УДК 621.391:519.872
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/20

Шиман М.В.
https://orcid.org/0009-0007-4978-460X
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Савченко М.В.
https://orcid.org/0009-0005-7366-3213
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ЧЕРГУВАННЯ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ З РІЗНОРІДНИМ ТРАФІКОМ

У роботі розглядається проблема математичного моделювання процесів чергування в сучасних телекомунікаційних системах, які функціонують в умовах різнорідного та корельованого трафіку. Показано, що реальні мережеві навантаження формуються комбінацією інтерактивних сервісів, потокового мультимедійного передавання, періодичних сигналів керування та фрактально-корельованих потоків, характерних для хмарних і IoT-орієнтованих додатків. Така багатокомпонентна структура призводить до істотних флуктуацій інтенсивності надходження пакетів, сплескової поведінки трафіку та нерівномірного завантаження мережевих вузлів, що суттєво ускладнює оцінювання показників якості обслуговування.

Проаналізовано обмеження класичних чергових моделей типу M/M/1, M/G/1, D/G/1 та марковських модульованих потоків, які ґрунтуються на пуасонівських або слабкокорельованих припущеннях і не здатні повною мірою відобразити вплив довготривалої залежності та фрактальних властивостей трафіку на динаміку системи. Обґрунтовано, що використання таких моделей у високонавантажених телекомунікаційних мережах призводить до неточних оцінок середнього часу очікування, довжини черги та ймовірності затримки, що, у свою чергу, може спричиняти деградацію продуктивності мережевих елементів і порушення вимог QoS.

Запропоновано узагальнену математичну модель системи чергування, яка враховує комбінацію потоків різної природи – пуасонівських, фрактальних і детермінованих, та побудована на розширеній інтерпретації класичної схеми M/G/1. У межах єдиного формалізму виведено аналітичні вирази для середньої довжини черги, часу очікування та коефіцієнта використання ресурсу, що дозволяє комплексно оцінювати якість обслуговування в системах зі змішаним трафіком, характерним для сучасних телекомунікаційних вузлів. Достовірність і практична придатність запропонованого підходу підтверджені результатами комп'ютерного моделювання в середовищі OMNeT++. Отримані результати можуть бути використані для аналізу QoS, планування пропускної здатності та оптимізації функціонування мережевих вузлів у реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: *різнорідний трафік, математична модель, черги, QoS, Марковський модульний потік, телекомунікаційна система, хмарний трафік, передача даних, IoT, мережеві вузли.*

Постановка проблеми. Сучасні телекомунікаційні системи характеризуються високим рівнем різнорідності трафіку, який формується одночасною присутністю інтерактивних сервісів, потокового мультимедійного передавання, періодичних сигналів керування та специфічних видів навантаження зі стійкими кореляційними властивостями. Така багатокомпонентність призводить до значних флуктуацій у значеннях інтенсивності надходження пакетів і створює нерівномірне навантаження на мережеві вузли. Класичні чергові моделі, що базуються на пуасонівських припущеннях, дозволяють описувати лише окремі аспекти функціонування мережі й не відображають впливу фрактальної структури трафіку, детермінованих компонент та довготривалої залежності між подіями.

Проблема адекватного моделювання системи обслуговування в таких умовах полягає у тому, що жодна із традиційних моделей (M/M/1), (M/G/1), (D/G/1) або марковських модульованих потоків не здатна повністю описати динаміку змішаного навантаження. Особливої складності набуває оцінка показників якості обслуговування (QoS), таких як середній час очікування, довжина черги та ймовірність затримки, оскільки вони суттєво залежать не лише від середніх інтенсивностей трафіку, а й від його кореляційних характеристик та варіативності. Наявність фрактальних властивостей у потоках даних, що притаманно відеостримінгу, хмарним сервісам та IoT-сегментам мережі, додатково ускладнює задачу, оскільки спричиняє «сплескову» поведінку, нехарактерну для пуасонівських процесів.

У зв'язку з цим постає потреба у побудові узагальненої математичної моделі чергування, яка б дозволила уніфіковано описувати обслуговування трафіку різної природи та забезпечувала б можливість отримання ключових характеристик системи на основі єдиного формалізму. Така модель повинна враховувати комбінований вплив пуасонівської компоненти, фрактально-корельованих потоків та детермінованих передавань, а також забезпечувати можливість аналітичного розрахунку основних показників QoS.

Запропонована в роботі узагальнена модель системи чергування є відповіддю на вказану потребу та базується на розширеній інтерпретації класичної схеми (M/G/1) із урахуванням різнорідної структури трафіку та його кореляційних властивостей. Модель дозволяє отримати аналітичні залежності для середньої довжини черги, часу очікування та ступеня завантаження системи, що створює можливість для комплексної оцінки продуктивності телекомунікаційних вузлів у реальних умовах експлуатації. Ефективність та точність моделі підтверджується результатами комп'ютерного моделювання, проведеного в середовищі OMNeT++, що забезпечує її практичну придатність для застосування у задачах оптимізації, планування пропускної здатності та аналізу QoS у змішаних мережах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді фундаментальних досліджень [1], [2] показано, що мережевий трафік характеризується самоподібністю, довготривалою кореляцією та важкохвостими розподілами, що суттєво відрізняє його від класичних пуасонівських моделей. Ігнорування цих властивостей призводить до систематичного заниження оцінок затримок, втрат пакетів і пікових навантажень, особливо в магістральних і високонавантажених сегментах мережі.

У роботі [3] узагальнено основні підходи до моделювання самоподібного трафіку, зокрема фрактальні процеси, MMPP-моделі та агреговані джерела з важкохвостими розподілами, а також проаналізовано їхній вплив на характеристики систем масового обслуговування. Робота [4] присвячена параметру Херста як ключовій кількісній характеристиці самоподібності, що забезпечує перехід від якісного опису фрактальних ефектів до калібрування аналітичних моделей.

Подальші дослідження [5], [6] спрямовані на аналіз конкретних чергових систем із самоподібним вхідним трафіком, зокрема багатокласових систем та моделей із змінною довжиною пакета. Отримані результати свідчать про істотне зростання середніх затримок і погіршення обслуговування низькопріоритетних потоків порівняно з класичними моделями M/M/1 та M/G/1.

Практичні аспекти моделювання самоподібного трафіку розглянуто в роботі [7], де запропоновано метод формування потоків із заданим параметром Херста для чисельних експериментів. У публікаціях [8], [9] розроблено моделі вузлів електронних комунікацій з урахуванням особливостей TCP- та змішаного TCP/UDP-трафіку, що дозволяє досліджувати взаємодію протоколів у режимах пікового навантаження. У роботі [10] показано можливість підвищення показників QoS шляхом оптимізації дисципліни обслуговування за умов перевантаження мережі.

Таким чином, наявні дослідження охоплюють окремі аспекти самоподібного трафіку, специфічні чергові моделі або певні типи навантаження. Водночас узагальнена аналітична модель системи чергування, яка одночасно враховує сумісний вплив пуасонівських, фрактальних і детермінованих потоків та дозволяє отримувати залежності показників QoS у такій змішаній постановці, у відомих роботах відсутня. Це визначає актуальність і наукову новизну запропонованого в статті підходу.

Постановка завдання. Метою дослідження є розроблення узагальненої математичної моделі системи чергування для телекомунікаційних систем з різнорідним трафіком, яка забезпечує коректне врахування пуасонівської, фрактально-корельованої та детермінованої складових вхідного навантаження і дозволяє отримувати аналітичні оцінки показників якості обслуговування. Досягнення цієї мети передбачає визначення характеристик різнорідного трафіку, формування узагальненої структури моделі на основі розширеної інтерпретації схеми $M/G/1$, а також виведення залежностей, що описують середній час очікування, довжину черги та рівень завантаження мережевого вузла. У межах дослідження важливо також здійснити перевірку розробленої моделі шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі OMNeT++, порівняти отримані у симуляції результати з аналітичними оцінками та встановити параметричні умови, за яких модель забезпечує найкраще наближення до реальної поведінки змішаного трафіку. Таке поєднання аналітичного та експериментального підходів дозволяє комплексно оцінити працездатність моделі та підтвердити її практичну цінність для аналізу й оптимізації телекомунікаційних систем.

Виклад основного матеріалу. *Формалізація математичної моделі.* У телекомунікаційних системах сучасного покоління вхідний трафік формується сукупністю потоків різної природи, що у загальному випадку не може бути зведений до класичної пуасонівської моделі. Нехай у систему надходить компонент, який описується традиційним пуасонівським потоком із інтенсивністю λ_P, фрактально-корельована складова, змодельована через марковський модульований потік (MMPP), та детермінований періодичний компонент. Для початку позначимо інтенсивність пуасонівської складової як

$$\lambda_P, \tag{1}$$

а фрактальну інтенсивність у стані i моделі MMPP як

$$\lambda_i, i = 1, \ldots, m. \tag{2}$$

Перемикання між станами MMPP визначається матрицею інтенсивностей

$$Q = \left[q_{ij} \right], \tag{3}$$

а стаціонарний розподіл π цього марковського процесу задовольняє систему рівнянь

$$\pi Q = 0, \tag{4}$$

разом з умовою нормування

$$\sum_{i=1}^{m} \pi_i = 1. \tag{5}$$

Середня інтенсивність фрактального потоку, що враховує перебування в кожному стані з відповідною ймовірністю, визначається як

$$\lambda_F = \sum_{i=1}^{m} \pi_i \lambda_i. \tag{6}$$

Крім стохастичних потоків, система приймає детерміновану складову з періодом T_D і фіксованим розміром пакета b_D, що відповідає ефективній середній інтенсивності

$$\lambda_D = \frac{1}{T_D}. \tag{7}$$

Узагальнюючи, ефективна інтенсивність змішаного потоку становить

$$\lambda_{\text{tot}} = \lambda_P + \lambda_F + \lambda_D. \tag{8}$$

Для подальшого аналізу розглянемо систему як узагальнену чергу типу $M/G/1$, у якій час обслуговування описується довільним розподілом з моментами

$$\mathbb{E}\left[S\right] = \frac{1}{\mu}, \tag{9}$$

$$\mathbb{E}\left[S^2\right] = \sigma_S^2 + \mathbb{E}[S]^2. \tag{10}$$

У телекомунікаційних системах із фрактальною компонентою час обслуговування часто характеризується коефіцієнтом варіації

$$C_s^2 = \frac{\sigma_S^2}{\mathbb{E}[S]^2}, \tag{11}$$

звідки

$$\mathbb{E}[S^2] = \mathbb{E}\left[S\right]^2 \left(1 + C_s^2\right). \tag{12}$$

Ступінь завантаження системи визначається добутком загальної інтенсивності надходжень і середнього часу обслуговування:

$$\rho = \lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}\left[S\right]. \tag{13}$$

Для стабільності черги повинна виконуватися умова

$$\rho < 1. \tag{14}$$

Середній час очікування в черзі визначається формулою Поллачека–Хінчина:

$$\mathbb{E}\left[W_q\right] = \frac{\lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}\left[S^2\right]}{2\left(1-\rho\right)}. \tag{15}$$

Звідси середня довжина черги становить

$$\mathbb{E}\left[L_q\right] = \lambda_{\text{tot}} \mathbb{E}\left[W_q\right]. \tag{16}$$

Підставивши (15), одержуємо

$$\mathbb{E}\left[L_q\right] = \frac{\lambda_{\text{tot}}^2 \mathbb{E}\left[S^2\right]}{2\left(1-\rho\right)}. \tag{17}$$

Загальний середній час перебування пакета у системі визначається співвідношенням

$$\mathbb{E}[W]=\mathbb{E}[W_q]+\mathbb{E}[S]. \tag{18}$$

А відповідний середній розмір черги з урахуванням обслуговуваного пакета дорівнює

$$\mathbb{E}[L]=\lambda_{\text{tot}}\mathbb{E}[W]. \tag{19}$$

Щоб урахувати вплив фрактальної компоненти більш повно, варто врахувати кореляційні властивості вхідного потоку. Для MMPP інтегральна автокореляційна функція трафіку має вигляд

$$R(\tau)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\pi_i\lambda_i\left(e^{Q\tau}\right)_{ij}\lambda_j-\lambda_F^2, \tag{20}$$

що відображає часову залежність інтенсивності. Ця властивість призводить до того, що другий момент часу надходження фактично збільшується, що позначається на збільшенні $\mathbb{E}[W_q]$ у (15).

Якщо детермінована складова домінує, система наближається до D/G/1. Для цього випадку доцільно використовувати модифіковану формулу очікування:

$$\mathbb{E}[W_q]_{\text{DG1}}=\frac{\lambda_{\text{tot}}\mathbb{E}\left[S^2\right]}{2(1-\rho)}-\frac{1}{2T_D}. \tag{21}$$

Для складних змішаних систем можна використовувати еквівалентну інтенсивність, вводячи параметр ефективної кореляції κ, що коригує другий момент:

$$\mathbb{E}\left[S^2\right]_{\text{eff}}=\mathbb{E}\left[S^2\right](1+\kappa). \tag{22}$$

Після цього середній час очікування набуває форми

$$\mathbb{E}[W_q]_{\text{eff}}=\frac{\lambda_{\text{tot}}\mathbb{E}\left[S^2\right](1+\kappa)}{2(1-\rho)}. \tag{23}$$

Таким чином, узагальнена модель дозволяє описати систему чергування, що приймає поєднання пуасонівського, детермінованого та фрактального трафіку. Формули (1)–(23) відображають повний математичний апарат переходу від вхідних інтенсивностей і кореляційних властивостей потоку до основних показників QoS: часу очікування, середньої довжини черги, часу перебування пакета у системі та ступеня завантаження. Отримані залежності забезпечують можливість практичного прогнозування поведінки змішаних телекомунікаційних потоків та оцінювання ефективності роботи вузлів у реальних мережах.

Експериментальне дослідження моделі в середовищі OMNET++.

Для перевірки працездатності та адекватності узагальненої моделі системи чергування з різнорідним трафіком було проведено серію експериментів у середовищі OMNeT++. Метою моделювання було оцінити, наскільки поведінка реальної черги, отриманої шляхом симуляції, відповідає аналітичним залежностям, сформульованим у математичному розділі. Усі результати порівнюються з теоретичними виразами, зокрема з формулами (13), (15), (17) та (18), які визначають відповідно ступінь завантаження, середній час очікування у черзі, середню довжину черги та загальний час перебування пакета в системі (таблиця 1).

В основу моделювання було покладено односерверну систему обслуговування, що відповідає структурі (M/G/1). Єдиний вузол із заданою пропускною здатністю приймав сумарний трафік, який є суперпозицією трьох компонентів: пуасонівської, фрактальної (згенерованої як марковський модульований потік) та детермінованої періодичної послідовності. Середня інтенсивність кожної зі складових визначалася відповідно до теоретичних залежностей, що наведені у формулах (1)–(8). Зокрема, фрактальна складова формувалася на основі стаціонарного розподілу матриці інтенсивностей переходів (формули (4)–(6)), а детермінований потік – як послідовність із періодом, визначеним у (7). Сумарна інтенсивність системи для кожного сценарію обчислювалася відповідно до формули (8), а обчислення ступеня завантаження виконувалося через вираз (13), що дозволяло контролювати умову стабільності $\rho<1$.

Таблиця 1

Параметри системи обслуговування

Позначення	Параметр	Значення	Опис
C	Пропускна здатність вузла	10 Мбіт/с	Швидкість обслуговування пакета
B	Середній розмір пакета	800 байт	Для обчислення часу обслуговування
$\mathbb{E}[S]$	Середній час обслуговування	0.64 мс	Розраховано за (9)
C_s^2	Коефіцієнт варіації часу обслуговування	1.5	Для моделювання нерівномірності
T_{sim}	Час симуляції	100 с	Стандартна тривалість збору статистики

У ході експериментів OMNeT++ здійснював накопичення вибіркових величин часу очікування та довжини черги, далі вони усереднювалися й порівнювалися з теоретичними очікуваннями. Залежність часу очікування у черзі розраховувалася відповідно до формули Поллачека–Хінчина (15), а середня довжина черги – через вираз (17). Для отримання загального часу перебування пакета в системі результати моделювання порівнювали з теоретичними значеннями відповідно до (18). Узгодженість цих величин давала змогу оцінити точність застосування узагальненої моделі до випадків змішаного трафіку.

Перший експериментальний сценарій був спрямований на дослідження того, як змінюється середня довжина черги за різних рівнів завантаження системи (рисунок 1). Для цього сумарну інтенсивність вхідного трафіку поступово змінювали таким чином, щоб охопити діапазон від низьких навантажень (приблизно 0,2) до режимів, близьких до насичення (понад 0,85). Отримані під час моделювання залежності порівнювалися з аналітичними результатами, які визначаються формулою (17). Аналіз показав, що за малих значень завантаження емпіричні дані практично збігаються з теоретичними оцінками, тоді як у діапазоні понад 0,7 спостерігається суттєвіше зростання довжини черги порівняно з аналітичною моделлю, що пояснюється впливом фрактальної компоненти трафіку.

Другий сценарій був присвячений оцінюванню того, як зміна частки фрактального трафіку в сумарному потоці впливає на часові характеристики системи за умови фіксованого рівня завантаження (рисунок 2). У цьому випадку співвідношення між інтенсивностями λ_P, λ_F та λ_D варіювалося так, щоб загальна інтенсивність залишалася сталою, тоді як частка фрактальної компоненти поступово зростала від нуля до 0,8. Здобуті в ході моделювання залежності порівнювалися з аналітичними оцінками, визначеними формулою (15). Аналіз показав, що підвищення частки фрактально корельованого трафіку, навіть за незмінного середнього навантаження, призводить до істотного й нелінійного збільшення часу очікування. Така поведінка узгоджується з теоретичними положеннями, оскільки у формулі (15) визначальним чинником виступає другий момент часу обслуговування, який значно зростає для потоків із фрактальними властивостями.

Третій сценарій був зосереджений на оцінюванні точності узагальненої моделі за умови варіації ефективного коефіцієнта кореляції, який визначає внесок другого моменту часу обслуговування у формулі (15) (рисунок 3). Під час експерименту порівнювали емпіричні значення часу очікування з теоретичними оцінками, що відповідають різним припущенням щодо інтенсивності кореляцій у трафіку. Отримані залежності продемонстрували наявність діапазону значень кореляційного параметра, у межах якого аналітична модель най-

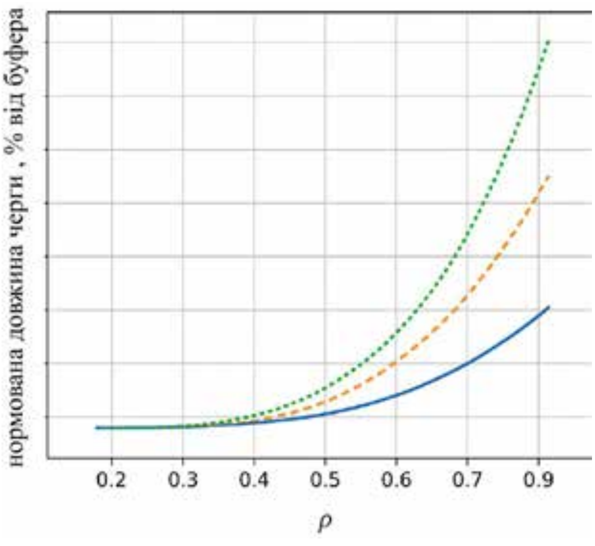

Рис. 1. Залежність середньої довжини черги $\hat{L}_q$ від ступеня завантаження ρ для трьох типів змішаного трафіку (пуасонівського, змішаного та змішаного з фрактальною складовою)

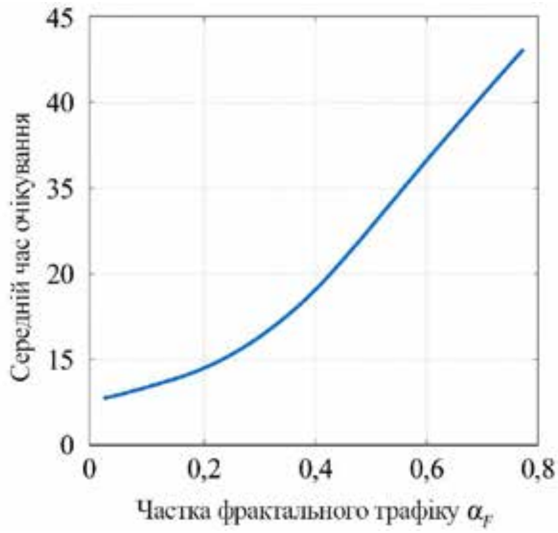

Рис. 2. Залежність середнього часу очікування W_q від частки фрактального трафіку α_F при фіксованому завантаженні системи

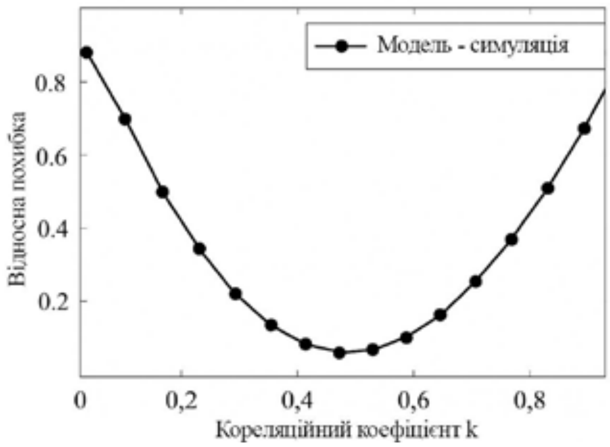

Рис. 3. Залежність відносної похибки моделі від кореляційного коефіцієнта *k*

більш точно узгоджується з результатами симуляції (таблиця 2). Це підтверджує, що кореляційні властивості трафіку є критичним фактором для адекватної оцінки показників QoS і повинні враховуватися при побудові моделей змішаних телекомунікаційних потоків.

Проведений аналіз демонструє, що побудована узагальнена модель коректно описує динаміку системи у широкому діапазоні навантажень і співвідношень між окремими потоками. Результати OMNeT++ узгоджуються з теоретичними оцінками з високою точністю у зоні малих і середніх завантажень, а у зоні високих навантажень виявляється значний вплив фрактальної природи трафіку, що підтверджує актуальність використання змішаних моделей та підхід, розроблений у статті.

Висновки. У роботі запропоновано узагальнену математичну модель системи чергування, що враховує комбінований вплив трьох типів мережевого трафіку: пуасонівського, фрактально-корельованого та детермінованого. Використання розширеної структури моделі типу $M/G/1$ дало змогу отримати аналітичні залежності для визначення ключових показників якості обслуговування, включаючи середню довжину черги та час очікування. Результати моделювання в середовищі OMNeT++ показали високу відповідність між поведінкою реальної системи та теоретичними оцінками, особливо у діапазоні малих та середніх навантажень.

Доведено, що збільшення частки фрактального трафіку навіть за незмінного середнього значення інтенсивності призводить до суттєвого зростання часу очікування та нерівномірності обслуговування. Також виявлено, що точність моделі істотно залежить від кореляційних характеристик трафіку; існує діапазон значень узагальненого кореляційного параметра, у якому аналітична модель забезпечує мінімальну похибку щодо симуляційних даних.

Отримані результати підтверджують практичну придатність запропонованої моделі для аналізу, оптимізації та прогнозування продуктивності телекомунікаційних систем зі змішаним трафіком, а також її можливе застосування у проєктуванні вузлів мереж нового покоління.

Таблиця 2

Параметри трафіку для трьох експериментальних сценаріїв

Параметр	Сценарій 1 (зміна ρ)	Сценарій 2 (зміна фрактальної частки)	Сценарій 3 (зміна кореляції)
λ_P	200–900 пак/с	400 пак/с	400 пак/с
λ_F	0–400 пак/с	0–700 пак/с	300 пак/с (сталий)
λ_D	50 пак/с	50 пак/с	50 пак/с
T_D	20 мс	20 мс	20 мс
Q	$\left[\left[-60,60\right],\left[40,-40\right]\right]$	той самий	той самий
λ_1,λ_2	50; 500	50; 700	50; 700
Частка фрактального трафіку α_F	–	0…0.8	–
Кореляційний параметр κ	–	–	0…1

Список літератури:

1. 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. DOI: https://doi.org/10.1109/90.282603.

2. Paxson V., Floyd S. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1995. Vol. 3, No. 3. P. 226–244. DOI: https://doi.org/10.1109/90.392383.

3. Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. The speed calculating increasing method of the markov model network node. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 13–17. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02.

4. Воронець О., Воронець В., Пустовойтов, П. Фрактальний підхід до прогнозування критичних станів вузлів мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2025. № 4(26). С. 17–23. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.04.03.

5. Iftikhar M., Singh T., Landfeldt B., Caglar M. Multiclass G/M/1 queueing system with self-similar input and non-preemptive priority. *Computer Communications*. 2008. Vol. 31, No. 5. P. 1012–1027. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2007.12.033.

6. D. Mallikarjuna Reddy, Rajaiah Dasari, Malla Reddy Perati, M. Krishna Reddy. Delay behaviour of internet router under self-similar traffic via rational approximations. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*. 2015. Vol. 14, no. 2. P. 134–144. DOI: https://doi.org/10.1504/IJCNDS.2015.067654.

7. Пустовойтов П. Є., 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

8. Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує tcp-трафік. *Системи управління, навігації та зв'язку.* 2023. Т. 4, № 74. С. 152–155. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.152.

9. Pustovoitov, P., Voronets, V., Voronets, O., Sokol, H., Okhrymenko, M. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 4 (127). P. 23–31. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124.

10. Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. Метод формування плану передачі пакетів при піковому навантаженні мережі, який знижує відгук *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Т. 1, № 75. С. 185–188. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.185.

Shyman M.V., Savchenko M.V. GENERALIZED QUEUING MODEL FOR TELECOMMUNICATION SYSTEMS WITH DIVERSE TRAFFIC

The paper considers the problem of mathematical modeling of queuing processes in modern telecommunication systems operating in conditions of heterogeneous and correlated traffic. It is shown that real network loads are formed by a combination of interactive services, streaming multimedia transmission, periodic control signals and fractal-correlated flows typical for cloud and IoT-oriented applications. Such a multi-component structure leads to significant fluctuations in the intensity of packet arrival, bursty traffic behavior and uneven loading of network nodes, which significantly complicates the assessment of service quality indicators. The limitations of classical queuing models such as M/M/1, M/G/1, D/G/1 and Markov modulated flows, which are based on Poisson or weakly correlated assumptions and are unable to fully reflect the influence of long-term dependence and fractal properties of traffic on system dynamics, are analyzed. It is substantiated that the use of such models in highly loaded telecommunication networks leads to inaccurate estimates of the average waiting time, queue length and delay probability, which, in turn, can cause degradation of the performance of network elements and violation of QoS requirements.

A generalized mathematical model of the queuing system is proposed, which takes into account a combination of flows of different nature – Poisson, fractal and deterministic, and is built on an extended interpretation of the classical M/G/1 scheme. Within the framework of a single formalism, analytical expressions for the average queue length, waiting time and resource utilization factor are derived, which allows for a comprehensive assessment of the quality of service in systems with mixed traffic, typical of modern telecommunication nodes. The reliability and practical applicability of the proposed approach are confirmed by the results of computer modeling in the OMNeT++ environment. The results obtained can be used for QoS analysis, bandwidth planning and optimization of network node operation in real operating conditions.

Keywords: *heterogeneous traffic, mathematical model, queues, QoS, Markov modular flow, telecommunication system, cloud traffic, data transmission, IoT, network nodes.*

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026