

М. В. Шиман, М. В. Савченко

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

МЕТОД АНАЛІЗУ ВПЛИВУ РІЗНОРІДНОСТІ ТРАФІКУ НА ЗАТРИМКИ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Актуальність. Сучасні телекомунікаційні системи функціонують в умовах високої різномірності мережевого трафіку, зумовленої одночасною присутністю пуасонівських, bursty- та самоподібних потоків, характерних для мультимедійних сервісів, IoT-застосунків і мереж реального часу. Класичні моделі теорії черг, що базуються на припущеннях незалежності та експоненціального розподілу міжприбуткових інтервалів, не здатні адекватно описати вплив сплесковості та довготривалої кореляції на затримки, що призводить до систематичного заниження оцінок показників якості обслуговування. Це зумовлює необхідність розроблення узагальнених методів аналізу, які враховують статистичну структуру різномірного трафіку. **Об’єкт дослідження:** процеси формування затримок у телекомунікаційних системах масового обслуговування за наявності різномірних потоків трафіку. **Мета статті:** розробка та дослідження узагальненого аналітико-експериментального методу оцінювання впливу Poisson-, bursty- та self-similar-трафіку на середню затримку в телекомунікаційних системах з урахуванням варіативності та самоподібності вхідних потоків. **Результати дослідження.** У статті запропоновано математичний підхід до аналізу затримок на основі моделі типу $G/G/1$, у якому різномірність трафіку враховується через ефективний коефіцієнт варіації міжприбуткових інтервалів та параметр Херста. Отримано аналітичні залежності, що демонструють нелінійне зростання середньої затримки зі збільшенням burstiness та ступеня самоподібності потоку. Проведено імітаційне моделювання в середовищі OMNeT++, результати якого підтвердили адекватність аналітичних оцінок і показали, що самоподібний трафік формує найбільш критичні режими роботи системи з лавиноподібним зростанням затримки при високих навантаженнях. **Висновки.** Показано, що середня затримка в телекомунікаційних системах визначається не лише інтенсивністю надходжень, а й статистичною структурою трафіку. Bursty- та самоподібні потоки істотно погіршують показники QoS навіть за незмінної середньої інтенсивності, що обмежує застосовність класичних пуасонівських моделей. Запропонований метод забезпечує точніше прогнозування затримок і може бути використаний для аналізу та проєктування високонавантажених телекомунікаційних мереж. Сфера використання отриманих результатів: безпроводні та дротові телекомунікаційні мережі, системи Інтернету речей, мультисервісні мережі нового покоління, задачі аналізу QoS і оптимізації дисциплін обслуговування.

Ключові слова: телекомунікаційні система, різномірний трафік, теорія черг, самоподібність, параметр Херста, затримка, QoS.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні телекомунікаційні системи функціонують в умовах високої різномірності мережевого трафіку, що зумовлено появою широкого спектра сервісів – від традиційної передавання даних до мультимедійних потоків, IoT-сегментів і хмарних застосунків. У таких системах одночасно циркулюють потоки різної статистичної природи: регулярні, стохастично рівномірні, bursty-процеси з вираженими сплесками інтенсивності, а також самоподібні потоки, що характеризуються довготривалою кореляцією і важкими хвостами розподілів. Наявність цих компонент значно ускладнює аналіз поведінки вузлів мережі, оскільки класичні моделі, заставані на пуасонівських припущеннях, не здатні адекватно відтворити вплив фрактальності та варіативності міжприбуткових інтервалів на затримки. Унаслідок цього виникає потреба у методах, що враховують реальні характеристики трафіку та дозволяють оцінювати показники якості обслуговування з урахуванням неоднорідності потоків.

Актуальність роботи визначається тим, що різномірність трафіку істотно впливає на ключові параметри якості обслуговування, зокрема на середню затримку, довжину черги, імовірність перевантаження та стійкість мережевих вузлів до пікових навантажень. Самоподібні та bursty-потоки стають характерною рисою сучасних мереж, оскільки вони при-

таманні відеостримінгу, соціальним платформам, сервісам реального часу й IoT-пристроєм, які генерують дані нерівномірно та часто корельовано. Ігнорування цих властивостей призводить до недооцінки реальних значень затримок і неправильної оцінки пропускної здатності, що особливо критично для мереж високого завантаження. Наукові дослідження останніх років підтверджують, що вплив фрактальності трафіку може бути домінуючим чинником у формуванні затримок, однак комплексного методу оцінювання цього впливу, який би інтегрував Poisson-, bursty- та self-similar-компоненти, досі не сформовано. Саме тому розроблення узагальненого методу аналізу впливу різномірності трафіку на показники QoS є актуальним завданням для телекомунікаційних систем нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У класичних підходах до аналізу мережевого трафіку основою виступають моделі на базі пуасонівського процесу, які передбачають незалежність міжприбуткових інтервалів та експоненціальний характер надходжень [1-2]. Такі моделі добре описують системи з рівномірними потоками, однак втрачають точність при появі нерегулярності або корельованості у трафіку [3-4]. Подальший розвиток теорії привів до моделей On/Off-типу, які дозволяють відтворити bursty-поведінку через чергування фаз високої та низької активності [3, 5]. Ці моделі дають змогу оцінювати вплив сплескових навантажень на черги, однак не

можуть відобразити довготривалу кореляцію, що властива реальному інтернет-трафіку.

Наступним кроком стало використання марковських модульованих потоків (ММРР), які дозволяють налаштувати кореляційні властивості та відповідати широкому спектру статистичних профілів вхідного трафіку [6, 7]. Проте навіть ММРР-моделі виявилися недостатніми для опису явища самоподібності. Значний внесок у розуміння цього явища зробили дослідження, які довели, що мережевий трафік демонструє властивості фрактальності, які неможливо пояснити пуасонівськими моделями [8-11]. Самоподібні потоки характеризуються параметром Херста і мають властивість довготривалої залежності, що призводить до різкого збільшення дисперсії на великих часових інтервалах та спричиняє суттєве зростання затримок у чергах. Саме тому сучасні моделі прагнуть поєднати класичні пуасонівські підходи з моделями, що враховують burstiness та самоподібність, однак єдиної узагальненої методики для оцінювання впливу різномірності трафіку на затримку сьогодні не існує.

Метою роботи є розроблення узагальненого аналітико-експериментального методу оцінювання впливу різномірних типів трафіку на середню затримку в телекомунікаційних системах на основі аналізу структурних характеристик Poisson-, bursty- та self-similar-потоків. Досягнення цієї мети передбачає виявлення фундаментальних залежностей між варіативністю міжприбуткових інтервалів, ступенем самоподібності та поведінкою системи чергування. У межах дослідження необхідно сформулювати математичні співвідношення, які описують вхідний трафік з урахуванням його кореляційних властивостей, побудувати універсальну модель черги, що дозволяє оцінювати середню затримку для різних класів потоків, а також виконати модельні експерименти для порівняння аналітичних оцінок із результатами симуляції. Підсумковим етапом є визначення впливу окремих параметрів – коефіцієнта варіації, параметра Херста, інтенсивності On/Off-фаз – на величину затримки, що дозволить окреслити області поведінки системи, де різномірність трафіку має критичне значення.

Основний матеріал

Математичний метод аналізу впливу різномірності трафіку на затримки. Для коректного оцінювання впливу різномірних потоків на затримку в телекомунікаційних системах необхідно сформулювати узагальнену математичну модель вхідного трафіку, яка охоплює Poisson-потоки, bursty-потоки та самоподібні фрактальні потоки. Розпочнемо з фундаментального представлення процесу надходжень. Нехай $A(t)$ – кількість заявок, що надійшли в систему до моменту часу t . Тоді середня інтенсивність визначається як

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}[A(t)]}{t}. \quad (1)$$

Для пуасонівської компоненти приймається, що міжприбуткові інтервали X_k незалежні та експоненційно розподілені:

$$X_k \sim \text{Exp}(\lambda_p), \quad \mathbb{E}[X_k] = 1/\lambda_p. \quad (2)$$

Цей випадок характеризується найбільшою “регулярністю” процесу, адже коефіцієнт варіації

$$C_v^{(P)} = 1. \quad (3)$$

Для bursty-потоків використаємо двохстанну модель On/Off-типу, де під час On-фази інтенсивність надходжень λ_{on} є значно вищою від фонові, що приводить до появи трафікових “сплесків”. Нехай тривалості фаз мають математичні сподівання

$$\mathbb{E}[T_{on}] = \frac{1}{\alpha}, \quad \mathbb{E}[T_{off}] = \frac{1}{\beta}. \quad (4)$$

Стационарна частка часу, коли система перебуває в активній фазі, становить

$$p_{on} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}. \quad (5)$$

Тоді середня інтенсивність bursty-потоків дорівнює

$$\lambda_B = p_{on} \lambda_{on}. \quad (6)$$

Для фрактальної компоненти введемо самоподібний процес із параметром Херста H . Самоподібність відображається співвідношенням

$$X(at) = da^H X(t), \quad (7)$$

що означає інваріантність статистичної структури щодо масштабування. Одним із ключових наслідків цього є нелінійний ріст дисперсії:

$$\text{Var}[A(t)] \sim t^{2H}. \quad (8)$$

Фактично це означає, що для $H > 0.5$ у потоці присутня довготривала залежність (long-range dependence), яка посилює виникнення пікових навантажень. Сумарний різномірний вхідний потік є таким:

$$\lambda_{tot} = \lambda_p + \lambda_B + \lambda_F, \quad (9)$$

де λ_F – середня інтенсивність фрактального процесу, оцінена з реального або синтезованого трафіку. Хоч сама фрактальність не змінює середнього значення λ_F , вона істотно збільшує варіативність надходжень, що ми відобразимо через коефіцієнт варіації міжприбуткових інтервалів:

$$C_v^2 = \text{Var}[X] / (\mathbb{E}[X])^2. \quad (10)$$

Для фрактальних потоків відома апроксимація

$$C_v^{(F)} \approx \frac{1}{2H-1}, \quad (11)$$

що показує, як зменшення H до 0.5 різко збільшує варіативність процесу.

Для аналізу затримок використовуємо модель типу $G/G/1$, де час обслуговування має моменти

$$\mathbb{E}[S], \quad \mathbb{E}[S^2]. \quad (12)$$

Класична апроксимація Поллачека–Хінчина для середнього часу очікування у черзі має вигляд

$$\mathbb{E}[W_q] = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \cdot \mathbb{E}[S], \quad (13)$$

$$\text{де } \rho = \lambda_{tot} \mathbb{E}[S], \quad (14)$$

$$\text{та} \quad C_a^2 = C_v^2, \quad (15)$$

є коефіцієнтами варіації вхідних інтервалів.

З формули (13) безпосередньо випливає, що на затримку впливають два основні фактори: інтенсивність (через ρ) та варіативність (через C_a^2). Саме тому для різномірних потоків важливо розглядати не тільки середню інтенсивність, а й статистичну структуру надходжень, яка значною мірою визначає “нерівність” трафіку. Для bursty-потоків коефіцієнт варіації можна оцінити як

$$C_v^{(B)} \approx \frac{\lambda_{on}}{\lambda_B} > 1, \quad (16)$$

що математично формалізує здатність такого процесу генерувати “сплески”.

Для сумарного різномірного трафіку з 3 компонент отримаємо ефективний коефіцієнт варіації

$$C_{a,eff}^2 = w_P C_v^{(P)2} + w_B C_v^{(B)2} + w_F C_v^{(F)2}, \quad (17)$$

де ваги визначаються часткою кожного потоку:

$$w_i = \lambda_i / \lambda_{tot}. \quad (18)$$

Підставивши (17) у (13), одержуємо

$$\mathbb{E}[W_q] = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{C_{a,eff}^2 + C_s^2}{2} \cdot \mathbb{E}[S]. \quad (19)$$

Цей вираз і є ключем до оцінювання впливу різномірності на затримку. Він показує, що навіть за незмінної середньої інтенсивності λ_{tot} , збільшення фрактальності або burstiness неминує веде до росту затримки. Оскільки фрактальні потоки з параметром H мають властивість “концентрувати” навантаження у важких хвостах розподілу, затримка набуває наближеного вигляду

$$\mathbb{E}[W_q] \sim \frac{1}{(1-\rho)^{2H}}, \quad (20)$$

що демонструє їхній нелінійний вплив на систему при наближенні до границі стабільності $\rho \rightarrow 1$.

У багатьох практичних випадках корисно оцінювати також середній час перебування пакета у системі:

$$\mathbb{E}[W] = \mathbb{E}[W_q] + \mathbb{E}[S], \quad (21)$$

а через інтенсивність надходжень отримуємо середню довжину черги

$$\mathbb{E}[L] = \lambda_{tot} \mathbb{E}[W]. \quad (22)$$

Разом (19)–(22) формують завершений інструментарій для кількісної оцінки QoS у системах, де присутня різномірність вхідного трафіку, bursty-ефекти та фрактальні властивості.

Експериментальне дослідження впливу різномірності трафіку на затримку. Для підтвердження аналітичних результатів, наведених у математичному розділі, було проведено комплексне експериментальне дослідження за допомогою симуляційного середовища OMNeT++. Головною метою експериментів стало визначення того, як змінюється середня за-

тримка в системі масового обслуговування типу $G/G/1$ під впливом різних характеристик вхідного трафіку – зокрема інтенсивності, коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів та параметра Херста, що визначає ступінь самоподібності потоку. Для цього було синтезовано три типи потоків: пуасонівський, bursty-потік On/Off-типу та самоподібний трафік, змодельований на основі MMPP-процесу. Усі потоки надходили до одного вузла обслуговування, який мав сталий час обслуговування та політику черги типу FIFO, що дозволяло досліджувати саме вплив структури вхідного потоку, а не особливостей дисципліни обслуговування.

Перший етап дослідження був спрямований на аналіз впливу коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів C_v^2 на середню затримку $\mathbb{E}[W_q]$ за незмінної середньої інтенсивності надходжень. Для цього було синтезовано серію потоків із однаковим значенням λ , але зі зростаючим рівнем варіативності – від пуасонівського випадку ($C_v^2 = 1$) до сильно bursty- та фрактально-корельованих потоків ($C_v^2 \approx 20$). Експериментально встановлено, що при збільшенні варіативності затримка зростає нелінійно, суттєво випереджаючи оцінки класичних моделей типу $M/M/1$. Ця тенденція повністю узгоджується з формулою (13), де саме коефіцієнт варіації є множником, який підсилює вплив навантаження на середню затримку. Отримані результати наведено на рис. 1.

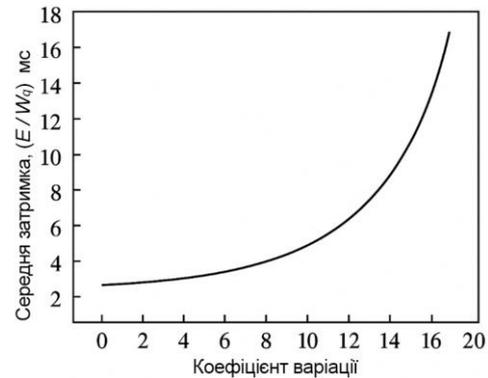


Рис. 1. Залежність середньої затримки від коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів

Другий етап експериментів був присвячений дослідженню впливу ступеня самоподібності трафіку, що описується параметром Херста H . Для серії сценаріїв генерувався трафік зі зростанням H від 0.5 (границя відсутності довготривалої залежності) до 0.95 (розвинена самоподібність). Результати показали, що навіть за однакової інтенсивності та збереженого середнього часу обслуговування середня затримка реагує на збільшення H різко й нелінійно: при $H > 0.75$ спостерігається суттєвий стрибок значень $\mathbb{E}[W_q]$. Така поведінка відповідає теоретичному наближенню (20), згідно з яким фрактальні процеси формують значно важчі хвости розподілу й призводять до появи “сплескових” навантажень, що спричинюють високі затримки. Графічне відображення цієї залежності подано на рис. 2.

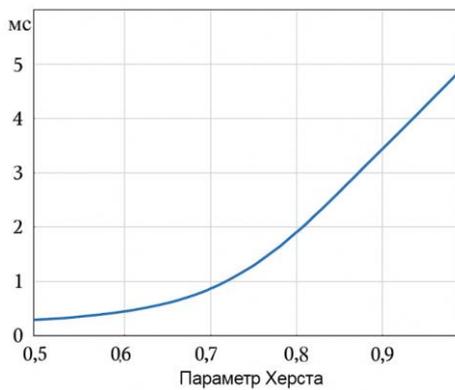


Рис. 2. Середня затримка залежно від параметра Херста

На третьому етапі проведено порівняння трьох типів трафіку – Poisson, Bursty та Self-similar – за умови однакової середньої інтенсивності надходжень. Це дозволило оцінити, наскільки природа трафіку впливає на поведінку системи при зміні навантаження ρ . Результати експерименту показали, що пуасонівський потік формує найнижчі значення середньої затримки в усьому діапазоні навантажень, а bursty-трафік призводить до приблизно дворазового збільшення затримки, особливо за $\rho > 0.6$.

Найбільш критичною є поведінка самоподібного трафіку: при значеннях ρ , близьких до 0,8, затримка зростає лавиноподібно, що узгоджується з ефектом довготривалої кореляції та важких хвостів. Усі три залежності наведено на рис. 3.

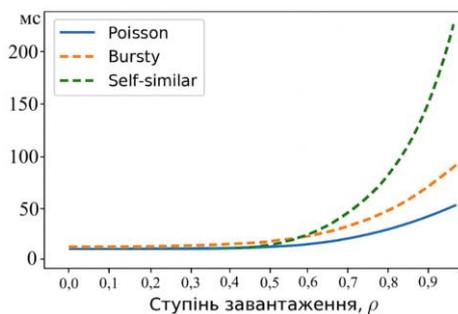


Рис. 3. Порівняння затримки для Poisson, Bursty та Self-similar трафіку при однаковій інтенсивності

Сукупні результати усіх трьох експериментальних серій підтверджують ключові теоретичні положення: затримка в телекомунікаційній системі визначається не лише середньою інтенсивністю потоку, а передусім статистичною структурою вхідного трафіку. Bursty-та самоподібні процеси формують значно вищі коефіцієнти варіації, що виявляється у зростанні затримок навіть при помірних навантаженнях. Отже, моделі, які ігнорують різномірність і кореляційність трафіку, систематично недооцінюють реальні затримки, особливо у системах із високим трафіковим навантаженням.

Висновки

У ході виконаного дослідження отримано комплексні аналітичні та експериментальні результати щодо впливу різномірності трафіку на затримку в телекомунікаційних системах. Проведений аналіз підтвердив, що середня затримка визначається не лише інтенсивністю потоку, але значною мірою залежить від статистичної структури міжприбуткових інтервалів і характеру варіативності надходжень. Показано, що пуасонівські потоки формують найменші значення затримки завдяки своїй регулярності, тоді як bursty-потоки з вираженими сплесками інтенсивності спричиняють суттєве збільшення середнього часу очікування навіть при помірних навантаженнях. Найбільш критичний вплив спостерігається у випадку самоподібного трафіку, для якого наявність довготривалої кореляції призводить до формування важких хвостів розподілу та різкого росту затримки в областях навантаження, близьких до граничних.

Експериментальні результати, отримані у середовищі OMNeT++, узгоджуються з аналітичними оцінками та підтверджують нелінійний характер зростання затримки при збільшенні коефіцієнта варіації міжприбуткових інтервалів і параметра Херста. Збільшення фрактальності вхідного потоку підсилює ефект накопичення черги, що демонструє суттєве відхилення від прогнозів класичних моделей $M/M/1$ і $M/G/1$, у яких не враховується корельована природа навантаження. Встановлено, що навіть за однакової середньої інтенсивності різні типи трафіку формують принципово різні режими затримки, а самоподібний потік може збільшувати її у кілька разів порівняно з пуасонівським випадком.

Отримані результати дозволяють дійти висновку, що адекватне оцінювання показників якості обслуговування у сучасних телекомунікаційних системах потребує врахування неоднорідності трафіку та його кореляційних властивостей. Запропонований підхід, який поєднує аналітичну модель із симуляційною перевіркою, забезпечує можливість точнішої оцінки затримок у вузлах мережі, де присутні Poisson-, bursty- та self-similar-потоки. Це створює основу для подальшої оптимізації алгоритмів керування навантаженням, удосконалення дисциплін обслуговування та підвищення точності прогнозування QoS у системах нового покоління.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jin W.-L. Introduction to Network Traffic Flow Theory: Principles, Concepts, Models, and Methods. Elsevier. 2021. P. 3-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815840-1.00011-4>
2. H. J. Fowler, W. E. Leland. Local area network characteristics, with implications for broadband network congestion management. *IEEE J. on Selected Areas in Com.* 1991. Vol. 9, no. 7. P. 1139-1149. DOI: <https://doi.org/10.1109/49.103559>

3. R. R. Marie, J. M. Blackledge, H. E. Bez. On the fractal characteristics of Internet network traffic and its utilization in covert communications. *2009 International Conference for Internet Technology and Secured Transactions, (ICITST)*, London, UK, 2009. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITST.2009.5402542>
4. C. -H. Wei, G. Bianchi, R. -G. Cheng. Modeling and Analysis of Random Access Channels With Bursty Arrivals in OFDMA Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2015. Vol. 14, no. 4. P. 1940-1953. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2377121>
5. Smiesko J., Kontsek M., Bachrata K. Markov-Modulated On–Off Processes in IP Traffic Modeling. *Mathematics*. 2023. Vol. 11(14):3089. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11143089>
6. El Fawal A.H., Mansour A., Nasser A. Markov-Modulated Poisson Process Modeling for Machine-to-Machine Heterogeneous Traffic. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(18):8561. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188561>
7. Joshua Landon, Süleyman Özekici, Refik Soyer. A Markov modulated Poisson model for software reliability. *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 229, no. 2. P. 404-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.014>
8. Компанієць В. О., Пустовойтов П.С. Модель масштабування мережі на основі стохастичних процесів за умов самоподібного трафіку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 36 (75), № 3. С.71-79. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>
9. Компанієць В. О., Пустовойтов П. С. Стохастичний метод аналізу джитера на основі згортки гіперекспоненційних розподілів при самоподібному трафіку. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 355, № 4. С. 213-220. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-32>
10. Пустовойтов П. С., Компанієць В. О. Метод формування самоподібного потоку із заданим параметром Херста для моделювання трафіку в мережі. *Технічна інженерія*. 2024. № 2(94). С. 185-190. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-185-190](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-185-190)
11. Компанієць В.О., Пустовойтов П.С. Метод математичного моделювання самоподібного трафіку у інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, НУ ПП, 2025. Т. 4 (78). С. 187-189. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.187>

Received (Надійшла) 18.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Шиман Максим Вячеславович – аспірант кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

Maksym Shyman – PhD Student, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Maksym.Shyman@infiz.khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-4978-460X>;

Савченко Микола Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна;

Mykola Savchenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Mykola.Savchenko@khpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-7366-3213>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7101640966>.

Method for analyzing the impact of traffic diversity on delays in telecommunication systems

Maksym Shyman, Mykola Savchenko

Abstract. Relevance. Modern telecommunication systems operate in conditions of high heterogeneity of network traffic, caused by the simultaneous presence of Poisson, bursty and self-similar flows, typical for multimedia services, IoT applications and real-time networks. Classical models of queuing theory, based on the assumptions of independence and exponential distribution of inter-return intervals, are unable to adequately describe the impact of burstiness and long-term correlation on delays, which leads to systematic underestimation of service quality indicators. This necessitates the development of generalized analysis methods that take into account the statistical structure of heterogeneous traffic. **Object of research:** processes of delay formation in telecommunication mass service systems in the presence of heterogeneous traffic flows. **Purpose of the article:** development and study of a generalized analytical and experimental method for assessing the impact of Poisson-, bursty- and self-similar-traffic on the average delay in telecommunication systems, taking into account the variability and self-similarity of incoming flows. **Research results.** The article proposes a mathematical approach to delay analysis based on a G/G/1 type model, in which traffic heterogeneity is taken into account through the effective coefficient of variation of inter-return intervals and the Hurst parameter. Analytical dependencies were obtained, demonstrating a nonlinear increase in the average delay with increasing burstiness and the degree of self-similarity of the flow. Simulation modeling was carried out in the OMNeT++ environment, the results of which confirmed the adequacy of analytical estimates and showed that self-similar traffic forms the most critical operating modes of the system with an avalanche-like increase in delay at high loads. **Conclusions.** It is shown that the average delay in telecommunication systems is determined not only by the intensity of arrivals, but also by the statistical structure of traffic. Bursty and self-similar flows significantly worsen QoS indicators even at a constant average intensity, which limits the applicability of classical Poisson models. The proposed method provides more accurate delay prediction and can be used for the analysis and design of highly loaded telecommunication networks. The scope of application of the obtained results: wireless and wired telecommunication networks, Internet of Things systems, next-generation multi-service networks, problems of QoS analysis and optimization of service disciplines.

Keywords: telecommunications system, heterogeneous traffic, queueing theory, self-similarity, Hurst parameter, delay, QoS.