

УДК 621.317.73

DOI: 10.31891/2219-9365-2019-63-1-62-67

МАКАРИШКІН Д. А.<sup>1</sup>,  
КОВТУН Л. О.<sup>1</sup>,  
ТКАЧУК В. М.<sup>2</sup>,  
КІНАШ М. О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Хмельницький національний університет

<sup>2</sup>Вінницький технічний коледж

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАФІКУ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ТА ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ

*В статті описаний аналіз особливостей статистичних властивостей трафіку сучасних інформаційних мереж. Розглядаються існуючі математичні моделі при описі трафіку інформаційних мереж. Показані їх переваги та недоліки. Проводиться огляд методів аналізу та універсальних моделей для опису трафіку сучасних інформаційних мереж. Встановлено, що одним з перспективних напрямків є використання статистичних моделей на основі нормованих рангових функцій.*

*Ключові слова:* інформаційна мережа, трафік, інформаційний потік, моделювання, модель.

MAKARYSHKIN D.<sup>1</sup>,  
KOVTON L.<sup>1</sup>,  
TKACHUK V.<sup>2</sup>,  
KYNASH M.<sup>1</sup>

Khmelnitskyi National University

Vinnitsiya Technical College

## ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF STATISTICAL PROPERTIES OF THE TRAFFIC OF MODERN INFORMATION NETWORKS AND APPROACHES TO MODELING OF INFORMATION FLOWS

*In today's world, information networks are becoming an increasingly relevant and indispensable means of sharing information in most areas of human activity. The rapid development of information technology and information processing facilities, as well as the virtually instantaneous transfer of information between users, are leading to a steady increase in the amount of information traffic worldwide. According to a study by one of the largest companies that manufactures and develops equipment for modern Cisco information networks [1], in 2016, the global total Internet traffic amounted to 1.2 ZB and is expected to reach 3.3 ZB in 2021. However, the development of information technologies and services, along with difficultly predicted user behavior, complicate the structural and dynamic characteristics of information network traffic, which necessitates the development of new methods of research and modeling of information network traffic characteristics, including the involvement of mathematical apparatus from related fields, including statistical physics, computational mathematics, elements of graph theory, and several others. The article describes the analysis of the peculiarities of the statistical properties of the traffic of modern information networks. Existing mathematical models are described in the description of traffic of information networks. Their advantages and disadvantages are shown. An overview of analytical methods and universal models for describing the traffic of modern information networks is conducted. It is established that one of the promising directions is the use of statistical models based on normalized rank functions.*

*Keywords:* information network, traffic, information flow, modeling, model.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі інформаційні мережі стають все більш актуальним і незамінним засобом обміну інформацією у більшості областей людської діяльності. Бурхливий розвиток інформаційних технологій і засобів обробки інформації, а також практично миттєва передача інформації між користувачами призводять до постійного збільшення обсягу інформаційного трафіку по всьому світу. За результатами дослідження однієї з найбільших компаній, яка виробляє і розробляє обладнання для сучасних інформаційних мереж Cisco [1], у 2016 році глобальний сумарний трафік Інтернету становив 1,2 ZB і очікується, що в 2021 році цей показник досягне значення 3,3 ZB. Однак, розвиток інформаційних технологій і послуг, поряд зі складно передбачуваною поведінкою користувачів, призводять до ускладнення структурних і динамічних характеристик трафіку інформаційних мереж, що обумовлює актуальність розробки нових методів дослідження і моделювання характеристик трафіку інформаційних мереж, в тому числі із залученням математичного апарату з суміжних областей, включаючи статистичну фізику, обчислювальну математику, елементи теорії графів і ряд інших.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Однією з широко досліджуваних в області інформаційних мереж є властивість самоподібності або фрактальної структури трафіку. Поняття

самоподібності, вперше було введено Мандельбротом [2], яке описує явище, при якому об'єкт зберігає деяку властивість при масштабуванні простору або часу. Об'єкт є фрактальним, або самоподібним, якщо його частини при збільшенні подібні образу цілого [3]. Існує два підходи до моделювання самоподібних процесів – на основі детермінованого, або точної самоподібності, і його стохастичного наближення. На відміну від детермінованого самоподібного процесу, збільшеної частини стохастичного самоподібного процесу необов'язково володіти чіткою схожістю вихідного фрагмента, достатнім є виконання відповідних масштабних співвідношень в середньому. Таким чином, підтвердження властивості стохастичної самоподібності ґрунтується на відповідних статистичних оцінках.

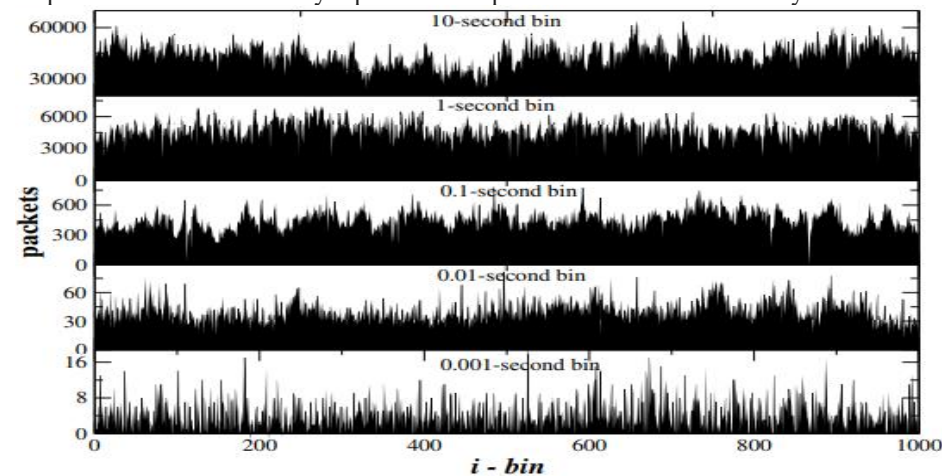
**Метою статті** є проведення аналізу особливостей статистичних властивостей трафіку сучасних інформаційних мереж та підходів до математичного моделювання інформаційних потоків.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Властивість самоподібності трафіку інформаційних мереж нерозривно пов'язане з його пульсуючим характером на широких часових масштабах, а також з його структурною самоподібністю. Зазначені властивості є теоретично несумісні з традиційними математичними моделями, які формуються на основі пуасонівського потоку. У традиційних моделях передбачається, що трафік інформаційних мереж виявляє пульсуючий характер тільки на коротких масштабах, але згладжується на великих масштабах часу. Це призводить до недооцінки потреби у пропускній здатності мережі традиційними моделями.

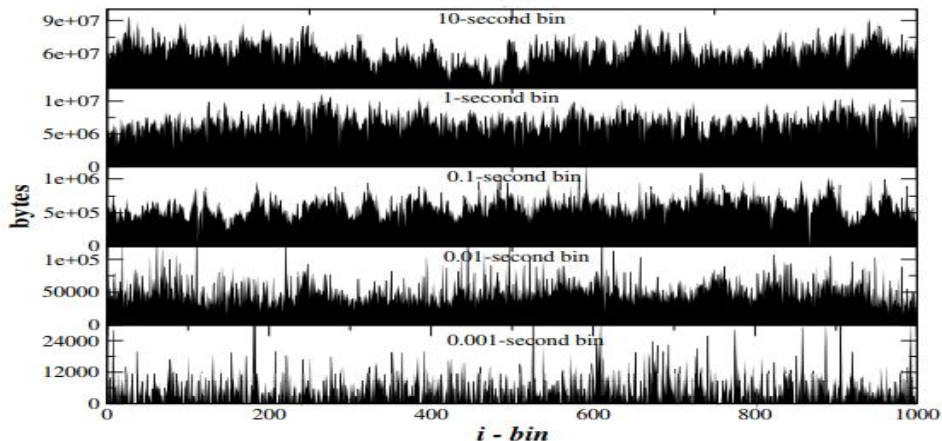
На рис. 1 представлений приклад реалізації вимірної інтенсивності трафіку інформаційних мереж на різних часових масштабах від 1 мілісекунди до 10 секунд.

Представлені дані були отримані на основі емпіричних записів трафіку каналу. Аналіз рисунка 1 показує, що трафік візуально володіє пульсуючим характером, як на коротких, так і на великих масштабах часу. Відомий цілий ряд факторів, які призводять до самоподібності в інформаційному трафіку [3]:

- нерівномірність кількості звернень від користувачів до ресурсів інформаційних мереж;
- процес генерування даних та їх структура;
- процес агрегування та об'єднання трафіку від неоднорідних джерел;
- вплив засобів управління мережею, маршрутизацією, буферизацією і т.д.;
- механізми керування, які засновані на принципах зворотного зв'язку;
- на тривалих масштабах часу – розвиток мережевих технологій і послуг.



a)



b)

Рис. 1. Вимірня реалізація трафіку інформаційних мереж: а) по інтенсивності пакетів, б) по байтній інтенсивності в різні одиниці часу

Зростання мультимедійного трафіку і поширення інформації через соціальні мережі тільки ускладнюють неоднорідну структуру трафіку інформаційних мереж.

На рис. 2 показана виміряна реалізація трафіку інформаційних мереж протягом чотирьох діб по пакетній і байтній інтенсивності в 100-секундних тимчасових вікнах. Очевидно, що трафік буде зберігати пульсуючий характер навіть при великому масштабі. Крім цього, реалізація трафіку протягом декількох днів проявляє добовий тренд, який показує високу активність користувачів пізно ввечері і вночі. Це означає, що трафік в даному випадку (у великому форматі часу) є неоднорідним і нестационарним, що повинно враховуватися при описі й моделюванні трафіку.

Дослідження Leland, Taqqu, Willson, Willinger, Paxson, Floyd [4, 5] та інших вчених на початку 90-х років заклали основу для розуміння явища самоподібності трафіку інформаційних мереж. За останні два десятиліття ряд зарубіжних і вітчизняних досліджень внесли істотний внесок у опис трафіку інформаційних мереж на основі самоподібних (фрактальних) моделей [4–8]. Інваріантна до тимчасового масштабу пульсуюча структура трафіку інформаційних мереж значно впливає на ефективність використання і необхідну пропускну здатність мережі, тому створення адекватних феноменологічних моделей, які враховують дані властивості трафіку, є важливим науковим завданням.

У даний час тривають дослідження в галузі математичного, напівнатурного та натурального моделювання трафіку інформаційних мереж, що в свою чергу дозволяє пояснити фізичні причини явища самоподібності у трафіку та оцінити її вплив як на продуктивність мережі, так і на процес побудови черг вузлів інформаційних мереж. Зокрема, розподіл черг інформаційної системи при самоподібності трафіку загасає повільно. Буферизація самоподібного трафіку виявляється неефективною, оскільки виникають несумірні затримки в черзі.

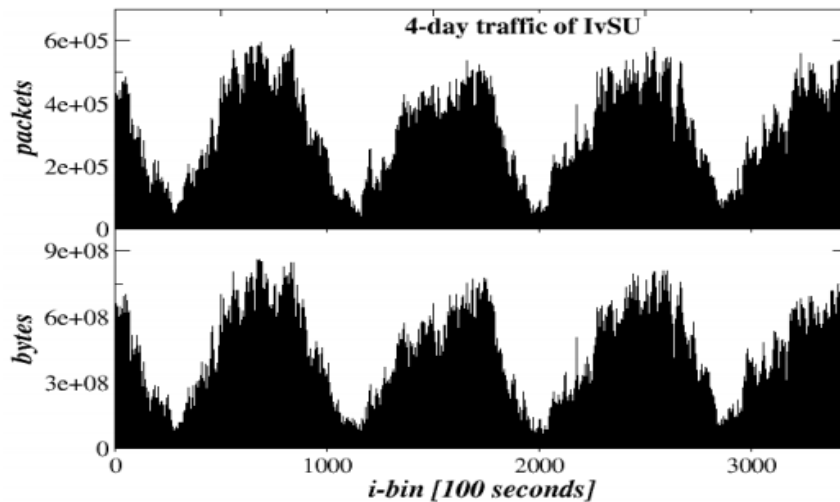


Рис. 2. Виміряна реалізація трафіку інформаційної мережі чотириденний проміжок часу по інтенсивності у пакетах та байтах, яка є агрегованою у 100-секундних часових вікнах

Важливим параметром самоподібних процесів є показник Херста (Hurst), який позначають  $H$ . Цей показник застосовується для оцінки ступеня самоподібності випадкового процесу. По визначенню випадковий процес  $X(t)$  є само подібним, якщо показник  $H > 0$  і для всіх значень  $b > 0$ , процес  $X(bt)$  можна записати у наступному вигляді [9]

$$X(bt) = b^H X(t) \quad (1)$$

У літературі було запропоновано ряд методів оцінки показника  $H$ , такі як аналіз нормованого розмаху (Rescaled adjusted range, R/S), графік зміни дисперсії (Variance-Time Plot), індекс дисперсії для відліків (Index of Dispersion for Counts), оцінка показника  $H$  на базі Вейвлет (Hurst exponent estimation with Wavelets), періодограмний аналіз (Periodogram Analysis), флуктуаційний аналіз (Fluctuation analysis) та інші.

На практиці зазначені методи мають ряд істотних обмежень, особливо при спостереженні флуктуацій трафіку на фоні шумів, трендів і періодичних складових і у теперешній час практично не використовуються для практичної оцінки показника  $H$ . Серед сучасних методів аналізу самоподібності і оцінки показника  $H$  випадкового процесу слід виділити метод флуктуаційного аналізу з виключенням тренду (Detrended Fluctuation Analysis, DFA) [10; 11], який є одним з найбільш популярних при аналізі емпіричних даних. Нехай є ряд даних  $(x_i)$ ,  $i=1, \dots, N$ . Наприклад, для добового запису трафіку інформаційної мережі значення  $x_i$  можуть бути послідовністю числа отриманих пакетів або байт в кожному короткотривалому фрагменті  $T$  (секунда, хвилина і т. д.), у випадку  $T=1c$ , довжина послідовності  $N=24 \times 60 \times 60 = 86400$ .

Алгоритм аналізу ряду даних з використанням DFA складається з наступних чотирьох кроків:

1. На першому етапі визначається кумулятивний ряд

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i x_k - \langle x \rangle, \quad (2)$$

де  $\langle x \rangle$  є середнім значенням:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N \sum_{i=1}^n x_i}. \quad (3)$$

2. На другому етапі проводиться розбиття ряду на  $Y(i)$  на  $N_s = [N/s]$  непересічних сегментів тривалістю  $s$ . Оскільки може виявитися, що довжина ряду  $N$  не буде кратною довжині вікна  $s$ , то у такому випадку залишається коротка частина в кінці ряду  $Y(i)$ . Для того, щоб не ігнорувати цю частину запису, ту саму процедуру повторюють, починаючи з іншого кінця ряду. Таким чином будуть отримані  $2N_s$  сегментів.

3. На третьому кроці локальний тренд для кожного сегменту обчислюється методом найменших квадратів. Потім визначаємо ряд

$$Y_s(i) = Y(i) - p_v(i), \quad (4)$$

де  $p_v(i)$  є поліноміальною апроксимацією  $v$ -ого сегмента.

4. На четвертому кроці обчислюється дисперсія для кожного з  $2N_s$  сегментів

$$F_s^2(v) = \langle Y_s^2(i) \rangle = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S Y_s^2[(v-1)s + i] \quad (5)$$

Останнім етапом є отримання флуктуаційної функції DFA шляхом усереднення по всіх сегментах і обчислення квадратного кореня:

$$F(s) = \left[ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F_s^2(v) \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Відомо, що для самоподібних рядів даних  $F(s)$  зростає зі збільшенням тривалості сегмента  $s$  за степеневим законом

$$F(s) \sim S^H \quad (7)$$

Таким чином, флуктуаційні функції  $F(s)$  зручно графічно представляти у подвійному логарифмічному масштабі як функції  $s$ , тоді для визначення  $H$  можна скористатися методом лінійної регресії.

Значення  $H=0.5$  відповідає некорельованому ряду (або відсутності самоподібності в досліджуваному процесі), а  $H>0.5$  вказує на тривало-залежний процес. Значення  $H$ , які є близькими до 1, показують високий ступінь самоподібності процесу, при цьому  $H = 1$  є кордоном стаціонарності.

Результати багатьох досліджень показують високі значення  $H$  в реальному інформаційному трафіку різних типів і технологій. Таким чином, при моделюванні сучасного трафіку інформаційних мереж необхідно враховувати явище самоподібності.

Бурхливий розвиток інформаційних технологій та послуг, а також спільна координувана поведінка користувачів викликає зростаючі труднощі при моделюванні трафіку інформаційних мереж і призводить до невірної оцінки продуктивності мережі, необхідної для забезпечення заданих показників якості, при використанні моделей з класичної теорії масового обслуговування. Такі моделі трафіку, з огляду на їх невідповідності реальної ситуації, зумовлюють недооцінку необхідної продуктивності мережі або недооцінку часу очікування обслуговування користувачами. Одним з невід'ємних умов вдосконалення моделей трафіку інформаційних мереж є адекватно статистичний опис характеристик випадкових процесів, що описують поведінку емпіричного трафіку інформаційних мереж в типових умовах за даними його тривалого моніторингу. З розвитком інформаційних технологій, нових мультимедійних додатків в структурі трафіку проявляються нові статистичні залежності, що ускладнюють створення його універсальних структурних моделей. Це в свою чергу обумовлює актуальність розвитку також феноменологічних моделей трафіку, які засновані на відтворенні основних статистичних характеристик за емпіричними даними для репрезентативної вибірки мереж одного класу, критерієм адекватності яких є перш за все відтворюваність в певних масштабах структури, організації і активності користувачів інформаційних мереж.

Безпосередньо дані вимірювань трафіку інформаційних мереж корисні й необхідні для перевірки продуктивності і розуміння роботи конкретної мережі, проте ці вимірювання тільки відображають характеристики поточної реальної мережі та не мають рівня абстракції. При цьому адекватні

феноменологічні моделі трафіку повинні виступати в якості універсального інструменту моделювання нормального функціонування всіх мереж одного класу. Математичні моделі інформаційних мереж є корисними для ефективних надійних розробок і експлуатації мережі, оцінки продуктивності мережі при різних сценаріях її роботи, оцінки зміни пропускної здатності мережі при використанні конкретних алгоритмів управління трафіком.

Розвиток інформаційних технологій в останні десятиліття активно стимулювало розробку великої кількості різних математичних моделей трафіку. Ранні моделі трафіку, в тому числі моделі Пуассона і їх модифікації, марковські моделі, моделі угруповання пакетів, припускали, що трафік інформаційних мереж має тенденцію згладжування сплесків, які виникають на окремих масштабах часу, у міру збільшення кількості джерел трафіку. В цьому випадку може застосовуватися традиційна модель Пуассона або її модифікації. Трафік інформаційних мереж, який відповідає моделі Пуассонівського потоку, можна моделювати як послідовність надходжень дискретних об'єктів, таких як пакети, сесій і т.д. В моделі Пуассона пропонується, що прибуття пакетів є незалежними та інтервали між ними підпорядковуються наступному виразу

$$P(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau}, \quad (8)$$

де  $\lambda$  – середня швидкість прибуття. Однак, виконання цієї умови пов'язано з припущенням про незалежність різних джерел трафіку, що не виконується в сучасних умовах з урахуванням спільної активності користувачів, але при цьому інтенсивно обмінюються інформацією між собою, за винятком дуже коротких тимчасових фрагментів.

Зазначений обмін інформацією проявляється у формі нерегулярного характеру флуктуацій трафіку інформаційних мереж, спочатку виявлених і досліджених в 1990-і рр. [2–8] і в ряді більш пізніх досліджень, вказує на більш високі втрати і затримки пакетів в інформаційній системі, ніж це прогнозується класичними моделями на основі пуассонівських і марковських процесів. Цей факт стимулював створення нових моделей, що описують нерегулярну динаміку трафіку інформаційних мереж. Популярні моделі, що враховують самоподібну поведінку в трафіку, включають ON/OFF моделі, фрактальний броунівський рух, фрактальний гауссовський шум, регресивні моделі трафіку (моделі на основі узагальнень лінійних авторегресійних процесів – AR, процеси змінного середнього – MA, авторегресійні моделі змінного середнього – ARMA, фрактальний авторегресійний інтегральний процес змінного середнього – FARIMA), фрактальні точені процеси (Fractal point process), фрактальної рух Леві (Fractional Levy Motion), моделі мультифрактального мережевого трафіку і т. д. [9]. Кожна з цих моделей має власні переваги і недоліки. Наприклад, фрактальний броунівський рух / фрактальний гауссовський шум є самоподібними моделями, які мають широке застосування і характеризуються відносно простою реалізацією, але вони мають один параметр, що недостатньо для охоплення складної структури реальних даних мережевого трафіку. Модель FARIMA ( $p, d, q$ ) дозволяє управляти кореляційною структурою і охоплювати як короткочасну, так і довготривалу залежність, але є більш складною в обчислюваннях, і вимагає більшого обсягу вихідних статистичних даних для її параметризації.

З інтенсифікацією обміну інформацією між користувачами в інформаційних мережах, особливо в мережевих спільнотах, моделювання поведінки кінцевих користувачів як джерел запитів до ресурсів інформаційних мереж стає все більш складним завданням. Для вирішення зазначених проблем були розроблені моделі, які описують типову поведінку одного користувача і моделі, яким описують поширення інформації між користувачами. Однак дані моделі не враховують взаємну кореляцію трафіку між кінцевими користувачами.

Застосування деяких універсальних статистичних закономірностей при моделюванні трафіку інформаційних мереж може спростити структуру і знизити число параметрів моделей, а також спростити їх параметризацію на основі окремих емпіричних реалізацій даних трафіку аналізованої інформаційної мережі. До таких закономірностей відноситься закон Ціпфа, який був використаний при аналізі трафіку інформаційних мереж вже в кінці 1990-х років. У недавньому минулому його справедливості підтвердилася при аналізі поведінки користувачів з появою і розвитком соціальних інформаційних мереж, а зовсім недавно його використання було запропоновано в якості потенційного інструменту виявлення деяких аномалій трафіку інформаційних мереж. Однак в цих роботах не відображені універсальні і масштабовані властивості трафіку інформаційних мереж різного типу і організації. Таким чином, обмеження існуючих математичних моделей при описі характеристик трафіку інформаційних мереж і оцінці продуктивності мережі обумовлюють актуальність розробки нових універсальних моделей, які будуть відображати статистичні характеристики сучасного інформаційного трафіку і дозволять оцінювати показники продуктивності інформаційних мереж, близькі до їх реальних емпіричних значень.

**Висновки.** Проведений аналіз особливостей статистичних властивостей трафіку сучасних інформаційних мереж, який вказує на актуальність враховувати явище самоподібності сучасного інформаційного процесу. Встановлено, що існуючі математичні моделі при описі трафіку інформаційних мереж мають обмеженість у їх застосуванні та при оцінці їх продуктивності. Обґрунтована актуальність

розробки нових універсальних масштабованих моделей трафіку інформаційних мереж з урахуванням його статистичних властивостей, включаючи ефекти самоподібності.

### Література

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021. – 2017. – URL : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html> (online; accessed: 2017-10-20).
2. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature / Mandelbrot B.B., Pignoni R. – WH freeman New York, 1983. – Vol. 173.
3. Шелухін О. І. Моделювання інформаційних систем : навчальний посібник для вузів / Шелухін О. І. – 2-е изд., перераб. і доп. – М. : Горяча лінія-Телеком, 2014. – 536 с.
4. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version) / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // IEEE / ACM Transactions on networking. – 1994. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–15.
5. Paxson V. Wide-area traffic: the failure of Poisson modeling / Paxson V., Floyd S // ACM SIGCOMM Computer Communication Review / ACM. – Vol. 24. – 1994. – P. 257-268.
6. On the self-similar nature of Ethernet traffic / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // ACM SIGCOMM Computer Communication Review / ACM. – Vol. 23. – 1993. – P. 183–193.
7. A multifractal wavelet model with application to network traffic / R.H. Riedi, M.S. Crouse, V.J. Ribeiro, R.G. Baraniuk // IEEE Transactions on Information Theory. – 1999. – Vol. 45, no. 3. – P. 992–1018.
8. Park K. Self-similar network traffic: An overview/ Park K., Willinger W. // Self-similar network traffic and performance evaluation. – 2000. – P. 1–38.
9. Колесніков А. В. Нелінійно-динамічні моделі мережевого трафіку / А. В. Колесніков, І. П. Іванов, М. А. Басараб // Нелінійний світ. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 44–56.
10. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series / C.K. Peng, S. Havlin, H.E. Stanley, A.L. Goldberger // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 1995. – Vol. 5, no. 1. – P. 82–87.
11. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis / J.W. Kantelhardt, E. Koscielny-Bunde, H.H. Rego et al. // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2001. – Vol. 295, no. 3. – P. 441–454.
12. Heffes H. Modulated characterization of packetized voice and data traffic and related statistical multiplexer performance / Heffes H., Lucantoni D., Markov A // IEEE Journal on selected areas in communications. – 1986. – Vol. 4, no. 6. – P. 856–868.
13. Jain R. Packet trains-measurements and a new model for computer network traffic / Jain R., Routhier S. // IEEE journal on selected areas in Communications. – 1986. – Vol. 4, no. 6. – P. 986–995.

### References

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021. – 2017. – URL : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html> (online; accessed: 2017-10-20).
2. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. / Mandelbrot B.B., Pignoni R. – WH freeman New York, 1983. – Vol. 173.
3. Shelukhin O. I. Modeliuvannia informatsiynykh system : navchalnyi posibnyk dlia vuziv / Shelukhin O. I. – 2-e yzd., pererab. i dop. – M. : Hariacha liniia-Telekom, 2014. – 536 s.
4. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version) / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // IEEE / ACM Transactions on networking. – 1994. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–15.
5. Paxson V. Wide-area traffic: the failure of Poisson modeling / Paxson V., Floyd S // ACM SIGCOMM Computer Communication Review / ACM. – Vol. 24. – 1994. – P. 257-268.
6. On the self-similar nature of Ethernet traffic / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // ACM SIGCOMM Computer Communication Review / ACM. – Vol. 23. – 1993. – P. 183–193.
7. A multifractal wavelet model with application to network traffic / R.H. Riedi, M.S. Crouse, V.J. Ribeiro, R.G. Baraniuk // IEEE Transactions on Information Theory. – 1999. – Vol. 45, no. 3. – P. 992–1018.
8. Park K. Self-similar network traffic: An overview/ Park K., Willinger W. // Self-similar network traffic and performance evaluation. – 2000. – P. 1–38.
9. Kolesnikov A. V. Neliniino-dynamichni modeli merezhevoho trafiku / A. V. Kolesnikov, I. P. Ivanov, M. A. Basarab // Neliniinyi svit. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 44–56.
10. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series / C.K. Peng, S. Havlin, H.E. Stanley, A.L. Goldberger // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 1995. – Vol. 5, no. 1. – P. 82–87.
11. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis / J.W. Kantelhardt, E. Koscielny-Bunde, H.H. Rego et al. // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2001. – Vol. 295, no. 3. – P. 441–454.
12. Heffes H. Modulated characterization of packetized voice and data traffic and related statistical multiplexer performance / Heffes H., Lucantoni D., Markov A // IEEE Journal on selected areas in communications. – 1986. – Vol. 4, no. 6. – P. 856–868.
13. Jain R. Packet trains-measurements and a new model for computer network traffic / Jain R., Routhier S. // IEEE journal on selected areas in Communications. – 1986. – Vol. 4, no. 6. – P. 986–995.

Рецензія/Peer review : 02.10.2018 Надрукована/Printed : 05.02.2019

Рецензент: д. т. н., проф. Мартинюк В. В.