

Г. М. Дреєва

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## МЕТОД ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТРАФІКУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ З ФРАКТАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

**Анотація.** Метою даної роботи є створення методу імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями для тестування мережевих алгоритмів та протоколів. Об'єктом дослідження є процес імітаційного моделювання мережевого трафіку. Предметом дослідження є методи та алгоритми моделювання часового ряду з фрактальними властивостями. В наш час для математичного опису телекомунікаційних процесів використовують математичні моделі самоподібного часового ряду. В більшості випадків для самоподібного трафіку, передбачення параметрів за якістю обслуговування QoS, аналітичні вирази побудувати не вдається, або такі перетворення можливо побудувати для занадто специфічних ситуацій, тому переважно аналітичні викладки є недоцільними. З цієї причини для визначення основних показників якості обслуговування, таких як джитер, запізнення, середня кількість відмов, та інших, використовують імітаційне моделювання за допомогою генераторів самоподібного трафіку. Це призводить до потреб в простих, з точки зору кількості обчислень, генераторів самоподібного трафіку з керованими фрактальними властивостями, які б давали числові послідовності з властивостями якомога ближчими до властивостей реального трафіку телекомунікаційної мережі, що досліджується. У даній роботі запропоновано метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. Для генерації трафіку використано теорію фрактального аналізу та теорію марківських процесів. Даний метод може бути частиною програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі, яку в свою чергу можна використати для тестування мережевих алгоритмів та протоколів. Також розроблену імітаційну модель мережевого трафіку планується використовувати у подальшому для тестування якості методів визначення фрактальної розмірності часових рядів, а також для прогнозування завантаженості мережевих пристроїв у комп'ютерних мережах.

**Ключові слова:** комп'ютерні мережі, мережевий трафік, фрактальна розмірність, марківські процеси, імітаційне моделювання, програмна імітаційна модель

### Вступ

При рішенні задач прогнозування та оптимізації роботи комп'ютерних та телекомунікаційних мереж є практично обов'язковим врахування фрактальної природи трафіку в мережі Інтернет [1-4].

Мережевий трафік має фрактальні властивості і може аналізуватися та моделюватися з застосуванням теорії фрактального аналізу [5]. Було проведено дослідження, яке показало, що марківські процеси часто використовуються для моделювання трафіку різних систем масового обслуговування [6-12]. Тож генерація трафіку для відтворення його фрактальних властивостей у даній роботі відбувається на основі теорії марківських процесів.

Проведений аналіз публікацій [13-21] показав актуальність питання моделювання трафіку у комп'ютерних мережах. Зокрема, в [13] була проведена оцінка часу затримки пакетів в умовах зв'язку при обслуговуванні трафіку складної структури на основі розробленої імітаційної моделі. В [14] проаналізовані сучасні методи моделювання мережевого трафіку. Показано, що створення універсальної імітаційної моделі з їх допомогою проблемне з причини великого обсягу дослідницької роботи, необхідної для адаптації приватних моделей до всього різноманіття характеристик різних джерел мережевого навантаження і конфігурації мережі. Запропоновано застосування контекстних методів для побудови універсальної імітаційної моделі. В якості основи для побудови універсальної імітаційної моделі обраний метод динамічного марковського моделювання. Проведена адаптація методу динамічного марковського моделювання для універсальної імітацій-

ної моделі і розроблена методика його застосування. У роботі [15] сформульована математична модель мультисервісного каналу зв'язку на основі експоненційної GERT-мережі. У працях [16-18] розглянуті питання генерації фрактального трафіку. У роботах [19-21] пропонується метод агрегування фрактального трафіку телекомунікаційних мереж, його прогнозування та аналіз.

Виходячи з аналізу останніх досліджень і публікацій можна зробити висновок, що питання моделювання трафіку та використання для цих цілей генераторів фракталоподібних послідовностей є актуальним.

**Метою цієї роботи** є розробка та дослідження програмної імітаційної моделі фрактального мережевого трафіку.

### Основна частина

В наш час для математичного опису телекомунікаційних процесів використовують математичні моделі самоподібного часового ряду. На графіках, де зображена завантаженість каналу комп'ютерної мережі самоподібність виражена наявністю викидів, кількість яких перевищує передбачення на основі класичної статистичної теорії (рис. 1), де на горизонтальній осі показаний час в умовних одиницях, а по вертикалі завантаженість мережі відносно максимальної пропускної спроможності.

У [22] основну увагу присвячено використанню навченої нейронної мережі для автоматизації класифікації трафіку за його фрактальними та мультифрактальними властивостями. Автори успішно використовують результати роботи для детектування DDoS атак.

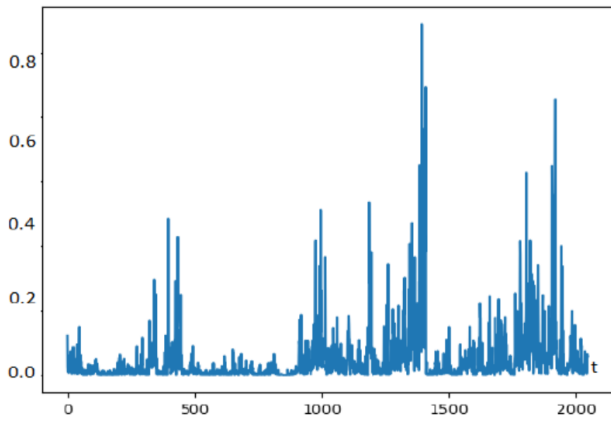


Рис. 1. Приклад самоподібного трафіку [22]

В більшості випадків для самоподібного трафіку, передбачення параметрів за якістю обслуговування QoS, аналітичні вирази побудувати не вдається, або такі перетворення можливо побудувати для занадто специфічних ситуацій, тому переважно аналітичні викладки є недоцільними. З цієї причини для визначення основних показників якості обслуговування, таких як джитер, запізнення, середня кількість відмов, та інших, використовують імітаційне моделювання за допомогою генераторів самоподібного трафіку. Це призводить до потреб в простих, з точки зору кількості обчислень, генераторів самоподібного трафіку з керованими фрактальними властивостями, які б давали числові послідовності з властивостями якомога ближчими до властивостей реального трафіку телекомунікаційної мережі, що досліджується.

Сучасні системи керування трафіком враховують його фрактальні властивості. Мережевий трафік можна представити у вигляді часового ряду. В системах, де використовують пакетний обмін інформацією, більш зручно використовувати бінарний часовий ряд, як представлення трафіку на рівні «пакет даних присутній», «пакету даних немає».

Для проведення експериментів було вирішено провести імітаційне моделювання мережевого трафіку з заздалегідь заданими властивостями. Моделювання було вирішено провести на основі теорії марківських процесів, що часто використовується для моделювання трафіку різних систем масового обслуговування [6-12]. Для генерації фрактального бінарного трафіку використано ланцюг Маркова, показаний на рис. 2.

В цій роботі для симуляції мережевого трафіку було створено бінарний часовий ряд, персистентність якого регулюється заданням ймовірностей зміни стану на протилежний  $\lambda_1, \lambda_2$  (рис. 2).

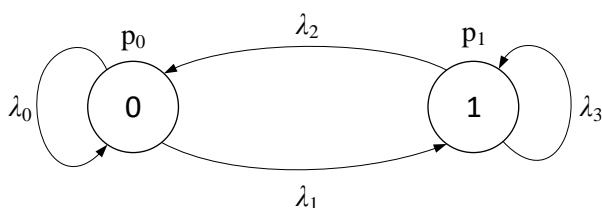


Рис. 2. Ланцюг Маркова, використаний для генерації фрактального бінарного трафіку

Цей генератор характеризується станами 0 або 1, та ймовірностями знаходження в цих станах як  $p_0 = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$  та  $p_1 = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2)$ , де  $\lambda_i$  – ймовірності відповідних переходів [23]. Інтенсивність трафіку такого генератора буде в межах  $[0, 1]$  і дорівнюватиме ймовірності отримати на виході генератора 1:  $p_1$ . Алгоритм роботи такого генератора показано на рис. 2.

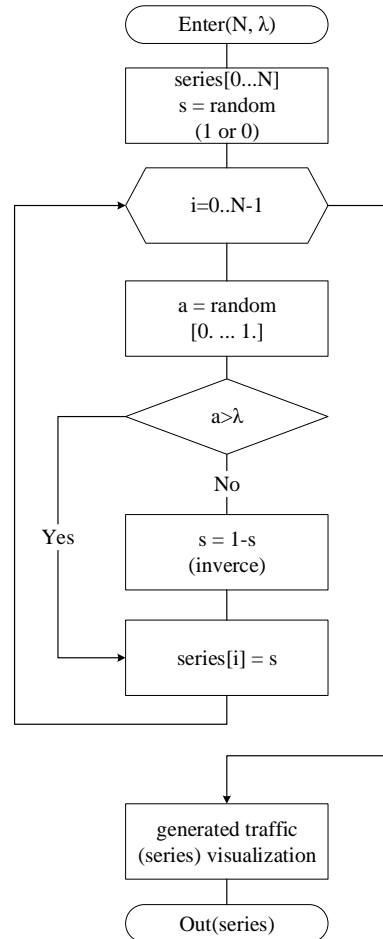


Рис. 3. Алгоритм імітаційного моделювання трафіку з фрактальними властивостями

Генерування трафіку інтенсивністю  $1/2$  починається із задання ймовірності збереження стану  $\lambda$ . Алгоритм містить змінну для збереження попереднього стану. В циклі повторюється генерування псевдовипадкового числа з діапазону  $[0; 1)$  з рівномірним розподілом, для якого проводиться порівняння із заданою ймовірністю  $\lambda$ . При проходженні тесту на порівняння, стан зберігається, і на вихід дається значення попереднього стану, інакше стан змінюється на протилежний. Очікується, що генерований бінарний трафік за цим алгоритмом має керовану фрактальну розмірність згідно співвідношенню (1), одержаному у [24]:

$$D(\lambda_1, \lambda_2) = 1 - \frac{(\lambda_2(1-\lambda_1)\ln(1-\lambda_1) + \lambda_1(1-\lambda_2)\ln(1-\lambda_2))}{2\lambda_1\lambda_2} \quad (1)$$

З метою визначення фрактальних властивостей бінарних рядів, отриманих генератором з рис. 3, було проведено експериментальне вимірювання коефіцієнта Херста методом R/S аналізу, результати якого показано на рис. 4.

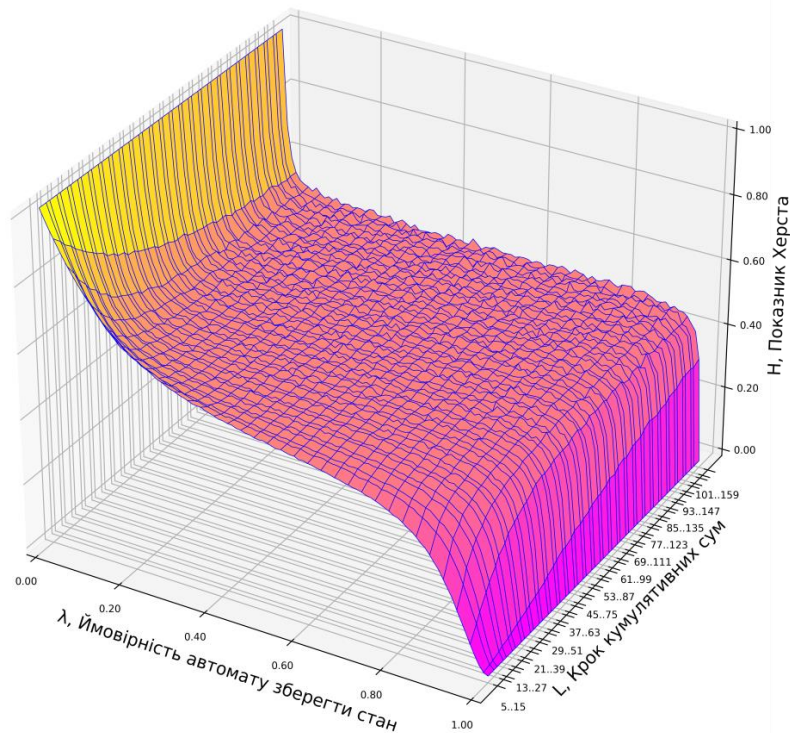


Рис. 4. Результати експериментального вимірювання коефіцієнту Херста  $H$

Рис. 4 містить результати аналізу бінарного трафіку інтенсивністю  $p_1=0.5$ . Для цього достатньо виконання умови рівності ймовірностей переходів  $\lambda = \lambda_0 = \lambda_3$ , або, що рівносильно  $\lambda_1 = \lambda_2$ . Цей показник відповідає за персистентність часового ряду і впливає на його фрактальні властивості. Також для розрахунку коефіцієнту Херста  $H$ , потрібно виділяти серії випадкового блукання – кумулятивні (накопичувальні) суми. Кількість кроків накопичувальних сум показано окремою віссю  $L$ .

На рис. 4 видно, що при зменшенні довжини кумулятивних сум, графік прямує до прямої лінії, яка сполучає одиничне та нульове значення коефіцієнту Херста. Напроти, якщо кумулятивні суми є досить довгими, коефіцієнт Херста прямує до значення 0.5 без відображення персистентності часового ряду.

Результат показаний на рис. 4 відповідає ситуації, при якій збільшення довжини кумулятивних сум підвищує точність пошуку значення коефіцієнту Херста, проте нівелює значення короточасних

залежностей фрактального трафіку. Це є протерічем, яке вимагає додаткових досліджень визначення фрактальності в числових рядах.

## Висновки

У цій роботі запропоновано метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. Для генерації трафіку використано теорію фрактального аналізу та теорію марківських процесів.

Даний метод може бути частиною програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі, яку в свою чергу можна використати для тестування мережевих алгоритмів та протоколів.

Розроблену імітаційну модель мережевого трафіку планується використовувати у подальшому для тестування якості методів визначення фрактальної розмірності часових рядів, а також для прогнозування завантаженості мережевих пристроїв у комп'ютерних мережах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zmeškal O., Nežádal M., Komendová B., Julínek M., Bžatek T. (2003), "Fractal analysis of printed structure images", Institute of Physical and Applied Chemistry, of the methods used to perform analysis listed above, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic.
2. Leland W., Taqqu M., Willinger W. (1997), "On the self-similar nature of IP-traffic", IEEE/ACM Transactions on Networking, № 3, P. 423-431.
3. Кучук Г.А. (2005), "Метод дослідження фрактального мережного трафіка", Системи обробки інформації, Вип. 5 (45), Харків, Україна, С. 74-84.
4. Кучук Г.А., Можаяв О.О., Воробйов О.В. (2006), "Аналіз та моделі самоподібного трафіка", Авиационно-космическая техника и технология, № 9(35), С. 173-180.
5. Drieieva H., Drieiev O., Meleshko Ye., Yakymenko M., Mikhav V. (2022), "A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method", CEUR -WS, Vol. 3171, Gliwice, Poland, R. 1694-1707, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>
6. Meleshko Ye., Drieiev O., Yakymenko M., Lysytsia D. (2020), "Developing a model of the dynamics of states of a recommendation system under conditions of profile injection attacks", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,

- Vol. 4, No. 2(106), pp. 14-24, available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096707995&origin=resultlist>
7. Meleshko Ye., Raskin L., Semenov S., Sira O. (2019), "Methodology of probabilistic analysis of state dynamics of multi-dimensional semi-Markov dynamic systems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 4(102), pp. 6-13, available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85078054250&origin=resultlist>
  8. Dimitrakos TD, Kyriakidis EG (2008), "A semi-Markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous repair times", *International Journal of Production Economics*, Vol. 111(2), pp. 752-762, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.03.010>
  9. Li Q.-L., Lui JCS, (2014), "Block-structured supermarket models, *Discrete Event Dynamic Systems*", Vol. 26(2), pp. 147-182, doi: <https://doi.org/10.1007/s10626-014-0199-1>
  10. Okamura H., Miyata S., Dohi T., (2015), "A Markov Decision Process Approach to Dynamic Power Management in a Cluster System", *IEEE Access*, Vol. 3, pp. 3039-3047, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2015.2508601>
  11. Li Q.-L. (2016), "Nonlinear Markov processes in large networks", *Special Matrices*, Vol. 4(1), doi: <https://doi.org/10.1515/spma-2016-0019>
  12. Feinberg EA, Yang F., (2015), "Optimal pricing for a GI/M/k/N queue with several customer types and holding costs", *Queueing Systems*, Vol. 82(1-2), pp. 103-120, doi: <https://doi.org/10.1007/s11134-015-9457-7>
  13. Ушанев К.В. (2015), "Имитационные модели системы массового обслуживания типа Ра/М/1, Н2/М/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой", *Системы управления, связи и безопасности*. 2015, №4, С.217-251.
  14. Добровольский Е.В., Нечипорук О.Л. (2005), "Моделирование сетевого трафика с использованием контекстных методов", *Наукові праці Одеської національної академії зв'язку імені О. С. Попова*, Одеса, Україна, № 1, С.24-32.
  15. Семенов С.Г., Мелешко С.В., Ілюшко Я.В. (2011), "Математическая модель мультисервисного канала связи на основе экспоненциальной GERT-сети", *Системи озброєння і військова техніка*, Харків, Україна, № 3(27), С.64-67.
  16. Radivilova T., Ibrahim Y. Daradkeh, Kirichenko L. (2018), "Development of QoS Methods in the Information Networks with Fractal Traffic", *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 64 (1), P. 27-32.
  17. Barat M., Joveini Z., Sadri J., Khoushhal H.A. (2018), "Fractal Modeling of Big Data Networks", *International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018)*, Canada, Montreal: Concordia University, P. 1-4.
  18. Jiang D., Huo L., Li Y. (2018), "Fine-granularity inference and estimations to network traffic for SDN", *PLoS ONE*, No13(5), doi: [doi: doi.org/10.1371/journal.pone.0194302](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194302)
  19. Кучук Г.А, Можасв О.О., Воробйов О.В. (2007), "Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети", *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*, № 8, С. 261-271, available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs\\_2007\\_8\\_48](http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_8_48)
  20. Кучук Г.А., Можасв О.О., Воробйов О.В. (2006), "Аналіз та моделі самоподібного трафіка", *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, № 9, С. 173-180, available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit\\_2006\\_9\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35)
  21. Haffey M., Arlitt M., Williamson C. (2018), "Modeling, Analysis, and Characterization of Periodic Traffic on a Campus Edge Network", *2018 IEEE 26th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, p. 170-182.
  22. Kirichenko L., Radivilova T., Bulakh V. (2018), "Machine Learning in Classification Time Series with Fractal Properties", available at: [https://www.researchgate.net/publication/329973801\\_Machine\\_Learning\\_in\\_Classification\\_Time](https://www.researchgate.net/publication/329973801_Machine_Learning_in_Classification_Time).
  23. Drieieva H., Smirnov O., Polishchuk Y., Brzhanov R., Aleksander M. (2020), "Method of Fractal Traffic Generation by a Model of Generator on the Graph", *COAPSN, CEUR-WS*, Vol . 2616, Lviv, Ukraine, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2616/paper31.pdf>
  24. Drieieva H., Drieiev O., Meleshko Ye., Yakymenko M., Mikhav V. (2022), "A Method of Determining the Fractal Dimension of Network Traffic by Its Probabilistic Properties and Experimental Research of the Quality of This Method", *CEUR-WS*, Vol. 3171, Gliwice, Poland, P. 1694-1707, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>

Received (Надійшла) 07.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### A method of simulation of computer network traffic with fractal properties

H. Drieieva

**Abstract.** The goal of this work is to create a method of simulating computer network traffic with fractal properties for testing network algorithms and protocols. The object of research is the process of simulation modeling of network traffic. The subject of research is the methods and algorithms for modeling time series with fractal properties. Nowadays, mathematical models of self-similar time series are used for the mathematical description of telecommunication processes. In most cases, for self-similar traffic, predicting parameters based on the quality of QoS service, analytical expressions cannot be constructed, or such transformations can be constructed for too specific situations, so mostly analytical calculations are impractical. For this reason, to determine the main indicators of the quality of service, such as jitter, delay, average number of failures, and others, simulation modeling using self-similar traffic generators is used. This leads to the need for computationally simple generators of self-similar traffic with controlled fractal properties, which would give numerical sequences with properties as close as possible to the properties of the real traffic of the telecommunication network under investigation. In this paper, a method of simulation modeling of computer network traffic with fractal properties is proposed. The theory of fractal analysis and the theory of Markov processes were used to generate traffic. This method can be part of a software simulation model of a computer network, which in turn can be used for testing network algorithms and protocols. Also a developed simulation model of network traffic is planned to be used in the future for testing the quality of methods for determining the fractal dimension of time series, as well as for forecasting the load of network devices in computer networks.

**Keywords:** computer networks, network traffic, fractal dimension, Markov processes, simulation modeling, computer simulation model.