/M/n$  для систем масового обслуговування з різною кількістю каналів ( $n = 1, 2, 3$ ), у яких самоподібний потік апроксимується за допомогою розподілу Вейбулла. Проведено чисельне моделювання із визначенням середньої довжини черги, середнього часу очікування, середнього часу перебування заявки в системі та середньої кількості заявок за різних значень параметра Херста та коефіцієнта завантаження. Встановлено, що при збільшенні параметра  $H$  від 0,5 до 0,8 середній час перебування заявки в одноканальній системі зростає майже у 6 разів, що свідчить про її високу чутливість до самоподібності трафіку. Показано, що перехід до багатоканальних конфігурацій забезпечує суттєве підвищення стійкості характеристик обслуговування та значно зменшує вплив довготривалої залежності вхідного потоку. Зокрема, у триканальній системі середній час очікування скорочується у 53,7 разів порівняно з одноканальною конфігурацією при інтенсивному навантаженні, а показники QoS набувають практично інваріантного характеру щодо зміни структури трафіку. Отримані результати підтверджують, що масштабування кількості каналів обслуговування є ефективнішим засобом забезпечення стабільності телекомунікаційних систем, ніж підвищення продуктивності окремих приладів обслуговування. Практична цінність роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу під час проектування, оптимізації та адаптивного керування ресурсами сучасних телекомунікаційних мереж, що функціонують в умовах самоподібного трафіку.

**Ключові слова:** СМО, самоподібний трафік, параметр Херста, розподіл Вейбулла, QoS, багатоканальні системи.

**Leonid Uryvsky**

Doctor of Technical Sciences, Professor

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-5148-6985

*leonid\_uic@ukr.net***Anastasiia Skolets**

Academic degree, Academic title, position

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0009-0000-3681-2930

*krikliyanastya@gmail.com***Juliya Strelkovska**

PhD, Associate Professor

Worthing college, Sanditon Way 1,

**ASSESSMENT OF THE STABILITY OF THE SERVICE CHARACTERISTICS IN THE INCREASE OF THE NUMBER OF DEVICES IN THE CONDITIONS OF A SELF-SIMILAR INPUT FLOW**

**Abstract.** This study investigates the performance of telecommunication systems operating under self-similar traffic conditions, which are characteristic of modern 4G/5G networks, cloud services, and Internet of Things (IoT) technologies. Unlike the traditional Poisson arrival process, real network traffic exhibits long-range dependence, resulting in correlated traffic bursts, significant increases in queue lengths, and service delays. The Hurst parameter ( $H$ ) is employed to quantitatively characterize the degree of self-similarity and to evaluate the impact of the input traffic structure on the main Quality of Service (QoS) metrics. A comparative analysis of the  $M/M/n$  and  $Wb/M/n$  queuing models is performed for systems with different numbers of service channels ( $n = 1, 2, 3$ ), where self-similar traffic is approximated using the Weibull distribution. Numerical simulations are conducted to evaluate the average queue length, average waiting time, average system residence time, and the average number of requests in the system for different values of the Hurst parameter and system utilization factor. The results demonstrate that increasing the Hurst parameter from 0.5 to 0.8 leads to an almost sixfold increase in the average residence time in a single-channel system, indicating its high sensitivity to self-similar traffic. It is shown that transitioning to multi-channel configurations significantly improves the stability of service characteristics and substantially mitigates the adverse effects of long-range dependence. In particular, for the three-channel system, the average waiting time is reduced by 53.7 times compared with the single-channel configuration under heavy traffic conditions, while the QoS metrics become practically invariant to changes in the traffic structure. The obtained results confirm that increasing the number of service channels is a more effective approach to ensuring the stability of telecommunication systems than improving the performance of individual service devices. The practical significance of the proposed approach lies in its applicability to the design, optimization, and adaptive resource management of modern telecommunication networks operating under self-similar traffic conditions.

**Keywords:** Queuing Systems, self-similar traffic, Hurst parameter, Weibull distribution, QoS, multi-channel systems.

## 1. Вступ

Сучасний етап розвитку інфокомунікаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів трафіку та ускладненням його структури. Масове впровадження мобільних мереж покоління 4G/5G, розвиток хмарних обчислень та систем інтернету речей (IoT) призвели до того, що традиційні підходи до аналізу телекомунікаційних систем потребують перегляду. Протягом десятиліть проектування мережевих вузлів базувалося на класичних моделях теорії масового обслуговування (СМО), де вхідний потік заявок вважався пуассонівським. Проте реальна практика експлуатації сучасних високошвидкісних мереж демонструє, що таке припущення часто є надто спрощеним.

Численні експериментальні дослідження підтверджують, що сучасний телекомунікаційний трафік володіє властивістю самоподібності та має ефект довготривалої залежності. Це означає, що пакетні сплески трафіку зберігаються на різних часових масштабах, що принципово відрізняє його від класичних потоків без післядії. У термінах теорії масового обслуговування ці властивості описуються параметром Херста ( $H$ ): при  $H = 0.5$  потік відповідає класичному пуассонівському розподілу, тоді як при  $H > 0.5$  він набуває самоподібного характеру.

Ігнорування самоподібної природи трафіку при розрахунку ресурсів мережі призводить до критичних помилок: реальні затримки та довжина черг виявляються значно більшими, ніж прогнозують класичні моделі. Це зумовлює необхідність перегляду традиційних моделей проектування на користь архітектур, здатних стабільно функціонувати в умовах високої корельованості вхідного потоку. Одним із найбільш перспективних шляхів розв'язання цієї проблеми є перехід від нарощування швидкодії одиничних приладів обслуговування до використання багатоканальних систем.

## 2. Постановка проблеми

Ігнорування властивості самоподібності при розрахунку пропускної здатності комутаційних вузлів призводить до значної недооцінки реальних затримок та довжини черг. Як показують чисельні розрахунки, при високих значеннях параметра Херста ( $H = 0.8$ ) середня довжина черги може зростати у 9–13 разів порівняно з класичною моделлю при тому самому середньому навантаженні. У зв'язку з цим критично важливим є дослідження механізмів стабілізації СМО, одним з яких є збільшення кількості обслуговуючих приладів ( $n$ ).

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання дослідження самоподібного трафіку та його впливу на телекомунікаційні системи є об'єктом уваги науковців протягом багатьох десятиліть. Витоки розуміння явища довготривалої залежності закладені у фундаментальній праці Hurst Н. Е. [1], де було вперше описано ефект пам'яті в часових рядах. Згодом ці ідеї були адаптовані до аналізу комп'ютерних мереж у роботі Leland W. Е. та Taqqu M. S. [2], де на основі аналізу Ethernet-трафіку експериментально доведено його самоподібну структуру. Теоретичні основи теорії масового обслуговування (СМО), що стали базою для подальших розрахунків характеристик затримок, детально висвітлені у класичній праці Kleinrock L. [3].

Застосування математичного апарату для апроксимації реального трафіку потребує використання альтернативних функцій розподілу. Зокрема, у роботі [4] обґрунтовано ефективність використання функції Вейбулла для обробки даних про трафік. Питання моделювання та прогнозування характеристик самоподібного навантаження активно досліджувалися у працях I. Strelkovska та співавторів [5], [6]. У дослідженні [6] автори фокусуються на методах передбачення параметрів трафіку, що є критично важливим для забезпечення заданого рівня якості обслуговування.

Особливий внесок у кількісну оцінку впливу фактору самоподібності на функціонування СМО зроблено у роботах Уривського Л. О. та Сколець А. В. [7], [8]. Зокрема, у праці [8] представлено аналіз впливу корельованості потоків на характеристики систем через їх кількісну оцінку. Подальший розвиток ці дослідження отримали у роботах [9], [10], де авторами запропоновано методологію оцінки чутливості параметрів СМО до характеристик абонентського доступу в умовах альтернативних розподілів. У цих статтях також детально розглядаються властивості систем при зміні структури вхідного потоку.

Попри значну кількість публікацій, більшість досліджень фокусується або на загальних властивостях самоподібного трафіку, або на аналізі класичних одноканальних моделей. Питання кількісного порівняння стійкості часових характеристик одноканальних та багатоканальних систем в умовах зростання параметра Херста залишається недостатньо висвітленим.

#### 4. Мета і задачі дослідження

Ця робота присвячена порівняльному аналізу показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS) для систем з різною кількістю обслуговуючих приладів ( $n = 1, 2 \text{ та } 3$ ) в умовах переходу від класичного пуассонівського потоку до самоподібного. Особлива увага приділяється тому, наскільки ефективно багатоканальність дозволяє нівелювати негативний вплив корельованості вхідних заявок.

Для моделювання самоподібного потоку в роботі використано узагальнену модель  $Wb/M/n/\infty$ , де вхідні інтервали описуються розподілом Вейбулла з параметрами  $\alpha$  та  $\beta$ , що напряму залежать від ступеня самоподібності ( $\alpha = 2 - 2H$ ).

Основними завданнями дослідження є:

1. Математичний опис моделей  $M/M/n$  та  $Wb/M/n$  для систем з необмеженою чергою.
2. Розрахунок основних характеристик QoS: середньої довжини черги ( $Lq$ ), середнього часу очікування ( $Wq$ ), середнього часу перебування в системі ( $W$ ) та середньої кількості заявок у системі ( $L$ ) при різних інтенсивностях обслуговування ( $\mu$ ).
3. Порівняння абсолютної оцінки показників від збільшення кількості обслуговуючих приладів при різних рівнях параметра Херста.
4. Аналіз стабільності системи в зонах критичного навантаження при  $H \rightarrow 0.8$ .

Наукова новизна роботи полягає в отриманні кількісних оцінок ефективності розподілу навантаження в багатоканальних системах для стабілізації характеристик обслуговування. Встановлено, що збільшення кількості обслуговуючих приладів дозволяє не просто лінійно підвищити пропускну здатність, а принципово змінити чутливість системи до корельованих сплесків трафіку, забезпечуючи прийнятний рівень QoS навіть при високих значеннях параметра Херста.

#### 5. Результати дослідження

Для проведення порівняльного аналізу характеристик обслуговування необхідно формалізувати математичний апарат, що описує стан багатоканальної системи масового обслуговування (СМО) з нескінченною чергою. У даному дослідженні розглядається перехід від класичної пуассонівської моделі до узагальненої моделі з самоподібним вхідним трафіком.

Введемо базові позначення параметрів системи:

- $\lambda$  – інтенсивність надходження вхідних заявок;
- $\mu$  – інтенсивність обслуговування заявок одним приладом;
- $n$  – кількість обслуговуючих приладів у системі;
- $\rho = \frac{\lambda}{n \cdot \mu}$  – коефіцієнт завантаження системи, причому обов'язковою умовою її стійкості є виконання нерівності  $\rho < 1$ ;
- $P_k$  – стаціонарна ймовірність перебування системи у стані, коли в ній знаходиться рівно  $k$  заявок;
- $\rho_0 = \frac{\lambda}{\mu}$  – додатково введене нульове навантаження системи.

##### 5.1. Класична багатоканальна модель $M/M/n/\infty$

Для марковської моделі  $M/M/n/\infty$  з пуассонівським вхідним потоком і експоненціальним часом обслуговування, стаціонарні ймовірності станів визначаються класичними співвідношеннями. Нормувальна стала (ймовірність того, що система порожня)  $P_0$  обчислюється за формулою:

$$P_0 = \left( \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\rho_0^k}{k!} + \frac{\rho_0^n}{n!} \cdot \frac{1}{1-\rho} \right)^{-1} \quad (1)$$

Ймовірності перебування системи у довільному стані  $k$  залежать від того, чи є вільні прилади:  
для  $0 \leq k \leq n$ :

$$P_k = P_0 \cdot \frac{\rho_0^k}{k!} \quad (2)$$

для  $k \geq n$ :

$$P_k = P_0 \cdot \frac{\rho_0^n}{n!} \cdot \rho^{k-n} \quad (3)$$

Ймовірність того, що заявка, яка надійшла до системи, буде змушена очікувати в черзі ( $P_{wait}$ ), дорівнює сумі ймовірностей станів, коли всі  $n$  приладів зайняті:

$$P_{wait} = \sum_{k=n}^{\infty} P_k = P_0 \cdot \frac{\rho_0^n}{n!} \cdot \frac{1}{1-\rho} \quad (4)$$

Основні показники якості обслуговування (Quality of Service) для системи  $M/M/n/\infty$  розраховуються наступним чином:

- 1) **Середня довжина черги ( $L_q$ )** - кількість заявок у буфері, що очікують звільнення приладу:

$$L_q = \frac{P_{wait} \rho}{1-\rho} \quad (5)$$

- 2) **Середній час очікування заявки в черзі ( $W_q$ )** - затримка заявки від моменту надходження до початку обслуговування [5]:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (6)$$

- 3) **Середній час перебування заявки в системі ( $W$ )** - повний час перебування заявки в системі (очікування + обслуговування):

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

- 4) **Середня кількість заявок у системі ( $L$ )** - загальне число заявок, що знаходяться під обслуговуванням та в черзі:

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (8)$$

## 5.2. Модель із самоподібним вхідним потоком $Wb/M/n/\infty$

Для адекватного моделювання сучасного телекомунікаційного трафіку, якому притаманна властивість післядії (самоподібності), класична пуассонівська модель є недостатньою. У цьому дослідженні використовується узагальнена модель  $Wb/M/n/\infty$ , де інтервали між надходженнями заявок описуються розподілом Вейбулла [6].

Параметри розподілу Вейбулла (форми  $\alpha$  та масштабу  $\beta$ ) безпосередньо пов'язані з параметром Херста ( $H$ ), який характеризує ступінь самоподібності трафіку:

$$\alpha = 2 - 2H$$

$$\beta = [\lambda \Gamma(1 + 1/\alpha)]^\alpha$$

де  $\Gamma()$  – гамма-функція. При  $H = 0.5$  параметр  $\alpha = 1$ , і розподіл Вейбулла зводиться до експоненціального (модель  $M/M/n/\infty$ ). При  $H > 0.5$  трафік набуває самоподібного характеру.

Для багатоканальної системи в зоні повної зайнятості сумарний темп обслуговування становить  $n\mu$ . Ключовою відмінністю моделі  $Wb/M/n/\infty$  є введення параметра  $\sigma$ , який задається наступним інтегральним співвідношенням і відіграє роль, аналогічну коефіцієнту завантаження  $\rho$  у зоні черги:

$$\sigma = \alpha \beta \int_0^{+\infty} e^{-(n\mu - n\mu\sigma)t} t^{\alpha-1} e^{-\beta t^\alpha} dt \quad (9)$$

Використовуючи параметр  $\sigma$ , стаціонарні ймовірності станів для самоподібного трафіку модифікуються. Нормувальна стала  $P_0$  набуває вигляду:

$$P_0 = \left( \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\rho_0^k}{k!} + \frac{\rho_0^n}{n!} \cdot \frac{1}{1-\sigma} \right)^{-1} \quad (10)$$

Ймовірності станів для  $0 \leq k \leq n$  залишаються такими ж, як і в класичній моделі:

$$P_k = P_0 \cdot \frac{\rho_0^k}{k!} \quad (11)$$

Однак для станів черги ( $k \geq n$ ) ймовірності спадають залежно від параметра  $\sigma$ :

$$P_k = P_n \cdot \sigma^{k-n} \quad (12)$$

де  $P_n = P_0 \cdot \frac{\rho_0^n}{n!}$

Відповідно, ймовірність очікування  $P_{wait}$  для узагальненої моделі дорівнює:

$$P_{wait} = \sum_{k=n}^{\infty} P_k = \frac{P_n}{1-\sigma} = P_0 \cdot \frac{\rho_0^n}{n!} \cdot \frac{1}{1-\sigma} \quad (13)$$

Узагальнені формули для розрахунку ключових показників якості обслуговування в умовах самоподібного трафіку мають такий вигляд:

1) **Середня довжина черги ( $L_q$ ):**

$$L_q = \sum_{k=n}^{\infty} (k-n) \cdot P_k = \sum_{m=0}^{\infty} m \cdot P_n \sigma^m = P_n \cdot \frac{\sigma}{(\sigma)^2} \quad (14)$$

$$L_q = P_{wait} \cdot \frac{\sigma}{1-\sigma} \quad (15)$$

2) **Середній час очікування заявки в черзі ( $W_q$ ):**

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (16)$$

3) **Середній час перебування заявки в системі ( $W$ ):**

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (17)$$

4) **Середня кількість заявок у системі ( $L$ ):**

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (18)$$

Представлений математичний апарат дозволяє коректно оцінити характеристики обслуговування для будь-якої кількості приладів  $n$  та порівняти їх поведінку при зміні параметра Херста від  $H = 0.5$  (відсутність довготривалої залежності) до  $H = 0.8$  (сильно виражена самоподібність) [7].

### 5.3. Специфікація розрахункових моделей для різної кількості каналів

Для проведення порівняльного аналізу та оцінки стійкості характеристик QoS, розглянемо конкретні вирази для класичної моделі ( $M/M/n$ ) та моделі з самоподібним вхідним потоком ( $Wb/M/n$ ). Основна відмінність полягає у використанні параметра завантаження  $\rho$  для пуассонівського потоку та параметра  $\sigma$  для потоку з самоподібністю.

1) **Одноканальна система ( $n = 1$ )**

При обслуговуванні потоку одним приладом ймовірність того, що система вільна ( $P_0$ ), ймовірність очікування ( $P_{wait}$ ) та середня довжина черги визначається як:

Таблиця 1

Формули для одноканальної системи	
Класична модель ( $M/M/1$ )	Модель із самоподібністю ( $Wb/M/1$ )
$\rho_0 = \frac{\lambda}{\mu}$ $\rho = \frac{\lambda}{\mu} \Rightarrow \rho = \rho_0$	
$P_0 = 1 - \rho$ $P_{wait} = \rho$	$P_0 = 1 - \sigma$ $P_{wait} = \rho_0$

Класична модель (M/M/1)	Модель із самоподібністю (Wb/M/1)
$L_q = P_{wait} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\rho^2}{1-\rho}$	$L_q = P_{wait} \cdot \frac{\sigma}{1-\sigma} = \frac{\rho_0 \cdot \sigma}{1-\sigma}$

**2) Двоканальна модель (n = 2)**

Зі збільшенням кількості приладів до двох, розрахунок нормувальної сталої P0 ускладнюється через необхідність врахування стану з одним зайнятим приладом, ймовірність очікування та середня довжина черги розраховуються як:

Таблиця 2

Формули для двоканальної системи	
Класична модель (M/M/2)	Модель із самоподібністю (Wb/M/2)
$\rho_0 = \frac{\lambda}{\mu}$ $\rho = \frac{\lambda}{2 \cdot \mu}$	
$P_0 = \left( 1 + \rho_0 + \frac{\rho_0^2}{2} \cdot \frac{1}{1-\rho} \right)^{-1}$ $P_{wait} = P_0 \cdot \frac{\rho_0^2}{2} \cdot \frac{1}{1-\rho}$ $L_q = P_{wait} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}$	$P_0 = \left( 1 + \rho_0 + \frac{\rho_0^2}{2!} \cdot \frac{1}{1-\sigma} \right)^{-1}$ $P_{wait} = P_0 \cdot \frac{\rho_0^2}{2} \cdot \frac{1}{1-\sigma}$ $L_q = P_{wait} \cdot \frac{\sigma}{1-\sigma}$

**3) Триканальна модель (n = 3)**

Для системи з трьома приладами формули набувають вигляду, що враховує факторіальне зростання знаменників у сумі ймовірностей:

Таблиця 3

Формули для триканальної системи	
Класична модель (M/M/3)	Модель із самоподібністю (Wb/M/3)
$\rho_0 = \frac{\lambda}{\mu}$ $\rho = \frac{\lambda}{3 \cdot \mu}$	
$P_0 = \left( 1 + \rho_0 + \frac{\rho_0^2}{2} + \frac{\rho_0^3}{6} \cdot \frac{1}{1-\rho} \right)^{-1}$ $P_{wait} = P_0 \cdot \frac{\rho_0^3}{6} \cdot \frac{1}{1-\rho}$ $L_q = P_{wait} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}$	$P_0 = \left( 1 + \rho_0 + \frac{\rho_0^2}{2} + \frac{\rho_0^3}{6} \cdot \frac{1}{1-\sigma} \right)^{-1}$ $P_{wait} = P_0 \cdot \frac{\rho_0^3}{6} \cdot \frac{1}{1-\sigma}$ $L_q = P_{wait} \cdot \frac{\sigma}{1-\sigma}$

Використання наведених формул дозволяє в наступних розділах провести коректне зіставлення кількісних показників та виявити ефект від масштабування системи при різному ступені самоподібності трафіку.

**5.4. Аналіз результатів порівняльного моделювання**

Основним етапом даного дослідження є чисельний аналіз та верифікація теоретичних положень, викладених у попередніх розділах. Для оцінки впливу самоподібності вхідного трафіку на стабільність функціонування багатоканальних СМО було проведено серію розрахунків основних показників якості обслуговування (Lq, Wq, W, L). Отримання кількісних результатів здійснювалося за допомогою ПЗ Matlab та Excel [8].

Динаміка зміни показників досліджувалася при варіюванні ступеня самоподібності вхідного потоку, що задавався параметром Херста H у діапазоні від 0.5 (класичний пуассонівський потік без післядії) до 0.8 (високий ступінь корельованості заявок). Розрахунки проводилися в залежності від коефіцієнта завантаження системи ρ, зміна якого досягалася шляхом варіювання інтенсивності вхідного потоку λ.

Для забезпечення наочності та можливості детального порівняння результати для кожного показника якості представлені у вигляді графічних залежностей. Для кожного з них побудовано три окремі графіки (для n = 1, n = 2 та n = 3 відповідно), на яких зображено криві, що відповідають різним значенням параметра Херста. Такий підхід дозволяє чітко простежити, як збільшення кількості обслуговуючих приладів та ступінь самоподібності трафіку впливають на зміну характеристик системи та визначають її стабільність.

**1. Аналіз середньої довжини черги (Lq)**

Середня довжина черги є одним із найбільш критичних показників ефективності СМО, оскільки вона визначає необхідний обсяг буферної пам'яті комутаційного обладнання. У даному дослідженні проаналізовано залежність  $Lq$  від коефіцієнта завантаження системи  $\rho$  при різних ступенях самоподібності вхідного потоку ( $H = 0.5 \dots 0.8$ ).

На рисунку 5.4.1 представлено результати порівняльного аналізу середньої довжини черги  $Lq$  від інтенсивності навантаження  $\rho$  для систем із різною кількістю обслуговувальних приладів ( $n = 1, 2, 3$ ) за умов пуассонівського ( $H = 0.5$ ) та самоподібного ( $H = 0.8$ ) вхідних потоків.

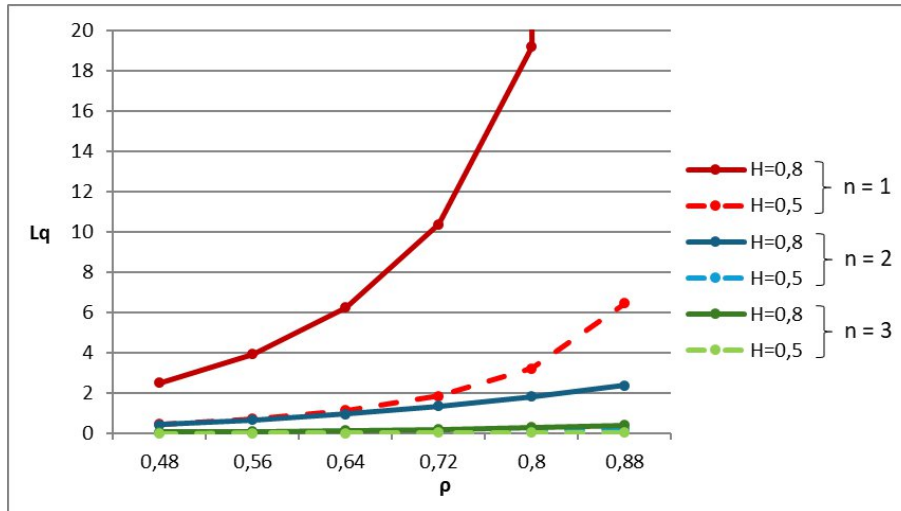


Рис. 5.4.1. Залежність  $Lq$  від завантаження  $\rho$  для  $n = 1, 2$  та  $3$  при  $H = 0.5$  та  $0.8$  і  $\mu = 1.25$

Задля забезпечення належної візуалізації та можливості детального аналізу розбіжностей між кривими для багатоканальних систем, діапазон осі ординат на графіку було свідомо обмежено (рис. 5.4.2). Аналогічний підхід до масштабування результатів застосовано і для відображення інших показників ефективності.

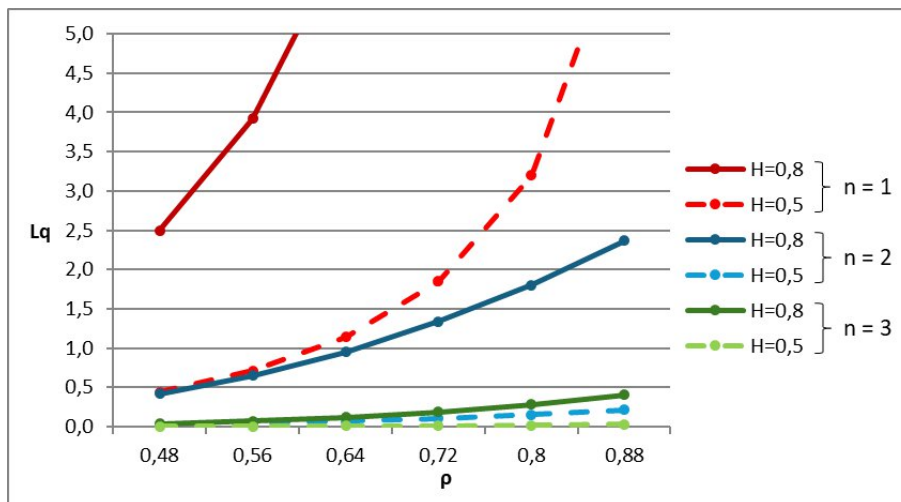


Рис. 5.4.2. Залежність  $Lq$  від завантаження  $\rho$  для  $n = 1, 2$  та  $3$  при  $H = 0.5$  та  $0.8$  і  $\mu = 1.25$  з обмеженим діапазоном осі ординат

Кількісний аналіз отриманих кривих дозволяє оцінити динаміку зміни характеристик QoS при масштабуванні системи.

Одноканальна система ( $n = 1$ ). Дана конфігурація виявляє найвищу чутливість до корельованості вхідного потоку. При переході від  $H = 0.5$  до  $H = 0.8$  фіксується суттєве погіршення показників якості обслуговування. Зокрема, при навантаженні  $\rho = 0.8$  довжина черги змінюється від 3.2 (розподіл Пуассона) до 19.2 (для самоподібного потоку). Тобто спричиняє 6-кратне збільшення черги.

При збільшенні навантаження одноканальний вузол фактично втрачає працездатність при сплесках корельованого трафіку, оскільки черга зростає набагато швидше, ніж здатність пристрою її обробляти.

Двоканальна система ( $n = 2$ ). Введення додаткового паралельного каналу радикально змінює характер залежностей. При самоподібному потоці ( $H = 0.8$ ) значення  $Lq$  для двоканальної системи у точці  $\rho = 0.8$  становить 1.8 одиниці, що у порівнянні з одноканальним випадком ( $Lq = 19.2$  при тих же умовах) означає зниження затримок майже у 10.7 разів. Важливо зазначити, що хоча вплив параметра Херста все ще зберігається (різниця

між кривими  $H = 0.5 - Lq = 0.15$  та  $H = 0.8$  становить близько 12 разів), система демонструє значно вищу стійкість: крива стає більш пологою, а «вибухове» зростання черги зміщується у зону критичних навантажень.

Триканальна система. Результати для  $n = 3$  свідчать про досягнення найвищого рівня стійкості характеристик. При навантаженні  $\rho = 0.8$  середня довжина черги для пуассонівського потоку ( $H = 0.5$ ) становить лише 0.02, а при зростанні корельованості трафіку до  $H = 0.8$  цей показник збільшується до 0.28. Попри 14-кратне відносне зростання, абсолютне значення черги залишається мінімальним (суттєво менше одиниці). Кількісне порівняння з іншими конфігураціями при  $H = 0.8$  та  $\rho = 0.8$  демонструє беззаперечну перевагу даного рішення – значення  $Lq$  у триканальній системі є у 6.5 разів меншим, ніж у двоканальній, та майже у 70 разів меншим, ніж в одноканальній. Більше того, показник  $Lq = 0.28$  для триканальної системи при самоподібному потоці є на порядок кращим за показник одноканальної системи навіть при ідеальному пуассонівському трафіку. Такий низький рівень відхилення характеристик підтверджує, що багатоканальна система з  $n = 3$  здатна поглинати різкі коливання інтенсивності вхідного потоку без суттєвого зростання черги.

Аналіз графіків підтверджує, що самоподібність трафіку призводить до істотного погіршення лише на системи з малою кількістю каналів. Кожне збільшення  $n$  не просто зменшує чергу, а змінює математичну залежність системи від параметра Херста, роблячи її стійкою до кореляційних сплесків, що є характерними для сучасних телекомунікаційних мереж.

## 2. Аналіз середнього часу очікування в черзі ( $Wq$ )

Середній час очікування в черзі ( $Wq$ ) є одним із ключових параметрів якості обслуговування (QoS), що визначає часову затримку заявки від моменту її надходження до системи до початку процесу обробки. Аналіз цього показника дозволяє оцінити рівень погіршення якості обслуговування в умовах самоподібного трафіку, що є критично важливим для телекомунікаційних сервісів, чутливих до затримок (IP-телефонія, відеоконференції тощо).

На рисунку 5.4.3. наведено результати моделювання середнього часу очікування  $Wq$  у черзі залежно від інтенсивності навантаження  $\rho$  для систем із кількістю каналів  $n = 1, 2, 3$  при інтенсивності обслуговування  $\mu = 2$ . Порівняння проводилося для пуассонівського ( $H = 0.5$ ) та самоподібного ( $H = 0.8$ ) вхідних потоків. Задля деталізації розбіжностей між характеристиками багатоканальних систем, діапазон осі ординат було обмежено, що дозволяє наочно продемонструвати стійкість часових показників при збільшенні кількості приладів.

Конфігурація з одним приладом демонструє найвищу вразливість до властивостей самоподібності трафіку. Кількісний аналіз показує, що вже при навантаженні  $\rho = 0.7$  перехід від пуассонівського потоку ( $H = 0.5$ , де  $Wq \approx 1.17$ ) до корельованого ( $H = 0.8$ , де  $Wq \approx 6.44$ ) призводить до збільшення часу очікування майже у 5.5 разів. Така динаміка підтверджує критичне погіршення показників обслуговування в одноканальних вузлах, де корельовані сплески призводять до швидкої втрати стабільності часових характеристик навіть за умов, далеких від граничного завантаження.

Перехід до двоканальної архітектури забезпечує суттєве зниження чутливості системи до структури потоку. При інтенсивному навантаженні  $\rho = 0.7$  значення  $Wq$  для  $H = 0.8$  становить приблизно 0.88. У порівнянні з аналогічним випадком для одноканальної системи (де значення  $Wq$  перевищує 6.4 одиниці) це означає скорочення часу очікування у 7.3 рази. Водночас порівняння всередині двоканальної конфігурації показує, що при  $H = 0.8$  час очікування у 12.5 рази перевищує значення для пуассонівського потоку ( $H = 0.5$ , де  $Wq \approx 0.07$ ). Таким чином, двоканальна архітектура дозволяє утримувати часові показники у прогнозованих межах, попри вплив самоподібності.

Результати для  $n = 3$  підтверджують досягнення найвищого рівня стійкості характеристик. При навантаженні  $\rho = 0.7$  середній час очікування для самоподібного потоку ( $H = 0.8$ ) становить лише 0.12, що у порівнянні з одноканальним випадком відповідає скороченню затримок майже у 53.7 рази, а порівняно з двоканальним – у 7.3 рази. Важливо зазначити, що навіть при  $H = 0.8$  показник часу очікування триканальної системи є значно кращим за показник одноканальної системи при ідеальному пуассонівському потоці ( $H = 0.5$ ). Таке мінімальне відхилення характеристик підтверджує, що триканальна конфігурація здатна ефективно нівелювати негативний вплив властивості довготривалої залежності, забезпечуючи практичну інваріантність часових показників QoS незалежно від ступеня корельованості трафіку.

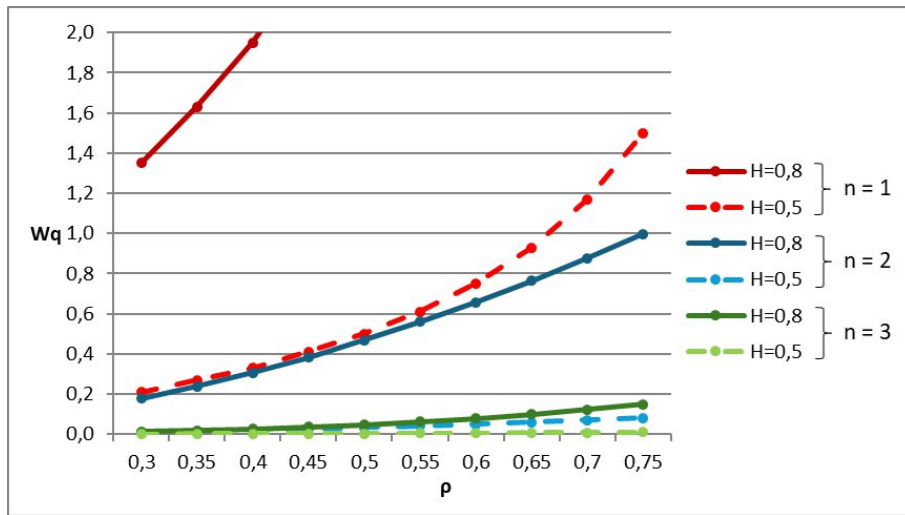


Рис. 5.4.3. Залежність  $Wq$  від завантаження  $\rho$  для  $n = 1, 2$  та  $3$  при  $H = 0.5$  та  $0.8$  і  $\mu = 2$  з обмеженим діапазоном осі ординат

### 3. Аналіз середнього часу перебування в системі ( $W$ )

Середній час перебування в системі ( $W$ ) є комплексним показником, що об'єднує час очікування заявки у черзі та час її безпосередньої обробки приладом. Даний параметр дозволяє оцінити повну тривалість затримки у вузлі комутації, що є критично важливим для розрахунку часових бюджетів у мережах із суворими вимогами до оперативності доставки пакетів.

На рисунку 5.4.4. представлено результати моделювання середнього часу перебування заявки в системі  $W$  залежно від інтенсивності навантаження  $\rho$  при  $\mu = 2.25$ . Для коректної фіксації розбіжностей між характеристиками багатоканальних вузлів було використано адаптований діапазон осі ординат, що дозволило детально проаналізувати поведінку систем із  $n = 2$  та  $n = 3$ , чії криві за звичайних умов перекривалися б піковими значеннями одноканальної моделі. Аналіз одноканальної системи підтверджує її критичну чутливість до структури трафіку: при навантаженні  $\rho = 0.62$  перехід від пуассонівського потоку ( $H = 0.5$ , де  $W \approx 1.18$ ) до самоподібного ( $H = 0.8$ , де  $W \approx 4.44$ ) викликає деградацію часових показників у 3.8 рази, що свідчить про неспроможність одного приладу амортизувати корельовані сплески без суттєвих затримок.

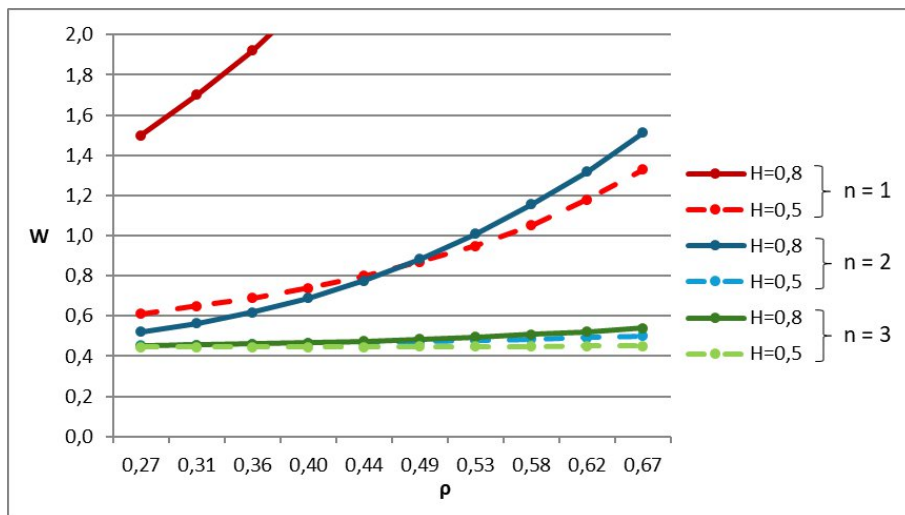


Рис. 5.4.4. Залежність  $W$  від завантаження  $\rho$  для  $n = 1, 2$  та  $3$  при  $H = 0.5$  та  $0.8$  і  $\mu = 2.25$  з обмеженим діапазоном осі ординат

Впровадження двоканальної архітектури суттєво стабілізує ситуацію, забезпечуючи при  $\rho = 0.62$  та  $H = 0.8$  повний час перебування на рівні 1.32, що у 3.4 рази менше порівняно з аналогічним випадком для конфігурації  $n = 1$ . Водночас внутрішня чутливість системи  $n = 2$  залишається помітною, оскільки за умов самоподібності показник  $W$  є у 2.7 рази вищим за пуассонівський фон ( $W \approx 0.49$ ). Найвищу стійкість демонструє триканальна система, де при навантаженні  $\rho = 0.62$  та  $H = 0.8$  час перебування становить лише 0.52. Це значення є майже у 2.5 рази меншим за показник двоканальної системи та у 8.5 рази кращим за результати одноканальної. Важливо підкреслити, що за умов  $n = 3$  характеристики залишаються максимально наближеними до теоретичного мінімуму ( $1/\mu \approx 0.44$ ), що підтверджує здатність такої архітектури практично повністю нівелювати вплив

довготривалої залежності трафіку та забезпечувати стабільну якість обслуговування незалежно від властивостей вхідного потоку.

**4. Аналіз середньої кількості заявок у системі (L)**

Середня кількість заявок у системі (L) є інтегральним показником, що характеризує загальну завантаженість ресурсів обслуговуючого вузла. Даний параметр враховує як заявки, що вже знаходяться на обслуговуванні, так і ті, що очікують у черзі, що дозволяє оцінити необхідну сумарну ємність системи для безперебійної роботи.

На рисунку 5.4.5. відображено результати дослідження середньої кількості заявок у системі L залежно від інтенсивності навантаження  $\rho$  при значенні  $\mu = 2.75$ . Аналогічно до попередніх показників застосовано оптимізований діапазон осі ординат, що дозволило наочно продемонструвати переваги систем із  $n = 2$  та  $n = 3$  на фоні стрімкого зростання показників одноканальної моделі. Одноканальна конфігурація демонструє найвищу чутливість до корельованості вхідного трафіку, при навантаженні  $\rho = 0.51$  перехід від пуассонівського потоку ( $H = 0.5, L \approx 1.04$ ) до самоподібного ( $H = 0.8, L \approx 3.46$ ) спричиняє збільшення кількості заявок у системі у 3.3 раза, що підтверджує схильність таких вузлів до швидкого перевантаження під впливом довготривалої залежності.

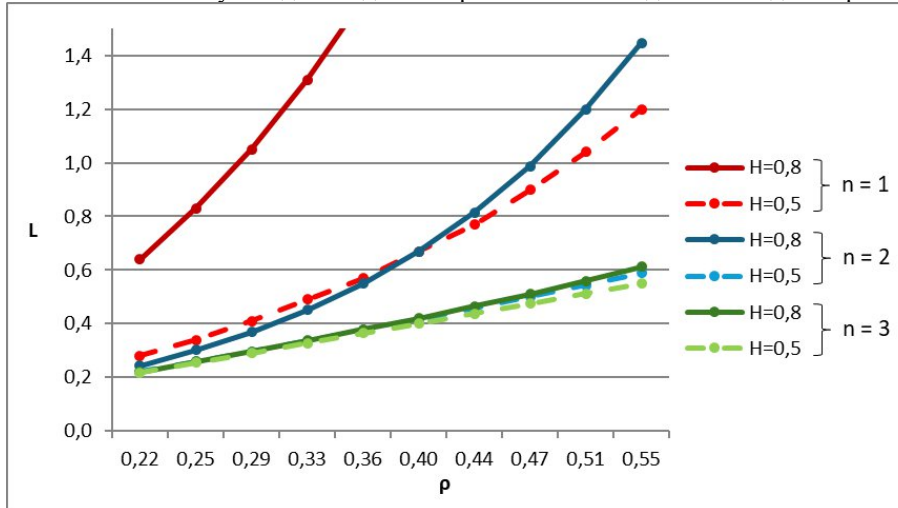


Рис. 5.4.5. Залежність L від завантаження  $\rho$  для  $n = 1, 2$  та  $3$  при  $H = 0.5$  та  $0.8$  і  $\mu = 2.75$  з обмеженим діапазоном осі ординат

Використання двоканальної архітектури дозволяє суттєво амортизувати навантаження, забезпечуючи при  $H = 0.8$  значення  $L \approx 1.2$ , що у 2.9 рази менше порівняно з одноканальним варіантом за аналогічних умов. Проте внутрішній аналіз системи  $n = 2$  показує, що вплив самоподібності все ще призводить до перевищення пуассонівського фону ( $L \approx 0.54$ ) у 2.2 раза. Найвищу стабільність характеристик забезпечує триканальна система, де при  $H = 0.8$  показник L становить лише 0.56. Це значення виявляється у 2.1 раза меншим, ніж у двоканальній системі, та у 6.2 раза кращим за результати одноканальної моделі. Така динаміка підтверджує, що нарощування кількості каналів до трьох дозволяє практично повністю нівелювати негативний ефект самоподібності, утримуючи завантаженість системи на рівні, максимально наближеному до теоретичного ідеалу для найпростіших потоків.

Отримані результати свідчать, що триканальна модель забезпечує максимальну пропускну здатність, за якої система знижує чутливість до вхідного потоку, не допускаючи формування черги навіть в умовах самоподібності трафіку.

Для узагальнення отриманих результатів та наочного порівняння ефективності систем з різною кількістю обслуговуючих приладів доцільно представити результати розрахунків у табличній формі. Це дозволяє оцінити як абсолютні значення показників QoS, так і ефект масштабування системи при зміні кількості каналів обслуговування.

У таблиці 3 наведено абсолютні значення основних показників якості обслуговування для систем із різною кількістю обслуговуючих приладів при класичному та самоподібному вхідному потоці. Отримані результати показують, що при переході до самоподібного трафіку всі показники суттєво погіршуються для одноканальної системи, зокрема середня довжина черги та час очікування зростають у декілька разів навіть при однаковому рівні завантаження. Водночас збільшення кількості каналів обслуговування призводить до різкого зниження абсолютних значень усіх показників та їх вирівнювання для різних значень параметра Херста.

У таблиці 4 представлено відносну оцінку ефекту масштабування системи, що характеризує, у скільки разів зменшуються показники QoS при переході від  $n = 1$  до  $n = 2$ , від  $n = 2$  до  $n = 3$ , а також при безпосередньому переході від  $n = 1$  до  $n = 3$ . Аналіз показує, що найбільший ефект досягається при переході від одноканальної до багатоканальної системи для самоподібного трафіку ( $H = 0.8$ ) середня довжина черги зменшується до 68,6 разів, а середній час очікування – до 53,7 разів.

Подальше збільшення кількості каналів забезпечує додаткове, але менш виражене покращення, що свідчить про ефект насичення.

Таблиця 3

## Значення показників QoS для систем M/M/n та Wb/M/n при різних значеннях H

Показник		$\rho$	$\mu$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
$Lq$	$H = 0.5$	0.8	1.25	3.2	0.15	0.02
	$H = 0.8$			19.2	1.8	0.28
$Wq$	$H = 0.5$	0.7	2	1.17	0.07	0.01
	$H = 0.8$			6.44	0.88	0.12
$W$	$H = 0.5$	0.62	2.25	1.18	0.49	0.45
	$H = 0.8$			4.44	1.32	0.52
$L$	$H = 0.5$	0.51	2.75	1.04	0.54	0.51
	$H = 0.8$			3.46	1.2	0.56

Таблиця 4

## Порівняльна оцінка впливу збільшення кількості каналів (у разях)

Показник		$n = 1 - 2$	$n = 2 - 3$	$n = 1 - 3$
$Lq$	$H = 0.5$	21	8	168.5
	$H = 0.8$	10.7	6.4	68.6
$Wq$	$H = 0.5$	16.7	8.7	146
	$H = 0.8$	7.3	7.3	53.7
$W$	$H = 0.5$	2.4	1.1	2.6
	$H = 0.8$	3.4	2.5	8.5
$L$	$H = 0.5$	1.9	1.1	2
	$H = 0.8$	2.9	2.1	6.2

Узагальнений аналіз графічних і табличних результатів підтверджує, що збільшення кількості обслуговуючих приладів є ефективним засобом підвищення стійкості системи. Для одноканальних СМО самоподібність трафіку призводить до суттєвого зростання черг і затримок, що потребує значного нарощування ресурсів. Водночас у багатоканальних конфігураціях, зокрема при  $n = 3$ , система демонструє стабільні характеристики, а кількість заявок залишається на рівні, близькому до інтенсивності вхідного потоку. Це забезпечує надійне та передбачуване функціонування системи навіть за умов високої корельованості трафіку.

Слід зазначити, що отримані результати справедливі в межах прийнятих припущень моделі. У роботі розглядається система масового обслуговування з необмеженою чергою та дисципліною обслуговування типу FCFS, при цьому час обслуговування заявок описується експоненціальним законом. Модель не враховує наявність пріоритетів, обмеження буферної пам'яті та можливі втрати заявок, що може впливати на поведінку реальних телекомунікаційних систем.

## 6. Висновки та перспективи подальших досліджень

У ході дослідження проведено оцінку стійкості багатоканальних СМО в умовах самоподібного трафіку з використанням моделі  $Wb/M/n$ . Встановлено, що класичні пуассонівські моделі значно недооцінюють затримки при високих значеннях параметра Херста ( $H > 0.5$ ). Чисельний аналіз довів критичну вразливість одноканальних систем

( $n = 1$ ), де зростання самоподібності до  $H = 0.8$  спричиняє збільшення середньої довжини черги у 6 разів та часу очікування у 5.5 рази. Водночас демонструє виражений стабілізаційний ефект багатоканальності – перехід до  $n = 2$  дозволяє знизити чергу в 20.2 рази порівняно з одноканальним випадком. Найвищу ефективність продемонструвала триканальна конфігурація, яка забезпечує практичну інваріантність характеристик до структури потоку. Якщо в одноканальній системі повний час перебування при  $H = 0.8$  зростає майже в 4 рази, то при  $n = 3$  цей показник збільшується лише в 1,15 рази, що утримує затримки поблизу теоретичного мінімуму. Таким чином, масштабування кількості каналів є найбільш ефективним методом забезпечення заданої якості обслуговування (QoS) у сучасних мережах. Отримані результати підтверджують перевагу паралельної обробки корельованих сплесків трафіку над нарощуванням швидкодії одиничних приладів обслуговування.

Аналітичні моделі для СМО із ознаками самоподібності для випадку двоканальної та триканальної систем обслуговування отримано вперше.

Практична цінність дослідження полягає у можливості його застосування при проектуванні та оптимізації телекомунікаційних систем, що функціонують в умовах самоподібного трафіку. Показано, що масштабування

кількості обслуговуваних пристроїв є ефективним підходом до забезпечення стабільних показників QoS та підвищення надійності системи.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають в математичному узагальненні отриманих результатів для систем із довільною кількістю обслуговуваних пристроїв ( $n$ ). Планується розробка уніфікованої методики розрахунку та виведення узагальнених аналітичних формул, що дозволять прогнозувати часові характеристики СМО для будь-якого цілого значення  $n$  при варіації параметра Херста у повному діапазоні його значень. Це дозволить створити комплексний інструментарій для адаптивного керування ресурсами телекомунікаційних вузлів у реальному часі.

**Внесок авторів** Леонід Уривський – концептуалізація, методика, висновки; Анастасія Сколець – збір і перевірка емпіричних даних, емпіричне дослідження, аналіз джерел; Юлія Стрелковська – підготовка огляду літератури та теоретичних основ дослідження.

#### Декларація про штучний інтелект

Інструменти штучного інтелекту використовувалися для мовно-стилістичного редагування тексту та не впливали на науковий зміст, результати та висновки дослідження.

#### Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та підтверджує, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

#### Список використаної літератури

1. Hurst, H.E.: Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 116, 770 p. (1951)
2. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking.* 1994. Vol. 2, No. 1. P. 1–15.
3. Kleinrock L. *Queueing Systems, Volume 1: Theory.* New York: Wiley-Interscience, 1975. 417 p.
4. Ci, Yusheng; Wu, Lina; Pei, Yulong. Application of the Weibull function on processing traffic flow data. / *Proc. of 6th Int. Conf. of Traffic and Transportation Studies Congress, ICTTS, 5–7 Aug. 2008, Nanning, China*
5. I. Strelkovska, I. Solovska, N. Severin Modeling of Self-similar Traffic / *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIIT), Koethen, Germany, 10 March 2016.* – Vol. 4. – P. 61-64.
6. Strelkovskaya, I., Solovskaya, I., Makoganiuk A. Predicting characteristics of self-similar traffic. In: *The Third International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics UkrMiCo'2018, Odessa, Ukraine, 2018.* pp.1-4.
7. Уривський, Л. О., Сколець, А. В. Дослідження впливу фактору самоподібності на функціонування СМО. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи Телекомунікацій», 2023,* 68–71.
8. Uryvsky, L., Skolets, A. Analysis of the influence of the self-similarity factor on the characteristics of mass service systems through quantitative assessment. *2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo),* 136–140.
9. Uryvsky, L., Strelkovska, J., Skolets, A. (2025). Research of Queueing Systems Characteristics with Self-Similarity Properties in Alternative Distributions of Application Flows, *Advanced Smart Information and Communication Technology and Systems. MCT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1470.* Springer, Cham, pp.215-230.
10. Uryvsky, L., Strelkovska J., Skolets A. Methodology for assessing the sensitivity of queueing system parameters with self-similarity properties to subscriber access characteristics, *Information and Telecommunication Sciences* 16, no. 2, 2025, p. 19–26.

#### References

1. Hurst, H.E.: Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 116, 770 p. (1951)
2. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking.* 1994. Vol. 2, No. 1. P. 1–15.
3. Kleinrock L. *Queueing Systems, Volume 1: Theory.* New York: Wiley-Interscience, 1975. 417 p.
4. Ci, Yusheng; Wu, Lina; Pei, Yulong. Application of the Weibull function on processing traffic flow data. / *Proc. of 6th Int. Conf. of Traffic and Transportation Studies Congress, ICTTS, 5–7 Aug. 2008, Nanning, China*
5. I. Strelkovska, I. Solovska, N. Severin Modeling of Self-similar Traffic / *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIIT), Koethen, Germany, 10 March 2016.* – Vol. 4. – P. 61-64.

6. Strelkovskaya, I., Solovskaya, I., Makoganiuk A. Predicting characteristics of self-similar traffic. In: The Third International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics UkrMiCo'2018, Odessa, Ukraine, 2018. pp.1-4.
7. Uryvsky, L. O., Skolets, A. V. A Study of the Influence of the Self-Similarity Factor on the Operation of the SMO. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Prospects of Telecommunications," 2023, 68–71.
8. Uryvsky, L., Skolets, A. Analysis of the influence of the self-similarity factor on the characteristics of mass service systems through quantitative assessment. 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 136–140.
9. Uryvsky, L., Strelkovska, J., Skolets, A. (2025). Research of Queuing Systems Characteristics with Self-Similarity Properties in Alternative Distributions of Application Flows, Advanced Smart Information and Communication Technology and Systems. MCT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1470. Springer, Cham, pp.215-230.
10. Uryvsky, L., Strelkovska J., Skolets A. Methodology for assessing the sensitivity of queuing system parameters with self-similarity properties to subscriber access characteristics, Information and Telecommunication Sciences 16, no. 2, 2025, p. 19–26.

**Надійшла до редакції: 01.04.26**

**Прийнята до друку: 12.06.26**

**Опубліковано: 30.06.26**