

Черкаський державний технологічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Дрєєва Ганна Миколаївна

УДК 004.738+004.942

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА МАРШРУТИЗАЦІЇ ФРАКТАЛОПОДІБНОГО ТРАФІКУ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

123 Комп'ютерна інженерія

12 Інформаційні технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело

_____ Г. М. Дрєєва

Наукові керівники:

Мелешко Єлизавета Владиславівна
доктор технічних наук, професор

Миронець Ірина Валеріївна
кандидат технічних наук, доцент

Черкаси – 2023

АНОТАЦІЯ

Дреєва Г. М. Моделі та методи аналізу та маршрутизації фракталоподібного трафіку у комп'ютерних мережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія. – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2023.

Актуальність дослідження зумовлена постійним збільшенням навантаження на сучасні комп'ютерні мережі внаслідок все зростаючої їх ролі у всіх сферах діяльності людини та необхідністю забезпечення високої якості надання послуг користувачам навіть при пікових навантаженнях на мережу. Адже повністю усунути ймовірність пікових навантажень на комп'ютерні мережі, як і на будь-які системи масового обслуговування, за рахунок постійного їх масштабування не є можливим – тож необхідно боротися з наслідками перевантажень, коли вони трапляються. Одним зі шляхів підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах є зменшення кількості втрачених IP-пакетів. Втрата мережевих пакетів при пікових навантаженнях на комп'ютерну мережу відбувається внаслідок того, що черги маршрутизаторів переповнюються, і вони відкидають пакети, які не можуть помістити у чергу. На різні протоколи транспортного рівня втрата пакетів може впливати по-різному, зокрема, при використанні протоколу UDP буде падати якість та надійність передачі даних, а при використанні протоколу TCP буде знижуватися швидкість передачі даних при невеликих значеннях втрат пакетів, а при великих втратах пакетів буде знижуватися і швидкість, і якість роботи мережі.

Тому важливою науково-практичною задачею, яка вирішується у цій роботі, є підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та пікових навантаженнях на

маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережових пакетів.

Як показало проведене дослідження методів маршрутизації трафіку, прогнозування завантаженості мережових пристроїв з метою перенаправлення трафіку на менш завантажені за прогнозами пристрої є перспективним способом зменшення кількості втрачених IP-пакетів під час пікових навантажень на мережу. Для прогнозування можна використовувати будь-які методи прогнозування часових рядів, питання тільки в тому наскільки якісно вони будуть прогнозувати стан каналу зв'язку для комп'ютерних мереж із різними типами трафіку. А оскільки мережовий трафік має свої певні властивості та особливості й може бути різних типів та з різними варіаціями властивостей, то було досліджено можливість та ефективність застосування різних методів прогнозування часових рядів для прогнозування завантаженості маршрутизаторів.

Методи прогнозування часових рядів можна загалом приблизно розділити на такі категорії:

- Класичні статистичні методи, наприклад, ковзні середні, експоненційне згладжування, ARIMA, SARIMA.
- Машинне навчання, наприклад, лінійна регресія, випадковий ліс, нейронні мережі та глибоке навчання тощо.
- Фрактальний аналіз, наприклад, R/S-аналіз.

Проведене дослідження показало, що реальний комп'ютерний трафік має фрактальні властивості, а також може бути персистентним або антиперсистентним залежно від типу мереж та інформації, що у них передається. Зокрема, у гетерогенних комп'ютерних мережах спостерігається персистентний трафік, а у мобільних та домашніх Wi-Fi мережах, в наномережах датчиків та Інтернеті речей IoT спостерігається антиперсистентний трафік. Це можна використати при розробці методів прогнозування завантаженості мережових пристроїв, використовуючи для прогнозування часових рядів трафіку фрактальний аналіз.

Оскільки використання фрактальних часових рядів для математичного опису мережевого трафіку дозволяє моделювати такі його властивості, як наявність трендів, персистентність та антиперсистентність, які притаманні реальному трафіку та дозволяють робити моделі більш реалістичними, то для вирішення обраної науково-практичної задачі було вирішено використовувати переважно фрактальний аналіз та синтез трафіку.

На основі проведеного дослідження можливих шляхів вирішення наявної науково-практичної задачі було наступним чином сформульовано мету дисертаційної роботи: зменшення ймовірності втрати IP-пакетів при високій інтенсивності трафіку за рахунок розробки і застосування моделей та методів фрактального аналізу й адаптивної маршрутизації трафіку.

Проведено дослідження та порівняльний аналіз моделей та методів роботи комп'ютерних мереж, а також методів аналізу, моделювання, прогнозування та маршрутизації мережевого трафіку.

Удосконалено математичну модель мережевого фракталоподібного трафіку, яка відрізняється від відомих представленням трафіку на рівні "пакет є" – "пакета немає" на вході маршрутизатора та запропонованими ланцюгами Маркова, які описують ймовірності станів генератора трафіку як стохастичного скінченного автомата, що дало змогу одержати рівняння для імітаційного моделювання фрактального та мультифрактального трафіків. На основі запропонованої математичної моделі розроблено метод генерації мережевого фрактального трафіку, який відрізняється від відомих можливістю налаштувати фрактальну розмірність та інтенсивність трафіку перед його генерацією, а отже, моделювати різні типи трафіку.

Вперше розроблено метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку, який відрізняється від відомих використанням нової міри визначення фрактальної розмірності бінарного трафіку, що дозволило зв'язати аналітично його статистичні та фрактальні властивості, підвищити точність визначення фрактальної розмірності та зменшити кількість арифметичних операцій при фрактальному аналізі.

Набув подальшого розвитку метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, який відрізняється від відомих використанням запропонованого методу генерації мережевого фрактального трафіку та параметризацією характеристик моделі, зокрема таких як кількість маршрутизаторів, густина зв'язків між ними, довжина їх черг, пропускна здатність, інтенсивність та фрактальна розмірність трафіку, максимальна кількість вихідних пакетів з одного пристрою в одиницю часу, що дозволило моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації.

Удосконалено метод адаптивної маршрутизації трафіку, який відрізняється від відомих використанням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів, представленої прогнозованою ймовірністю втрати мережевих пакетів маршрутизатором, яка визначається запропонованим новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку, що дозволило підвищити якість обслуговування у комп'ютерній мережі під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених IP-пакетів.

Проведена оцінка якості та ефективності запропонованих методів і моделей шляхом проведення експериментів на програмній імітаційній моделі.

Практична цінність роботи полягає у такому:

– Розроблено алгоритми моделювання структури комп'ютерної мережі та генерації фрактального мережевого трафіку, що дають можливість моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації.

– Розроблено алгоритми для аналізу фрактальних властивостей трафіку та алгоритми для прогнозування ймовірності втрати мережевих пакетів маршрутизатором на основі статистичних та фрактальних властивостей вхідного трафіку, що дають змогу удосконалювати алгоритми

маршрутизації. Запропонований метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку з більшою точністю та однозначністю результатів визначає фрактальну розмірність трафіку незалежно від довжини досліджуваного ряду, на відміну від відомого методу на основі R/S-аналізу, а також має меншу кількість арифметичних операцій. Зокрема, запропонований метод дає менший відсоток відхилення від середнього значення показника Херста, а саме 1,8% , на відміну від 2,5% для R/S-аналізу.

– Розроблено алгоритм адаптивної маршрутизації трафіку з застосуванням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів, представленої прогнозованою ймовірністю втрати мережевого пакету маршрутизатором, яка визначається новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку. Запропонований удосконалений метод адаптивної маршрутизації дає змогу зменшувати кількість втрачених мережевих пакетів під час високої інтенсивності трафіку, зокрема, при інтенсивності 0,8 в середньому на 23% для персистентного трафіку, на 17% – для випадкового трафіку та на 1,5% – для антиперсистентного трафіку; конкретні значення покращень залежать від параметрів мережі.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено відповідними актами впровадження. Результати дисертаційних досліджень впроваджені і використовуються у діяльності Інтернет сервіс провайдера ТОВ «Імперіал-Нет», а також використано у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, мережевий трафік, фракталоподібний трафік, фрактальні часові ряди, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність, аналіз трафіку, програмне імітаційне моделювання, маршрутизація, методи маршрутизації, прогнозування завантаженості, марківські та напівмарківські процеси, складні мережі.

SUMMARY

Drieieva H. M. Models and methods of analysis and routing of fractal-like traffic in computer networks. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 123 “Computer Engineering”. – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2023.

The relevance of the research is determined by the constant increase in the load on modern computer networks due to their ever-growing role in all spheres of human activities and the need to ensure high quality of service to users even during peak network loads. After all, it is not possible to completely eliminate the likelihood of peak loads on computer networks, as well as on any mass service systems, due to their constant scaling – therefore, it is necessary to deal with the consequences of overloads when they occur.

One way to improve the quality of service in computer networks is to reduce the number of lost IP-packets. The loss of network packets during peak loads on a computer network occurs as a result of router queues becoming full, and then they discard packets that cannot fit into the queue.

Different transport layer protocols can be affected differently by packet loss, for example, when using the UDP protocol, the quality and reliability of data transmission will decrease, and when using the TCP protocol, the data transmission speed will decrease at low levels of packet loss, while at high levels of packet loss, both the speed and quality of network performance will decrease.

Therefore, an important scientific and practical task, which is solved in this work, is to improve the quality of service in computer networks during high network traffic intensity and peak loads on routers by reducing the number of lost network packets.

As the study of traffic routing methods has shown, prediction of the load on network devices with the aim of redirecting traffic to devices that are less loaded according to forecasts is a promising way to reduce the number of lost IP-packets during peak network loads. Any time series forecasting methods can be used for prediction; the question is only how accurately they will predict the state of the communication channel for computer networks with different types of traffic. Since network traffic has its own specific properties and characteristics and can be of different types with various property variations, the possibility and effectiveness of applying different time series forecasting methods for predicting router load have been investigated.

Methods of forecasting time series can be roughly divided into the following categories:

- Classical statistical models, for example, moving averages, exponential smoothing, ARIMA, SARIMA.
- Machine learning, for example, linear regression, random forest, neural networks, and deep learning, etc.
- Fractal analysis, for example, R/S analysis.

The conducted research has shown that real computer traffic has fractal properties and can be either persistent or anti-persistent, depending on the type of networks and the information being transmitted in them. In particular, persistent traffic is observed in heterogeneous computer networks, while anti-persistent traffic is observed in mobile and home Wi-Fi networks, in nanonetworks of sensors, and in the Internet of Things (IoT). This can be utilized in the development of methods for forecasting the load on network devices, using fractal analysis for forecasting time series of traffic.

Since the use of fractal time series for the mathematical description of network traffic allows to model its properties, such as the availability of trends, persistence, and anti-persistence, which are inherent to real traffic and make

models more realistic, it has been decided to predominantly use fractal analysis and synthesis of traffic to solve the chosen scientific and practical task.

Based on the conducted research of possible ways to solve the existing scientific and practical problem, the goal of the dissertation work is formulated as follows: the reduction of the probability of IP-packet loss during high traffic intensity by developing and applying models and methods of fractal analysis and adaptive traffic routing.

A study and comparative analysis of models and methods of computer networks operation, as well as methods of analysis, modeling, forecasting, and routing of network traffic, have been conducted.

An improved mathematical model of network fractal-like traffic, which differs from known models by representing traffic at the "packet is present" – "packet is absent" level at the router input and the proposed Markov chains, which describe the probabilities of states of the traffic generator as a stochastic finite automaton, has been developed. This allows to obtain the equations for simulation modeling of fractal and multifractal traffic. Based on the proposed mathematical model, a method of generating network fractal traffic, which differs from known methods by the ability to adjust the fractal dimension and traffic intensity before its generation, thus modeling different types of traffic, has been developed.

For the first time, a method of analyzing network fractal-like traffic, which differs from known methods by using a new measure for defining the fractal dimension of binary traffic, has been developed. This allows to analytically link its statistical and fractal properties, increase the accuracy of determining the fractal dimension, and reduce the number of arithmetic operations during fractal analysis.

A method of software simulation modeling of a computer network based on the theory of complex networks, which differs from known ones by using the proposed method of generating network fractal traffic and by parameterizing the characteristics of the model, in particular, such as the number of routers, the density of connections between them, the length of their queues, bandwidth,

intensity and fractal dimension of traffic, the maximum number of outgoing packets from one device per unit of time, has been further developed, which makes it possible to simulate computer networks of various architectures for testing the quality of work of routing algorithms.

A method of adaptive traffic routing, which differs from known methods by using an additional metric to determine the shortest paths for transmitting network packets, represented by the predicted probability of network packet loss by the router, which is determined by proposed new method based on the measured values of fractal dimension and intensity of incoming traffic, has been improved. This allows to improve the quality of service in the computer network during peak loads by reducing the number of lost IP-packets.

The quality and effectiveness of the proposed methods and models have been assessed through experiments conducted on the software simulation model.

The practical value of the work lies in the following:

- The algorithms for modeling the structure of a computer network and generating fractal network traffic, which allow to simulate computer systems of different architecture to test the quality of routing algorithms, are developed.

- The algorithms for analyzing fractal properties of traffic and algorithms for predicting the probability of loss of network packets by a router based on statistical and fractal properties of incoming traffic, which allow to improve routing algorithms, are developed. The proposed method for analyzing network fractal-like traffic determines the fractal dimension of traffic with greater accuracy and unambiguity of results, regardless of the length of the studied series, unlike the known method based on R/S-analysis, and also has fewer arithmetic operations. In particular, the proposed method has a smaller percentage deviation from the average value of the Hurst exponent: namely, 1.8% compared to 2.5% for R/S-analysis.

- The adaptive traffic routing algorithm using an additional metric for determining the shortest paths for network packet transmission, represented by the

predicted probability of loss of a network packet by a router, which is determined by a new method based on measured values of fractal dimension and intensity of incoming traffic, is developed. The proposed improved adaptive routing method allows to reduce the number of lost network packets during high traffic intensity, in particular, at an intensity of 0.8 on average by 23% for persistent traffic, by 17% for random traffic, and by 1.5% for anti-persistent traffic, with specific improvement values depending on network parameters.

The practical significance of the obtained results is confirmed by the corresponding implementation acts. The results of the dissertation research have been implemented and are used in the activities of the Internet service provider LLC "Imperial-Net" and have also been used in the educational process at the Central Ukrainian National Technical University.

Keywords: computer networks, network traffic, fractal-like traffic, fractal time series, fractal analysis, fractal dimension, traffic analysis, computer simulation modeling, routing, routing methods, load prediction, Markov and semi-Markov processes, complex networks

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Drieieva H., Drieiev O., Meleshko Ye., Yakymenko M., Mikhav V. A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*: CEUR-WS, Gliwice, Poland / Vasyl Lytvyn (Ed.). 2022. Vol. 3154. P. 1694–1707. (ISSN 1613-0073). DOI: 10.5281/zenodo.7892006. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>. (SCOPUS)
2. Drieieva H., Smirnov O., Drieiev O., Polishchuk Y., Brzhanov R., Aleksander M. Method of fractal traffic generation by a model of generator on the graph. *Control, Optimisation and Analytical Processing of Social Networks*: CEUR-WS, Lviv, Ukraine / Solomiia Fedushko, Thierry Oscar Edoh (Eds). 2020. Vol. 2616. P. 3–379. (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2616/paper31.pdf>. (SCOPUS)
3. Drieieva H., Smirnov O., Drieiev O., Simakhin V., Bondar S., Odarchenko R. Managing multifractal properties of the binary sequence generated with the Markov chains. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*: CEUR-WS, Zaporizhzhia, Ukraine / Sergey Subbotin (Ed.). 2020. Vol. 2608. P. 633–645. (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper49.pdf>. (SCOPUS)
4. Simakhin V., Bondar S., Drieieva H., Kovalenko O., Drieiev O., Zhumadilova M. Multifractal properties of traffic generator based on Markov chains. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*: CEUR-WS, Lviv, Ukraine / Solomiia Fedushko (Ed.). 2019. Vol. 2588. P. 567–579. (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2588/paper48.pdf>. (SCOPUS)
5. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Мелешко Є. В., Миронець І. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова. *Вісник Черкаського*

державного технологічного університету. 2022. Вип. 4. С. 58–66.
DOI: 10.24025/2306-4412.4.2022.269137. URL: <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/269137>. **(фахове видання категорії Б)**

6. Дреєва Г. М. Метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, 2022. Т. 4, № 70. С. 75–78.
DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.075. URL: <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2757>. **(фахове видання категорії Б)**

7. Drieieva H., Meleshko Ye., Drieiev O., Mikhav V. Computer simulation model of a computer network with fractal traffic for testing routing algorithms. *Advanced Information Systems*. 2022. No. 6 (4). P. 11–18.
DOI: 10.20998/2522-9052.2022.4.02. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/268306>. **(фахове видання категорії Б)**

8. Meleshko Ye., Drieiev O., Drieieva H. Method of identification bot profiles based on neural networks in recommendation systems. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 24–28. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/2522-9052.2020.2.05>. **(фахове видання категорії Б)**

9. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Метод генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 1 (32). С. 173–183. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).173-183. URL: http://mapeia.kntu.kr.ua/archive/32/32_Hanna.html. **(фахове видання)**

10. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М., Смірнова Т. В. Фрактальний аналіз генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 2 (33). С. 161–172. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.2(33).161-172. URL: http://mapeia.kntu.kr.ua/archive/33/33_Drieieva.html. **(фахове видання)**

11. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Денисенко О. О. Визначення фрактальної розмірності числової послідовності за розподілом ймовірності значень її елементів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2018. Вип. 31. С. 119–128. DOI: 10.32515/2409-9392.2018.31.119-128. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/eng/archive/31/31_Dreyeva.html. **(фахове видання)**

12. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Метод генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2019. С. 123–139.

13. Дреєва Г. М., Смірнов С. А. Дослідження мультифрактальних властивостей генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова. *Кібербезпека та інформаційні технології*: монографія. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 93–105.

14. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Миронець І. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією фракталоподібного трафіку. *Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій (ІПШРІТ-2022)*: зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., (Черкаси, 9 груд. 2022 р.) / упоряд.: Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко. М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 53–54.

15. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Міхав В. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., (Кропивницький, 10–11 листоп. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральнoукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2022. С. 44–45.

16. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Мелешко Є. В., Якименко М. С., Міхав В. В. Дослідження якості роботи методу визначення фрактальної розмірності мережевого трафіку за його ймовірнісними властивостями. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: тези доп. 12-ї Міжнар. наук.-техн. конф., (Баку–Харків–Жиліна, 27–28 квіт. 2022 р.)* / уклад. В. В. Косенко. Харків: ФОП Петров В.В., 2022. Т. 1. С. 126.

17. Дреєва Г. М., Смірнов С. А., Коноплицька-Слободенюк О. К. Дослідження генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова та його мультифрактальних властивостей. *Інформаційна безпека та інформаційні технології: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.)* / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 35.

18. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М., Гермак В. С., Резніченко В. А., Шевченко О. О. Методи визначення ботів серед користувачів соціальних мереж. *Інформаційна безпека та інформаційні технології: зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.)* / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 44.

19. Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Розробка методу імітаційного моделювання мережевого трафіку з фрактальними властивостями. *Цифрова трансформація суспільства: зб. тез доп. I Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 21–22 квіт. 2022 р.)* / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 100.

20. Мелешко Є., Дреєв О., Якименко М., Дреєва Г. Дослідження вразливостей рекомендаційних систем соціальних мереж. *Інформація, комунікація, суспільство ICS-2021: матеріали X Міжнар. наук. конф., (Львів,*

20–22 трав. 2021 р.) / уклад. О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2021. С. 41–42.

21. Мелешко Є. В., Дреєв О. М., Дреєва Г. М. Розробка методу ідентифікації ботів у рекомендаційних системах. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., (Чернігів, 29–30 квіт. 2020 р.): у 2 т. / уклад. А. М. Єрошенко, Чернігів: ЧНТУ, 2020. Т. 2. С. 165–166.

22. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Метод кластеризації користувачів соціальної мережі на основі нейронних мереж. *Комбінаторні конфігурації та їх застосування*: зб. тез XXII Міжнар. наук.-практ. семінару імені А. Я. Петренюка, (Запоріжжя–Кропивницький, 15–16 трав. 2020 р.) / за ред. Г. П. Донця. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2020. С. 87–90.

23. Мелешко Є., Дреєва Г., Якименко М., Хох В. Методи моделювання складних мереж. *Інформація. Комунікація. Суспільство*: матеріали IX Міжнар. наук. конф., (Львів, 21–23 трав. 2020 р.) / уклад. А. М. Пелещин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2020. С. 29–30.

24. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дезінформаційні атаки на рекомендаційні системи. *Безпека в сучасному світі*: зб. тез Міжнар. наук. конф., (Дніпро, 27–28 верес. 2019 р.) / ред. О. Ю. Висоцький. Дніпро: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2019. С. 51–53.

25. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Реалізація генератора фрактального трафіку в системах імітаційного моделювання. *Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2019*: матеріали XXVII Міжнар. наук.-практ. конф.: у 4 ч., (Харків, 15–17 трав. 2019 р.) / ред. Є. І. Сокол. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Ч. 4. С. 146.

26. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., (Харків, 24–

25 квіт. 2019 р.) / ред. С. П. Євсєєв. Харків: ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2019. С. 27.

27. Drieieva H., Smyrnov O., Drieiev O. Method of generating fractal traffic for conducting numerical experiments on simulating load in a computer network. *Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives (MIMCS 2019)*: Materials of the 1st Int. Sci.-Pract. Conf., (Baku, Azerbaijan, 01–02 July 2019) / Azerbaijan State Oil and Industry University (ASOIU). Baku: ASOIU, 2019. P. 32–33.

28. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дослідження проблем сучасних рекомендаційних систем. *Інформація, комунікація, суспільство 2018*: зб. тез 7-ї Міжнар. наук. конф. ІКС-2018, (Чинадієво, Україна, 17–19 трав. 2018 р.) / уклад. А. М. Пелещин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. С. 31–32.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	21
ВСТУП.....	25
Список літератури до вступу	32
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ І	
МАРШРУТИЗАЦІЇ МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ ТА МЕТОДІВ	
ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ.....	41
1.1. Дослідження методів та протоколів маршрутизації трафіку	41
1.2. Дослідження методів адаптивної маршрутизації та прогнозування завантаженості комп'ютерних мереж	50
1.3. Дослідження методів симуляції трафіку та емпіричних підтверджень його фракталоподібності.....	59
1.4. Дослідження методів аналізу фракталоподібного трафіку.....	63
1.5. Дослідження методів генерування структури комп'ютерної мережі	66
1.6. Цілі та задачі дисертаційного дослідження.....	68
Висновки до розділу 1	73
Список літератури до розділу 1	74
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФРАКТАЛОПОДІБНОГО	
ТРАФІКУ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ ТА МЕТОД	
ГЕНЕРАЦІЇ ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ФРАКТАЛЬНОГО	
ЧАСОВОГО РЯДУ.....	85
2.1. Формалізація задачі дослідження.....	85
2.2. Розробка математичної моделі фракталоподібного трафіку у комп'ютерних мережах на основі ланцюга Маркова.....	87
2.3. Розробка методу генерації фрактального трафіку.....	91
2.4. Експериментальне дослідження статистичних властивостей часових рядів, створених запропонованим методом генерації фрактального трафіку	93
2.5. Розробка математичної моделі генератора мультифрактального трафіку.....	96

2.6. Аналітичне дослідження фрактальних властивостей ряду, який отримано генератором на стохастичному скінченному автоматі.....	103
2.7. Керування інтенсивністю генерованого трафіку на основі скінченного автомата.....	108
2.8. Визначення показника Херста R/S-аналізом для часових рядів, створених запропонованим генератором фрактального трафіку.....	111
Висновки до розділу 2	116
Список літератури до розділу 2.....	117
РОЗДІЛ 3 МЕТОД АНАЛІЗУ МЕРЕЖЕВОГО ФРАКТАЛОПОДІБНОГО ТРАФІКУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ	
123	
3.1. Розробка методу аналізу мережевого фракталоподібного трафіку для визначення його фрактальної розмірності	124
3.2. Експериментальне дослідження якості роботи запропонованого методу аналізу мережевого фракталоподібного трафіку для визначення його фрактальної розмірності	135
3.3. Дослідження результатів роботи розробленого генератора трафіку запропонованим методом аналізу мережевого трафіку.....	142
3.4. Експериментальне дослідження залежності фрактальної розмірності числового ряду від обраного масштабу	146
Висновки до розділу 3	152
Список літератури до розділу 3.....	153
РОЗДІЛ 4 МЕТОД ПРОГРАМНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ ТА МЕТОД АДАПТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВТРАТИ ПАКЕТІВ НА МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЯХ.....	
159	
4.1. Розробка методу програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку.....	160

4.2. Дослідження роботи відомого алгоритму маршрутизації OSPF при пікових навантаженнях на мережеві пристрої у запропонованій програмній імітаційній моделі комп'ютерної мережі	163
4.3. Розробка методу прогнозування ймовірності втрати мережевих пакетів на маршрутизаторах при відомій інтенсивності та фрактальній розмірності трафіку	166
4.4. Розробка методу адаптивної маршрутизації фракталоподібного трафіку з прогнозуванням та врахуванням ймовірності втрати пакетів на маршрутизаторах при виборі оптимальних маршрутів	173
Висновки до розділу 4	178
Список літератури до розділу 4	180
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ	184
ДОДАТКИ	187
Додаток А. Акти впровадження дисертаційних досліджень	188
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	192

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

OSPF (Open Shortest Path First) – протокол динамічної маршрутизації мережевого трафіку, що ґрунтується на технології відстеження стану каналу зв'язку (link-state technology) і використовує для знаходження найкоротшого шляху передачі IP-пакетів алгоритм Дейкстри.

QoS (quality of service) – здатність комп'ютерної мережі забезпечити необхідний сервіс трафіку різних типів у заданих технологічних рамках. QoS передбачає, зокрема, що різним класам мережевого трафіку надаються різні пріоритети в обслуговуванні для обробки в першу чергу найбільш важливих категорій трафіку під час пікових навантажень на мережу.

Адаптивна маршрутизація – група алгоритмів маршрутизації, у яких рішення про вибір найкоротшого маршруту передачі мережевого пакету приймаються на основі статистичних даних мережевого трафіку та топології мережі. Параметри, які найчастіше використовуються в адаптивних алгоритмах маршрутизації, це відстань, пропускна здатність, очікуваний час проходження, завантаженість черг маршрутизації тощо. Такі алгоритми враховують поточний стан комп'ютерної мережі для динамічної зміни маршрутів та оперативного реагування на появу чинників, що можуть знизити якість обслуговування у мережі, і зменшення їх негативного впливу.

Антиперсистентний часовий ряд – часовий ряд, що з високою ймовірністю змінює наявну у ньому тенденцію, тобто зростання його значень у минулому з високою ймовірністю призведе до зменшення значень у майбутньому і навпаки. З точки зору фрактального аналізу це ряд, у якого показник Херста знаходиться в діапазоні $0 < H < 0.5$, а фрактальна розмірність $1.5 < D < 2$.

Випадковий часовий ряд – часовий ряд, який відображає процес без пам'яті, коли попередні значення ряду не впливають на наступні. З точки зору фрактального аналізу це ряд, у якого показник Херста рівний або наближається до 0.5, а фрактальна розмірність рівна або наближається до 1.5.

Інтенсивність трафіку (у комп'ютерних та телекомунікаційних мережах) – в загальному випадку міра середньої зайнятості сервера або ресурсу протягом певного періоду часу. Часто визначається як відношення часу, протягом якого об'єкт кумулятивно зайнятий, до часу, протягом якого цей об'єкт доступний для заповнення. Інтенсивність трафіку може визначатися, в залежності від мети дослідження по-різному. В цій роботі під інтенсивністю трафіку розуміється ймовірність передачі пакету в даний квант часу, ця інтенсивність приймає значення від 0 до 1.

Мультифрактальний трафік – мережевий трафік, представлення якого у вигляді часового ряду демонструє наявність комплексних мультифрактальних форм, які детермінуються не одним процесом, а декількома, що послідовно змінюють один одного, кожен із яких створює патерн зі своєю фрактальною розмірністю. У пропонованій роботі так називався як реальний мережевий трафік, що виявляє властивості комплексної самоподібності при його дослідженні у вигляді часового ряду, так і трафік, який генерувався у програмній імітаційній моделі з симуляцією властивості мультифрактальності.

Мультифрактальний часовий ряд – часовий ряд, який демонструє на графіку наявність комплексних мультифрактальних форм, які детермінуються не одним алгоритмом, а декількома, що послідовно змінюють один одного, кожен із яких моделює патерн зі своєю фрактальною розмірністю.

Персистентний часовий ряд – часовий ряд, що з високою ймовірністю зберігає наявну у ньому тенденцію, тобто зростання його значень у минулому з високою ймовірністю приведе до зростання значень у майбутньому і навпаки. З точки зору фрактального аналізу це ряд, у якого показник Херста знаходиться в діапазоні $0.5 < H < 1$, а фрактальна розмірність $1 < D < 1.5$.

Показник Херста – міра довгострокової пам'яті часових рядів. Пов'язана з автокореляціями часового ряду та швидкістю, з якою вони

зменшуються, коли відставання між парами значень збільшується. Приймає значення в діапазоні $0 < H < 1$. При $0.5 < H < 1$ – процес персистентний (з пам'яттю, наявні тренди з високою ймовірністю зберігаються), при $0 < H < 0.5$ – процес антиперсистентний (з пам'яттю, наявні тренди з високою ймовірністю змінюються), $H \approx 0.5$ – процес випадковий (без пам'яті, тренди відсутні). Пов'язаний із фрактальною розмірністю часових рядів наступним чином: $D = H - 2$, де D – фрактальна розмірність, H – показник Херста.

Фрактали – об'єкти, які мають схожі сапоподібні форми при розгляді в різних масштабах; їм призначається розмірність, що не є цілим числом; багато природних та технічних явищ успішно моделюються фракталами.

Фракталоподібний трафік – мережевий трафік, представлення якого у вигляді часового ряду демонструє на більшій частині графіка наявність деяких самоподібних форм (розглядається не строга самоподібність), характерних для просторових фракталів. У цій роботі так називався реальний мережевий трафік, що виявляє властивості самоподібності при його дослідженні у вигляді часового ряду.

Фрактальна розмірність – коефіцієнт, який характеризує ступінь складності, самоподібності та довгострокової пам'яті у фрактальних або фракталоподібних структурах (або часових рядів, множин) на основі кількісної оцінки зміни деталей зі зміною масштабу. Фрактальна розмірність може набувати дробові значення. Для часових рядів вона приймає значення в діапазоні $1.0 < D < 2.0$. Також зазначається наявність властивості довгострокової пам'яті у процесу залежно від свого значення. При $1 < D < 1.5$ – процес персистентний (з пам'яттю, наявні тренди з високою ймовірністю зберігаються), при $1.5 < D < 2$ – процес антиперсистентний (з пам'яттю, наявні тренди з високою ймовірністю змінюються), при $D \approx 1.5$ – процес випадковий (без пам'яті, тренди відсутні). Один із найпоширеніших методів її визначення – метод Мінковського: $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N_\varepsilon)}{-\ln(\varepsilon)}$, де N_ε – мінімальне число множин діаметру ε , якими можна покрити досліджувану множину.

Фрактальний аналіз – галузь сучасної математики, яка засобами теорії мір дробових порядків, метричних розмірностей, операторів дробового інтегрування та диференціювання вивчає властивості математичних об’єктів зі складною локальною будовою. Застосовується в тому випадку, коли досліджуваний об’єкт (або процес) має кілька варіантів розвитку, і його наступний стан визначається попереднім. Дає змогу досліджувати нестабільні системи й процеси і передбачити їхні майбутні стани.

Фрактальний трафік – мережевий трафік, представлення якого у вигляді часового ряду демонструє на графіку наявність самоподібних форм (розглядається не строга самоподібність), характерних для просторових фракталів. У цій роботі так називався трафік, який генерувався у програмній імітаційній моделі з симуляцією властивості фрактальності.

Фрактальний часовий ряд – дані у формі одновимірного масиву, які можна представити у вигляді кривої, що має властивість самоподібності та дробову розмірність Мінковського від одного до двох. Стосовно часових рядів зазначають, що явище, яке розвивається в часі, виявляє самоподібність, якщо числові значення певної спостережуваної величини $f(x, t)$, виміряні в різний час, різні, але відповідна безрозмірна величина при заданому значенні x/t^z залишається незмінною. Це відбувається, якщо величина $f(x, t)$ проявляє динамічне масштабування. Динамічне масштабування є ознакою, яка показує, чи демонструє процес самоподібність. Загалом вважається, що функція демонструє динамічне масштабування, якщо вона задовольняє:

$f(x, t) \sim t^\theta \varphi\left(\frac{x}{t^z}\right)$, де θ – фіксується вимогою до розмірів $[f]=[t^\theta]$, числове

значення f/t^θ має залишатися незмінним, незалежно від зміни одиниці вимірювання t , оскільки φ є безрозмірною величиною.

Фрактальні об’єкти (у математиці) – об’єкти, які виявляють самоподібність, тобто коли об’єкт в точності або наближено співпадає з частиною себе самого, тобто ціле має ту ж форму або схожу форму, що й одна або більше її частин.

ВСТУП

Актуальність. Актуальність дослідження зумовлена постійним збільшенням навантаження на сучасні комп'ютерні мережі у наслідок їх все зростаючої ролі у всіх сферах діяльності людини, та необхідністю забезпечення високої якості надання послуг користувачам навіть при пікових навантаженнях на мережу [1, 2]. Адже повністю усунути ймовірність пікових навантажень на комп'ютерні мережі, як і на будь-які системи масового обслуговування, за рахунок постійного їх масштабування не є можливим – тож необхідно боротися з наслідками перевантажень, коли вони трапляються. Одним зі шляхів підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах є зменшення кількості втрачених IP-пакетів [3, 4]. Втрата мережевих пакетів при пікових навантаженнях на комп'ютерну мережу відбувається внаслідок того, що черги маршрутизаторів переповнюються, і вони відкидають пакети, які не можуть помістити у чергу. На різні протоколи транспортного рівня втрата пакетів може впливати по-різному: зокрема, при використанні протоколу UDP буде падати якість та надійність передачі даних, а при використанні протоколу TCP буде знижуватися швидкість передачі даних при невеликих значеннях втрат пакетів, а при великих втратах пакетів буде знижуватися і швидкість, і якість роботи мережі [5].

Як показало проведене дослідження методів маршрутизації трафіку, прогнозування завантаженості мережевих пристроїв з метою перенаправлення трафіку на менш завантажені за прогнозами пристрої є перспективним способом зменшення кількості втрачених IP-пакетів під час пікових навантажень на мережу [6-9]. Також проведене дослідження показало, що комп'ютерний трафік має фрактальні властивості [6, 10-12, 16-20], що можна використати при розробці методів прогнозування завантаженості мережевих пристроїв.

Розробка програмних імітаційних моделей комп'ютерних мереж для тестування методів маршрутизації трафіку є важливою задачею, оскільки не

завжди є можливим та економічно доцільним усі експерименти проводити на реальних комп'ютерних мережах, а доцільно – тільки фінальні [13-15].

Найважливіші роботи в галузі аналізу та маршрутизації мережевого фракталоподібного трафіку були створені наступними зарубіжними та вітчизняними науковцями: Віллінджер В. [12, 16], Молнар С. [10, 17], Кучук Г. А. [6, 18], Можасв О. О. [18], Воробйов О. В. [18], Лемешко О. В. [48], Євдокименко М. О. [48], Корнієнко В. І. [19], Радівілова Т.А. [20].

Тому важливою **науково-практичною задачею**, яка вирішується у цій роботі, є підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та пікових навантажень на маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережевих пакетів.

Оскільки використання фрактальних часових рядів для математичного опису мережевого трафіку дозволяє моделювати такі його властивості, як наявність трендів, персистентність та антиперсистентність, які властиві реальному трафіку та дозволяють робити моделі більш реалістичними [6, 10-12, 16-20, 48], то для вирішення обраної науково-практичної задачі було вирішено використовувати переважно фрактальний аналіз та синтез трафіку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у межах пріоритетних наукових напрямів, які охоплюють актуальні проблеми, відповідно до рішення Президії Національної академії наук України від 30 січня 2019 року «Про Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 роки», «Інформатика» за темами: «Розроблення обчислювальних алгоритмів і процедур з метою вирішення практичних задач міждисциплінарного характеру для застосувань, що належать до науково-технічної та соціально-економічної сфер діяльності людини», «Розроблення математичних методів та систем моделювання об'єктів та процесів». Дисертаційну роботу виконано у межах зареєстрованих

науково-дослідних робіт Центральноукраїнського національного технічного університету: «Моделювання та аналіз складних мереж та інформаційних систем» (ДР № 0119U003587) та «Методи використання інформаційних технологій та інтелектуальних систем для аналізу даних та забезпечення інформаційної безпеки суспільства» (ДР № 0116U008161).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи – зменшення ймовірності втрати IP-пакетів при високій інтенсивності трафіку за рахунок розробки і застосування моделей та методів фрактального аналізу і адаптивної маршрутизації трафіку.

Мета дисертаційної роботи визначає необхідність розв'язання таких **основних задач:**

1. Удосконалити математичну модель мережевого фракталоподібного трафіку та метод генерації трафіку з різними властивостями.

2. Розробити метод аналізу мережевого трафіку та визначення його фрактальної розмірності для прогнозування стану маршрутизаторів комп'ютерної мережі.

3. Розробити метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерних мереж із фракталоподібним трафіком та різними параметризованими характеристиками моделі комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації.

4. Удосконалити метод адаптивної маршрутизації, заснований на прогнозуванні ймовірності втрати мережевих пакетів на основі аналізу трафіку, для зменшення кількості втрачених пакетів під час пікових навантажень на комп'ютерну мережу.

5. Провести експериментальне дослідження запропонованих методів аналізу та адаптивної маршрутизації трафіку.

Об'єктом дослідження є процеси аналізу та маршрутизації трафіку у комп'ютерних мережах.

Предметом дослідження є методи аналізу, моделювання та адаптивної маршрутизації мережевого трафіку.

Методи дослідження. Для вирішення завдань математичного моделювання структури комп'ютерної мережі використано теорію графів, теорію складних мереж, теорію комп'ютерних мереж, теорію об'єктно-орієнтованого програмування та теорію алгоритмів. Для аналізу та генерації мережевого трафіку використано теорію фрактального аналізу та синтезу, теорію математичного аналізу, теорію статистики та теорію марківських процесів. Для визначення ефективності запропонованих методів використано експеримент на програмній імітаційній моделі, теорію статистики, теорію комп'ютерних мереж.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

– *Удосконалено математичну модель мережевого фракталоподібного трафіку, яка відрізняється від відомих представленням трафіку на рівні “пакет є” – “пакету немає” на вході маршрутизатора та запропонованими ланцюгами Маркова, які описують ймовірності станів генератора трафіку як стохастичного скінченного автомата, що дозволило одержати рівняння для імітаційного моделювання фрактального та мультифрактального трафіку. На основі запропонованої математичної моделі розроблено метод генерації мережевого фрактального трафіку, який відрізняється від відомих можливістю налаштовувати фрактальну розмірність та інтенсивність трафіку перед його генерацією, а отже, моделювати різні типи трафіку.*

– *Вперше розроблено метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку, який відрізняється від відомих використанням нової міри визначення фрактальної розмірності бінарного трафіку, що дозволило зв'язати аналітично його статистичні та фрактальні властивості, підвищити точність визначення фрактальної розмірності та зменшити кількість арифметичних операцій при фрактальному аналізі.*

– *Набув подальшого розвитку метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, який відрізняється від відомих використанням запропонованого методу генерації*

мережевого фрактального трафіку та параметризацією характеристик моделі, зокрема таких як кількість маршрутизаторів, густина зв'язків між ними, довжина їх черг, пропускна здатність, інтенсивність та фрактальна розмірність трафіку, максимальна кількість вихідних пакетів із одного пристрою в одиницю часу, що дозволило моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації.

– *Удосконалено метод* адаптивної маршрутизації трафіку, який відрізняється від відомих використанням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів, представлені прогнозованою ймовірністю втрати мережевих пакетів маршрутизатором, яка визначається запропонованим новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку, що дозволило підвищити якість обслуговування у комп'ютерній мережі під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених IP-пакетів.

Практична цінність роботи полягає у такому:

– Розроблено алгоритми моделювання структури комп'ютерної мережі та генерації фрактального мережевого трафіку, що дають можливість моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації.

– Розроблено алгоритми для аналізу фрактальних властивостей трафіку та алгоритми для прогнозування ймовірності втрати мережевих пакетів маршрутизатором на основі статистичних та фрактальних властивостей вхідного трафіку, що дають змогу удосконалювати алгоритми маршрутизації. Запропонований метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку з більшою точністю та однозначністю результатів визначає фрактальну розмірність трафіку незалежно від довжини досліджуваного ряду, на відміну від відомого методу на основі

R/S-аналізу, а також має меншу кількість арифметичних операцій. Зокрема, запропонований метод дає менший відсоток відхилення від середнього значення показника Херста: а саме: 1,8% на відміну від 2,5% для R/S-аналізу.

– Розроблено алгоритм адаптивної маршрутизації трафіку з застосуванням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів, представленої прогнозованою ймовірністю втрати мережевого пакету маршрутизатором, яка визначається новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку. Запропонований удосконалений метод адаптивної маршрутизації дає змогу зменшувати кількість втрачених мережевих пакетів під час високої інтенсивності трафіку, зокрема при інтенсивності 0,8 в середньому на 23% для персистентного трафіку, на 17% – для випадкового трафіку та на 1,5% – для антиперсистентного трафіку; конкретні значення покращень залежать від параметрів мережі. При надвеликих навантаженнях на комп'ютерну мережу ефект покращення зникає, тому що, коли усі маршрутизатори перевантажені, вичерпується ресурс для адаптивної маршрутизації, адже немає куди перенаправляти IP-пакети, усі черги зайняті.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено відповідними актами впровадження. Результати дисертаційних досліджень впроваджені і використовуються у діяльності Інтернет сервіс провайдера ТОВ «Імперіал-Нет», а також використано у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи автор отримав самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [21, 24, 29, 30, 32, 35] – метод визначення фрактальної розмірності мережевого трафіку за його ймовірнісними властивостями; [22, 28, 31, 38, 44, 45, 46] – метод генерації фрактального трафіку на основі ланцюга Маркова; [23, 36] – метод генерації

мультифрактального трафіку та керування його мультифрактальними властивостями за допомогою ланцюгів Маркова; [25, 26, 33, 34] – програмна імітаційна модель комп’ютерної мережі з симуляцією фрактального та мультифрактального трафіку на основі ланцюгів Маркова для тестування методів маршрутизації; [27, 37, 39, 40, 41] – дослідження методів аналізу часових рядів; [42] – дослідження методів моделювання комп’ютерних мереж; [43, 47] – дослідження методів інформаційних атак на застосунки комп’ютерних мереж.

З робіт, що опубліковані у співавторстві, у дисертаційній роботі використовуються виключно результати, отримані особисто здобувачем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких наукових конференціях та семінарах: закордонній I Міжнародній науково-практичній конференції «Modern Information, Measurement And Control Systems: Problems And Perspectives» (Азербайджан, Баку, 2019); 12-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (Азербайджан – Україна – Словаччина, Баку-Харків-Жиліна, 2022); Міжнародній науковій конференції «Інформація. Комунікація. Суспільство» (Україна, Львів, 2018, 2020, 2021); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційна безпека та інформаційні технології» (Україна, Харків, 2019, 2020); XXVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я. MicroCAD-2019» (Україна, Харків, 2019); Міжнародній науковій конференції «Безпека в сучасному світі» (Україна, Дніпро, 2019); XXII Міжнародному науково-практичному семінарі «Комбінаторні конфігурації та їх застосування» імені А. Я. Петренюка (Україна, Запоріжжя – Кропивницький, 2020); X Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Україна, Чернігів, 2020); Міжнародній науково-

практичній конференції «Цифрова трансформація суспільства» (Україна, Кропивницький, 2022); Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві» (Україна, Кропивницький, 2022); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (Україна, Черкаси, 2022).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в 28 наукових працях, у тому числі: 11 наукових статей (з яких 4 входить до бази даних Scopus), 7 – у вітчизняних фахових наукових журналах), 2 монографії, а також 15 матеріалів і тез доповідей на конференціях.

Структура роботи та її обсяг. Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури після кожного розділу та додатків і містить 187 основного тексту, 48 рисунків, 8 таблиць, 152 джерела у списку літератури та 11 сторінок додатків. Загальний обсяг роботи 197 сторінки.

Список літератури до вступу

1. An adaptive traffic routing approach toward load balancing and congestion control in Cloud-MANET ad hoc networks / S. Dalal, B. Seth, V. Jaglan et al. *Soft Comput.* 2022. Vol. 26, no. 10, P. 5377–5388. DOI: 10.1007/s00500-022-07099-4.

2. Intelligent routing method based on Dueling DQN reinforcement learning and network traffic state prediction in SDN / L. Huang, M. Ye, X. Xue et al. *Wireless Netw.* 2022. DOI: 10.1007/s11276-022-03066-x.

3. QoS parameters to network performance metrics mapping for SLA monitoring / H. J. Lee, M. S. Kim, J. W. Hong, G. H. Lee. *KNOM Review.* 2002. Vol. 5, no. 2. P. 42–53.

4. Cello M., Marchese M., Mongelli M. On the qos estimation in an openflow network: The packet loss case. *IEEE Communications Letters*. 2016. Vol. 20, no. 3. P. 554–557.
5. Peterson L. L., Davie B. S. *Computer Networks: A Systems Approach* (The Morgan Kaufmann Series in Networking). 6th ed. Morgan Kaufmann, 2021. 848 p.
6. Svyrydov A., Kovalenko A., Kuchuk H. The pass-through capacity redevelopment method of net critical section based on improvement ON/OFF models of traffic. *Advanced Information Systems*. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 139–144. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.2.24.
7. An intelligent traffic load prediction-based adaptive channel assignment algorithm in SDN-IoT: A deep learning approach / F. Tang, Z. M. Fadlullah, B. Mao, N. Kato. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5, iss. 6. P. 5141–5154. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2838574.
8. Turkey A. A., Mitschele-Thiel A. Use of load prediction mechanism for dynamic routing optimization. *2009 IEEE Symposium on Computers and Communications*. Sousse, Tunisia, 2009. P. 782–786. DOI: 10.1109/ISCC.2009.5202245.
9. Choi S., Yeung D.-Y. Predictive Q-routing: A memory-based reinforcement learning approach to adaptive traffic control. *Advances in Neural Information Processing Systems* / D. Touretzky, M. C. Mozer, and M. Hasselmo (Eds). MIT Press, 1995. Vol. 8. P. 945–951. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/1995/file/4e2545f819e67f0615003dd7e04a6087-Paper.pdf>.
10. Molnar S., Terdik G. A general fractal model of Internet traffic. *Proceedings LCN 2001. 26th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks*. Tampa, FL, USA, 2001. P. 492–499. DOI: 10.1109/LCN.2001.990828.
11. Self-similar and fractal nature of Internet traffic / D. Chakraborty, A. Ashir, T. Suganuma et al. *Network Management*. 2004. Vol. 14, no. 2. P. 119–129. DOI: 10.1002/nem.512.

12. On the self-similar nature of Ethernet traffic / W. E. Leland, W. Willinger, M. S. Taqqu, D. V. Wilson. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* Jan. 1995. Vol. 25, no. 1. P. 202–213. DOI: 10.1145/205447.205464.
13. Computer networks performance modeling and simulation / F. J. Suárez, P. Nuño, J. C. Granda, D. F. García. *Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems*, Morgan Kaufmann. / M. S. Obaidat, P. Nicopolitidis, F. Zarai (Eds). 2015. P. 187–223. ISBN: 9780128008874. DOI: 10.1016/B978-0-12-800887-4.00007-9.
14. Network modelling and computation of quickest path for service-level agreements using bi-objective optimization / A. Sharma, R. Kumar, M. W. A. Talib et al. *International journal of distributed sensor networks*. 2019. Vol. 15, no. 10. DOI: 10.1177/1550147719881116.
15. Barabási A.-L., Pósfai M. *Network Science*. 1st ed. Cambridge University Press, 2016. 475 p. URL: <http://networksciencebook.com/>.
16. Willinger W., Taqqu M. S., Wilson D. V. Lessons from on the self-similar nature of ethernet traffic. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2019. Vol. 49, no. 5. P. 56-62. DOI: 10.1145/3371934.3371955.
17. Deviation Multifractal Analysis of a Process Modeling TCP CUBIC / K. Simon, S. Molnár, J. Komjathy et al. *arXiv: Probability*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1705.11039.
18. Кучук Г. А., Можаяев О. О., Воробйов О. В. Аналіз та моделі самоподібного трафіка. *Авіаційно-космічна техніка і технології*. 2006. Вип. 35, № 9. С. 173–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35.
19. Ідентифікація та прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж для систем виявлення атак / В. Корнієнко, О. Герасіна, Д. Тимофєєв та ін. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022. № 1. С. 20–29. DOI: 10.32782/IT/2022-1-4.
20. Балансування самоподібного трафіку в мережних системах виявлення вторгнень / Т. А. Радівілова, Л. О. Кіріченко, М. Х. Тавалбех та ін.

Кибербезпека: освіта, наука, техніка: електр. фахове наук. вид. 2020. Т. 3, № 7. С. 17–30. DOI: 10.28925/2663-4023.2020.7.1730.

21. A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method / H. Drieieva, O. Drieiev, Ye. Meleshko et al. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*: CEUR-WS, Gliwice, Poland / Vasyl Lytvyn, (Ed.). 2022. Vol. 3154. P. 1694–1707. (ISSN 1613-0073). DOI: 10.5281/zenodo.7892006. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>.

22. Method of fractal traffic generation by a model of generator on the graph / H. Drieieva, O. Smirnov, O. Drieiev et al. *Control, Optimisation and Analytical Processing of Social Networks*: CEUR-WS, Lviv, Ukraine / Solomiia Fedushko, Thierry Oscar Edoh (Eds). 2020. Vol. 2616. P. 3–379. (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2616/paper31.pdf>.

23. Managing multifractal properties of the binary sequence generated with the Markov chains / H. Drieieva, O. Smirnov, O. Drieiev et al. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*: CEUR-WS, Zaporizhzhia, Ukraine / Sergey Subbotin (Ed.). 2020. Vol. 2608. P. 633–645. (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper49.pdf>.

24. Multifractal properties of traffic generator based on Markov chains / V. Simakhin, S. Bondar, H. Drieieva et al. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*: Proc. of the International Workshop (Lviv, Ukraine, Nov. 29, 2019) / Solomiia Fedushko (Ed.). 2019. Vol. 2588. P. 567–579. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2588/paper48.pdf>.

25. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова / Г. М. Дреєва, О. М. Дреєв, Є. В. Мелешко, І. В. Миронець. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. № 4. С. 58–66. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2022.269137. URL: <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/269137>.

26. Computer simulation model of a computer network with fractal traffic for testing routing algorithms / H. Drieieva, Ye. Meleshko, O. Drieiev, V. Mikhav. *Advanced Information Systems*. 2022. No. 6 (4). P. 11–18. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/268306>. DOI: 10.20998/2522-9052.2022.4.02.

27. Meleshko Ye., Drieiev O., Drieieva H. Method of identification bot profiles based on neural networks in recommendation systems. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 24–28. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05.

28. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Метод генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Т. 1, № 32. С. 173-183. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/32/32_Hanna.html. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).173-183.

29. Фрактальний аналіз генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова / Г. М. Дреєва, О. А. Смірнов, О. М. Дреєв, Т. В. Смірнова. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 2 (33). С. 161–172. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.2(33).161-172. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/33/33_Drieieva.html.

30. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Денисенко О. О. Визначення фрактальної розмірності числової послідовності за розподілом ймовірності значень її елементів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2018. Вип. 31. С. 119–128. DOI: 10.32515/2409-9392.2018.31.119-128. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/eng/archive/31/31_Dreyeva.html.

31. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Метод генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та*

інформаційні технології: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2019. С. 123–139.

32. Дреєва Г. М., Смірнов С. А. Дослідження мультифрактальних властивостей генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова *Кібербезпека та інформаційні технології*: монографія. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 93–105.

33. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Миронець І. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією фракталоподібного трафіку. *Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій (ІПШРІТ-2022)*: зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., (Черкаси, 9 груд. 2022 р.) / упоряд.: Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 53–54.

34. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Міхав В. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., (Кропивницький, 10–11 листоп. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2022. С. 44–45.

35. Дослідження якості роботи методу визначення фрактальної розмірності мережевого трафіку за його ймовірнісними властивостями / Г. М. Дреєва, О. М. Дреєв, Є. В. Мелешко та ін. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: тези доп. 12-ї Міжнар. наук.-техн. конф., (Баку–Харків–Жиліна, 27–28 квіт. 2022 р.) / уклад. В. В. Косенко. Харків: ФОП Петров В.В., 2022. Т. 1. С. 126.

36. Дреєва Г. М., Смірнов С. А., Коноплицька-Слободенюк О. К. Дослідження генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова та його мультифрактальних властивостей. *Інформаційна безпека та*

інформаційні технології: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 35.

37. Методи визначення ботів серед користувачів соціальних мереж / Є. В. Мелешко, Г. М. Дреєва, В. С. Гермак та ін. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 44.

38. Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Розробка методу імітаційного моделювання мережевого трафіку з фрактальними властивостями. *Цифрова трансформація суспільства*: зб. тез доп. I Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 21–22 квіт. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 100.

39. Дослідження вразливостей рекомендаційних систем соціальних мереж / Є. Мелешко, О. Дреєв, М. Якименко, Г. Дреєва. *Інформація, комунікація, суспільство ICS-2021*: матеріали X Міжнар. наук. конф., (Львів, 20–22 трав. 2021 р.) / уклад. О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2021. С. 41–42.

40. Мелешко Є. В., Дреєв О. М., Дреєва Г. М. Розробка методу ідентифікації ботів у рекомендаційних системах. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., (Чернігів, 29–30 квіт. 2020 р.): у 2 т. / уклад. А. М. Єрошенко. Чернігів: ЧНТУ, 2020. Т. 2. С. 165–166.

41. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Метод кластеризації користувачів соціальної мережі на основі нейронних мереж. *Комбінаторні конфігурації та їх застосування*: зб. тез XXII Міжнар. наук.-практ. семінару

імені А. Я. Петренюка, (Запоріжжя–Кропивницький, 15–16 трав. 2020 р.) / за ред. Г. П. Донця. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2020. С. 87–90.

42. Методи моделювання складних мереж / Є. Мелешко, Г. Дреєва, М. Якименко, В. Хох. *Інформація. Комунікація. Суспільство*: матеріали ІХ Міжнар. наук. конф., (Львів, 21–23 трав. 2020 р.) / уклад. А. М. Пелешин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2020. С. 29–30.

43. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дезінформаційні атаки на рекомендаційні системи. *Безпека в сучасному світі*: зб. тез Міжнар. наук. конф., (Дніпро, 27–28 верес. 2019 р.) / ред. О. Ю. Висоцький. Дніпро: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2019. С. 51–53.

44. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Реалізація генератора фрактального трафіку в системах імітаційного лювання. *Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2019*: матеріали ХХVII Міжнар. наук.-практ. конф.: у 4 ч., (Харків, 15–17 трав. 2019 р.) / ред. Є. І. Сокол. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Ч. 4. С. 146.

45. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., (Харків, 24–25 квіт. 2019 р.) / ред. С. П. Євсєєв. Харків: ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2019. С. 27.

46. Drieieva H., Smyrnov O., Drieiev O. Method of generating fractal traffic for conducting numerical experiments on simulating load in a computer network. *Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives (MIMCS 2019)*: Materials of the 1st Int. Sci.-Pract. Conf., (Baku, Azerbaijan, 01–02 July 2019) / Azerbaijan State Oil and Industry University (ASOIU). Baku: ASOIU, 2019. P. 32–33.

47. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дослідження проблем сучасних рекомендаційних систем. *Інформація, комунікація, суспільство 2018*: зб. тез 7-ї Міжнар. наук. конф. ІКС-2018, (Чинадієво, Україна, 17–19 трав. 2018 р.) /

уклад. А. М. Пелещин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. С. 31–32.

48. Tensor based load balancing under self-similar traffic properties with guaranteed QoS / O. Lemeshko, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, A. M. Hailan. *2020 IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv–Slavske, Ukraine, 2020. P. 293–297. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235442. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9088592>.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ І МАРШРУТИЗАЦІЇ МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ ТА МЕТОДІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

У цьому розділі проведено дослідження та порівняльний аналіз методів та протоколів маршрутизації, а також методів аналізу і симуляції мережевого трафіку та методів моделювання комп'ютерних мереж для тестування алгоритмів маршрутизації. Досліджено параметри якості обслуговування комп'ютерних мереж. Сформовано цілі та задачі дисертаційного дослідження.

Чим більша та складніша комп'ютерна мережа, тим більше вимог висувається до алгоритмів маршрутизації для того, щоб вони могли забезпечити потрібну якість обслуговування. Тому методи аналізу, моделювання, прогнозування та адаптивної маршрутизації трафіку стають все важливішими та потребують вдосконалення та розвитку.

1.1. Дослідження методів та протоколів маршрутизації трафіку

Маршрутизація – це процес визначення оптимальних маршрутів передачі мережевих пакетів інформації між маршрутизаторами, що з'єднують різні комп'ютерні мережі [1, 2]. Кожен маршрутизатор вирішує, куди пересилати пакети на основі таблиці маршрутизації.

Таблиця маршрутизації містить список правил, кожне правило у списку описує шлюз або інтерфейс, який використовується маршрутизатором для доступу до певної комп'ютерної мережі. Маршрути можуть бути вказані адміністратором, тоді використовуються *статичні алгоритми маршрутизації*, або розраховані за допомогою алгоритмів пошуку найкоротшого шляху, на основі інформації про топологію і стан мережі, отриманої за допомогою протоколів маршрутизації – *динамічні алгоритми*

маршрутизації. Динамічні алгоритми маршрутизації [3] змінюють свої таблиці маршрутизації залежно від змін у мережі. Підмножиною динамічних алгоритмів є *адаптивні алгоритми маршрутизації* – вони враховують стан каналів зв'язку (наприклад, завантаження мережевих пристроїв чи поточну затримку при передачі даних) під час вибору найкращих маршрутів [5]. Не всі динамічні алгоритми маршрутизації є адаптивними, наприклад, алгоритм маршрутизації flooding для децентралізованих однорангових мереж є динамічним, але не адаптивним [3]. Алгоритми маршрутизації для клієнт-серверних мереж, такі як OSPF, EIGRP, BGP [1, 3, 5, 7, 8] мають функції, за допомогою яких можна робити їх адаптивними з використанням різних методів, наприклад, в алгоритмі OSPF відбувається збір статистики трафіку, що проходить через маршрутизатор; це робить можливим використання різних методів аналізу трафіку та прогнозування завантаженості пристрою для врахування цього при пошуку оптимальних маршрутів. В той же час, наприклад, алгоритми RIP, IGRP [8] не мають інструментів для надання їм адаптивності.

Алгоритми маршрутизації також класифікують на основі мереж, які вони обслуговують. Алгоритми для *централізованих* та для *децентралізованих мереж* дуже відрізняються між собою. Також алгоритми маршрутизації можуть бути *внутрішньодоменні* та *міждоменні*. Внутрішньодоменні та міждоменні алгоритми маршрутизації – це ті, що застосовуються в різних областях мережі, які називають доменами. Домен – це група маршрутизаторів, які знаходяться під одним адміністративним контролем і використовують один і той самий протокол маршрутизації [7]. Внутрішньодоменні алгоритми маршрутизації працюють в межах одного домену та забезпечують оптимальний шлях між маршрутизаторами всередині домену. Міждоменні алгоритми маршрутизації працюють між різними доменами і забезпечують оптимальний шлях передачі даних між пристроями з різних доменів. Приклади внутрішньодоменних алгоритмів – RIP, OSPF, IS-IS. Приклади міждоменних алгоритмів маршрутизації – BGP, EGP, IS-IS.

Тож, алгоритми маршрутизації можна поділити на:

- статичні та динамічні;
- адаптивні та неадаптивні;
- внутрішньодоменні та міждоменні;
- для клієнт-серверних та однорангових мереж.

У цій роботі розглядаються динамічні адаптивні алгоритми маршрутизації для клієнт-серверних мереж переважно для внутрішньодоменового обміну трафіком, хоча запропоновані у роботі моделі та методи можна адаптувати також для міждоменового обміну трафіком.

Протокол маршрутизації – мережевий протокол, що використовується маршрутизаторами для визначення можливих маршрутів прямування даних у складній великій комп'ютерній мережі [1, 2]. Протоколи маршрутизації поділяються на два види, що залежать від типів алгоритмів, на яких вони засновані [1-3]: дистанційно-векторні протоколи Distance Vector Algorithm (DVA) та Протоколи стану каналів зв'язку Link State Algorithm (LSA). Приклади дистанційно-векторних протоколів: RIP – Routing Information Protocol; IGRP – Interior Gateway Routing Protocol (ліцензований протокол Cisco Systems); BGP – Border GateWay Protocol; AODV. Приклади протоколів стану каналів зв'язку: IS-IS – Intermediate System to Intermediate System (стек OSI); OSPF – Open Shortest Path First; NLSP - NetWare Link-Services Protocol (стек Novell) [1]; HSRP та CARP – протоколи резервування шлюзу в Ethernet-мережах. OLSR. TBRPF. Алгоритми вектора відстані (Distance Vector Protocol) (відомі також як алгоритми Белмана-Форда) вимагають від кожного маршрутизатора пересилання всієї або частини своєї маршрутної таблиці, але тільки своїм сусідам. Дистанційно-векторні алгоритми добре працюють лише у невеликих мережах. У великих мережах вони засмічують лінії зв'язку інтенсивним службовим періодичним трафіком. У великих мережах використовуються алгоритми стану каналів. Вони направляють тільки невеликі коригування всім вузлам мережі і не засмічують службовими повідомленнями канали зв'язку. Метрики, що використовуються

в алгоритмах маршрутизації для пошуку найкоротшого шляху пересилання IP-паketу: довжина маршруту, надійність, затримка, пропускна здатність, навантаження, вартість зв'язку [4].

Чим більша та складніша комп'ютерна мережа, тим більше вимог висувається до алгоритмів маршрутизації для того, щоб вони могли забезпечити потрібну якість обслуговування [18]. При дослідженні, удосконаленні та розробці алгоритмів маршрутизації важливим є їх тестування. Для тестування алгоритмів маршрутизації повинна бути наявність комп'ютерна мережа заданої складності або програмна імітаційна модель. Обидва варіанти мають свої плюси та мінуси, але можна сміливо зауважити, що на початкових етапах розробки якісна програмна імітаційна модель значно здешевлює та прискорює процес розробки, а фінальні експерименти перед практичним впровадженням доцільно проводити уже на реальних комп'ютерних мережах [23].

Властивістю адаптивності можуть володіти алгоритми стану каналу зв'язку, тож розглянемо їх детальніше на прикладі алгоритму OSPF.

Алгоритми стану зв'язків для маршрутизації трафіку

Алгоритми стану каналу зв'язку (Link State Algorithms, LSA) забезпечують кожен маршрутизатор інформацією, достатньою для побудови точного графу мережі [1-3]. Усі маршрутизатори працюють виходячи з однакових графів, що робить процес маршрутизації стійкішим до змін конфігурації. «Широкомовна» розсилка (тобто передача пакета всім безпосереднім сусідам маршрутизатора) має місце лише при змінах стану зв'язків, що відбувається в надійних мережах не так часто. Вершинами графу є як маршрутизатори, так і об'єднані ними комп'ютерні мережі. Службова інформація, що розповсюджується по мережі, складається з опису зв'язків різних типів: маршрутизатор-маршрутизатор, маршрутизатор-мережа.

Щоб зрозуміти, у якому стані перебувають лінії зв'язку, підключені до його портів, маршрутизатор періодично обмінюється короткими пакетами HELLO зі своїми найближчими сусідами. Оголошення про стан зв'язків не

повторюються періодично, як у протоколів DVA, а передаються лише в тому випадку, коли за допомогою службових повідомлень HELLO було встановлено зміну стану зв'язку. У результаті службовий трафік, створюваний протоколами LSA, набагато менш інтенсивний, ніж у протоколів DVA. Протоколами, заснованими на алгоритмі стану зв'язків, є протоколи IS-IS (Intermediate System to Intermediate System) стека OSI, OSPF (Open Shortest Path First стека TCP/IP та протокол NLSP стека Novell [2-4].

Алгоритми стану каналу (Link State Protocol) (відомі також як алгоритми «першочерговості найкоротшого маршруту», засновані на алгоритмі Дейкстри) направляють потоки маршрутної інформації в усі вузли об'єднаної мережі. Кожен маршрутизатор посилає лише частину маршрутної таблиці, яка визначає стан його власних каналів.

Протокол стану зв'язків OSPF

Протокол OSPF (Open Shortest Path First, відкритий протокол «Короткий шлях першим») є достатньо сучасною та дуже популярною реалізацією алгоритму стану зв'язків і має багато особливостей, орієнтованих на застосування у великих гетерогенних комп'ютерних мережах [4-9].

Етапи побудови таблиці маршрутизації у OSPF

У OSPF процес створення таблиці маршрутизації має два етапи:

1. Під час *першого етапу* кожен маршрутизатор використовує отриману від сусідів інформацію про граф зв'язків комп'ютерної мережі, щоб побудувати свій власний граф зв'язків комп'ютерної мережі. У цьому графі вершинами є маршрутизатори та IP-мережі, а вузлами – інтерфейси маршрутизаторів. Під час цього процесу маршрутизатори обмінюються повідомленнями про зв'язки між ними. Це повідомлення називається «оголошення зв'язків маршрутизатора» (router links advertisement), і воно містить інформацію про топологію мережі. Цей процес схожий на процес поширення векторів відстаней до комп'ютерних мереж у протоколі маршрутизації RIP, але він передає топологічну інформацію у незмінному вигляді без її модифікації. Після цього усі маршрутизатори в мережі мають

ідентичну інформацію про топологію мережі, яку зберігають у своїй топологічній базі даних.

2. *Другий етап* процесу OSPF полягає в знаходженні найоптимальніших маршрутів від кожного маршрутизатора до відомих йому мереж. Кожен маршрутизатор у цьому алгоритмі вважає себе центром комп'ютерної мережі і шукає найкоротший шлях до кожної іншої мережі. Оптимальний маршрут запам'ятовується з одним наступним кроком – до наступного маршрутизатора відповідно на основі принципу однокрокової маршрутизації, і ці дані зберігаються в таблиці маршрутизації. Задача знаходження найкоротшого шляху передачі даних у комп'ютерній мережі може бути складною і потребувати значних ресурсів. У протоколі OSPF для вирішення цього використовується ітеративний алгоритм Дейкстри. Якщо кілька маршрутів мають однакову метрику до мережі призначення, то таблиця маршрутизації зберігає перші кроки всіх таких маршрутів.

Маршрутні оголошення HELLO у алгоритмі OSPF

Після встановлення таблиці маршрутизації мережа потребує постійного контролю та коригування. На відміну від RIP-маршрутизаторів, OSPF-маршрутизатори не використовують повну таблицю маршрутизації для здійснення контролю стану зв'язків та сусідніх маршрутизаторів. Замість цього вони використовують короткі HELLO-повідомлення. Якщо стан комп'ютерної мережі не змінюється, маршрутизатори не займаються коригуванням таблиць маршрутизації та не надсилають оголошення про зв'язки. У разі зміни стану зв'язку маршрутизатор надсилає оголошення тільки про зміну цього зв'язку. Маршрутизатор перебудовує граф мережі та шукає оптимальні маршрути, коригує таблицю маршрутизації та ретранслює оголошення кожному своєму найближчому сусідові, крім того, від якого отримав оголошення.

Завдяки новому з'єднанню або новому сусіду маршрутизатор дізнається про це через нові повідомлення HELLO. У цих повідомленнях вказується детальна інформація про маршрутизатор, який надіслав

повідомлення, а також про його найближчих сусідів, що дозволяє однозначно ідентифікувати цей маршрутизатор. Повідомлення HELLO відправляються кожні 10 секунд, щоб забезпечити швидку адаптацію маршрутизаторів до змін, які відбуваються в мережі. Малий розмір цих повідомлень дозволяє проводити часті перевірки стану сусідів та їх зв'язків.

Оскільки маршрутизатори є одними з вершин графа, вони обов'язково повинні мати ідентифікатори.

Метрики та оголошення алгоритму OSPF

Протокол OSPF зазвичай використовує метрику, яка враховує пропускну здатність мережі. Також можливе використання двох інших метрик, які враховують вимоги до якості обслуговування в IP-пакеті, – затримки та надійності передачі пакетів мережею. Для кожної з метрик протокол OSPF будує окрему таблицю маршрутизації. Вибір необхідної таблиці здійснюється в залежності від вимог до якості обслуговування пакету, що прийшов.

Маршрутизатори з'єднані як з локальними комп'ютерними мережами, так і безпосередньо один з одним глобальними каналами типу «точка-точка».

Протокол OSPF у своїх оголошеннях поширює інформацію про зв'язки двох типів: маршрутизатор-маршрутизатор та маршрутизатор-мережа. Якщо каналам «точка-точка» дати IP-адреси, вони стануть додатковими вершинами графа, як і локальні мережі. Разом з IP-адресою мережі передається також інформація про маску мережі.

Після ініціалізації OSPF-маршрутизаторам відомі лише зв'язки з безпосередньо підключеними мережами, як і RIP-маршрутизаторам. Після ініціалізації вони починають розповсюджувати цю інформацію своїм сусідам та одночасно надсилають повідомлення HELLO на всі свої інтерфейси, щоб майже відразу кожен маршрутизатор дізнався ідентифікатори своїх найближчих сусідів. Це поповнює їх топологічну базу новою інформацією, яку вони дізнаються безпосередньо. Далі топологічна інформація починає

поширюватися по комп'ютерній мережі від сусіда до сусіда і через деякий час досягає найвіддаленіших маршрутизаторів [7].

Кожен зв'язок мережі OSPF має свою метрику, яка відображає його характеристики. Протокол OSPF використовує стандартні значення відстаней для метрики, які є загальними для багатьох протоколів (наприклад, для протоколу Spanning Tree) і відображають продуктивність мережевих зв'язків. Наприклад, Ethernet має метрику 10 одиниць, Fast Ethernet - 1 одиниця, канал T1 - 65 одиниць, канал 56 кбіт/с - 1785 одиниць та інші.

При виборі оптимального шляху на графі комп'ютерної мережі з кожним вузлом графа пов'язана метрика, яка додається до шляху, якщо це вузол до нього входить.

Протокол OSPF дозволяє зберігати в таблиці маршрутизації кілька маршрутів до однієї комп'ютерної мережі, якщо вони мають однакові значення метрики. Якщо такі записи з'являються в таблиці маршрутизації, маршрутизатор вмикає режим балансування навантаження (load balancing), що дозволяє пакетам поперемінно використовувати кожен з цих маршрутів [7].

Стабільність OSPF

Кожен запис у топологічній базі даних має свій термін дії. Для контролю часу життя записів використовується таймер, пов'язаний із кожним записом зв'язків. Якщо запис топологічної бази, отриманий від іншого маршрутизатора, застарів, то маршрутизатор може запитати нову копію цього запису за допомогою повідомлення Link-State Request алгоритму OSPF. Якщо запит прийшов до маршрутизатора, який має актуальну копію запису, то він надсилає відповідь у вигляді повідомлення Link-State Update.

Для того, щоб забезпечити ініціалізацію маршрутизаторів та більш надійну синхронізацію топологічних баз, маршрутизатори час від часу обмінюються всіма своїми записами таблиці маршрутизації. Проте цей період значно більший, ніж у RIP-маршрутизаторів.

Так як інформація про стан зв'язку між маршрутизаторами в протоколі OSPF генерується тільки маршрутизаторами, які перевіряють цей зв'язок за допомогою повідомлень HELLO, недостовірна інформація про досяжність мереж, яка може з'явитися в RIP-маршрутизаторах, не може з'явитися в OSPF-маршрутизаторах. Крім того, застаріла інформація швидко замінюється на нову, оскільки при зміні стану зв'язку нове повідомлення генерується відразу.

Мережі OSPF можуть періодично нестабільно працювати через різні фактори, такі як, наприклад, відмова зв'язку. У цьому випадку інформація про відмову може не досягти жодного маршрутизатора, але зазвичай такий стан триває недовго. Маршрутизатор продовжує відправляти пакети до мережі призначення, припускаючи, що зв'язок все ще працює. Незважаючи на те, що ці періоди неправильної роботи можуть тривати недовго, пакети не застрягають в маршрутних петлях, а просто відкидаються, якщо не можуть бути передані через непрацездатний зв'язок.

До недоліків протоколу OSPF можна віднести його обчислювальну складність, яка ще й швидко зростає зі збільшенням розмірності комп'ютерної мережі, тобто кількості підмереж, маршрутизаторів та зв'язків між ними. Для подолання цього недоліку для OSPF вводиться поняття області мережі (area), яку не слід плутати з автономною системою Інтернету. Маршрутизатори, що належать до певної області, будують граф зв'язків тільки для цієї області, що скорочує розмірність мережі. Між різними областями інформація про зв'язки не передається, а крайові для областей маршрутизатори обмінюються лише інформацією про адреси підмереж, що є в кожній з областей, та відстанню від крайового маршрутизатора до кожної комп'ютерної мережі. При передачі пакетів між такими областями в OSPF використовується метод вибору одного з крайових маршрутизаторів області, який має найменшу відстань до потрібної підмережі. Цей підхід дещо схожий на протокол RIP, але він є більш стабільним завдяки забороні петлеподібних зв'язків між областями. При передачі адрес в іншу область

OSPF-маршрутизатори групують декілька адрес в одну, якщо вони мають загальний префікс.

Quality of Service (QoS) – технологія надання різним класам трафіку різних пріоритетів в обслуговуванні для забезпечення заданої якості обслуговування. Будь-яка пріоритезація має сенс лише в тому випадку, коли виникає черга на обслуговування. Саме там, у черзі, IP-пакети можуть обслуговуватися за пріоритетністю, і першим пройде той, що має найвищий пріоритет. Черга утворюється там, де «вузько» (зазвичай такі місця називаються «пляшковою шийкою», *bottle-neck*). QoS – не панацея, якщо «шийка» надто вузька, то часто переповнюється фізичний буфер інтерфейсу, куди поміщаються всі пакети, які збираються вийти через цей інтерфейс. І тоді нові пакети будуть знищені, навіть якщо вони надпотрібні. Тому, якщо черга на інтерфейсі в середньому перевищує 20% від свого максимального розміру (на маршрутизаторах CISCO максимальний розмір черги становить, як правило, 128-256 пакетів [2, 3]), тож є суттєвий привід замислитися над дизайном мережі.

1.2. Дослідження методів адаптивної маршрутизації та прогнозування завантаженості комп'ютерних мереж

Адаптивна маршрутизація передбачає врахування завантаженості маршрутизаторів у мережі та необхідність перерозподілу трафіку при його передачі на менш завантажені пристрої [1-9, 85]. Існують різні методи адаптивної маршрутизації; більшість із яких базується на аналізі поточної статистики отриманого трафіку на кожному пристрої. Окрім поточного стану маршрутизаторів варто враховувати їх прогнозований стан. Для прогнозування можна використовувати будь-які методи прогнозування часових рядів, питання тільки в тому, наскільки якісно вони будуть прогнозувати стан каналу зв'язку для комп'ютерних мереж із різними типами трафіку [3, 13]. А оскільки мережевий трафік має свої певні властивості та

особливості і може бути різних типів та з різними варіаціями властивостей, то доцільно дослідити можливість та ефективність застосування різних методів прогнозування часових рядів [10, 72-83] для прогнозування завантаженості маршрутизаторів трафіку.

Узагальнюючи підходи до створення методів адаптивної маршрутизації можна запропонувати наступну їх класифікацію, рис. 1.1.



Рис. 1.1. Підходи до створення методів адаптивної маршрутизації

Мережевий трафік можна представити у вигляді часового ряду [16]. Тоді прогнозування трендів у трафіку, а отже – і завантаженості мережевих пристроїв можна здійснювати на основі аналізу та прогнозування часових рядів.

Методи прогнозування часових рядів можна загалом приблизно розділити на такі категорії [10-13, 72-83]:

- Класичні статистичні методи, наприклад, ковзні середні, експоненціальне згладжування, ARIMA, SARIMA.
- Машинне навчання, наприклад, лінійна регресія, XGBoost, випадковий ліс або будь-яка модель машинного навчання із методами редукції, нейронні мережі та глибоке навчання, наприклад, моделі RNN, LSTM.
- Фрактальний аналіз, наприклад, R/S-аналіз.

Статистичні моделі прогнозування часових рядів

Коли мова заходить про прогнозування часових рядів за допомогою статистичних моделей, існує чимало популярних і широкозастосовуваних методів. Кожен із них має різні математичні модальності, і вони мають різний набір припущень, які повинні бути витримані.

Метод ковзного середнього

Цей метод використовується для короткострокового прогнозування. Метод ковзних середніх дуже суб'єктивний і залежить від довжини періоду L , обраного для обчислення середніх значень [10]. Щоб виключити циклічні коливання, довжина періоду має бути цілим числом, кратним середній довжині циклу. Ковзні середні для вибраного періоду, що має довжину L , утворюють послідовність середніх значень, обчислених для послідовностей довжини L .

Основними методами прогнозування, заснованими на ковзних середніх, є: просте експоненційне згладжування, зважене ковзне середнє, модель Хольта, модель Хольта-Уінтерса тощо.

Застосовуючи ковзне середнє (просте або зважене) для вирівнювання часового ряду, значення рівня у середині інтервалу усереднення замінюють на його середнє значення. При цьому коефіцієнти для ковзного середнього обчислюються з умови мінімізації суми квадратів відхилень рівнів від значень полінома, який вибирається:

$$y_t = a_0 + a_1 t + \dots + a_p t^p. \quad (1.1)$$

Значення середньої y_t виражається через:

$$y_{t+j}, j \in [-k; k] \quad (1.2)$$

за формулою:

$$\bar{y}_t = \sum_{j=-k}^k a_j y_{t+j}, \quad (1.3)$$

де $a_j = a_{-j}$, $t = 0, 1, 2 \dots n$.

Це значення можна сприйняти як прогноз рівня y_t у момент t . При цьому в припущенні, що y_t є випадковими некорельованими величинами з дисперсією:

$$\text{var}(y_t) = \sigma^2 \quad (1.4)$$

можна оцінити дисперсію, а потім оцінити помилку із заданим рівнем довіри:

$$\text{var}(\bar{y}_t) = \sigma^2 \sum_{j=-k}^k a_j^2. \quad (1.5)$$

З цього прикладу видно, що дисперсія усередненого значення, а отже, помилка відновленого значення, швидко зростає зі збільшенням відхилення від центру усереднення. Попри це, правомірно використовувати одержуваний поліном для прогнозування, тобто, отримання прогнозних значень рівнів моментів часу $j=k+1, k+2, \dots$. Якщо взяти центр інтервалу згладжування в точці $t=n+k$, то отримаємо прогнозні значення рівнів поза інтервалом спостережень, тобто $\bar{y}_{n+1}, \bar{y}_{n+2}, \dots$.

Для оцінки дисперсії прогнозного значення рівні повинні бути випадковими незалежними величинами з постійною дисперсією.

ARIMA

ARIMA є одним із найпопулярніших класичних методів прогнозування часових рядів. Розшифровується як авторегресійне інтегроване ковзне середнє та є типом моделі, яка прогнозує часові ряди на основі своїх власних минулих значень, тобто власних лагів і помилок прогнозу з лагом [10, 74]. ARIMA складається з трьох компонентів:

1. Авторегресія (AR): відноситься до моделі, яка показує мінливу змінну, що регресує за своїми лаговими або попередніми значеннями.

2. Інтегрований (I): представляє різницю необроблених спостережень, щоб часовий ряд став стаціонарним (тобто значення даних замінюються різницею між значеннями даних і попередніми значеннями).

3. Ковзне середнє (MA): включає в себе залежність між спостереженням і залишковою помилкою від моделі ковзного середнього, застосованої до спостережень із запізненням.

Частина «AR» вказує на те, що змінна, яка цікавить, регресує на основі її власних попередніх спостережених значень. Частина «MA» вказує на те, що помилка регресії насправді є лінійною комбінацією умов помилки, значення яких мали місце одночасно та в різний час у минулому. «I» вказує на те, що значення даних було замінено на різницю між їхніми поточними та попередніми значеннями (і цей процес міг виконуватися більше одного разу). Мета кожної з цих функцій полягає в тому, щоб модель якомога краще відповідала даним.

SARIMA

Розширення ARIMA, яке підтримує пряме моделювання сезонного (довгострокового циклічного) компонента ряду, називається SARIMA [10]. Проблема моделі ARIMA полягає в тому, що вона не підтримує сезонні дані. Це часовий ряд із повторюваним циклом. ARIMA очікує даних, які або не є сезонними, або містять сезонний компонент, наприклад, сезонно скориговані за допомогою таких методів, як сезонна різниця. SARIMA додає три нові гіперпараметри для визначення авторегресії (AR), різниці (I) і ковзного середнього (MA) для сезонного компонента ряду.

Експоненційне згладжування

Експоненційне згладжування – це метод прогнозування часових рядів для одновимірних даних [10]. Його можна розширити для підтримки даних із тенденцією або сезонним компонентом. Також можна використовувати як альтернативу популярному сімейству моделей ARIMA.

Експоненційне згладжування даних часових рядів визначає, як саме експоненційно зменшуються ваги від найновіших до найдавніших спостережень. Чим старіші дані, тим менша вага їм надається, тоді як новішим даним надається більша вага. Бувають різні методи експоненційного згладжування.

Просте (одиначне) експоненційне згладжування використовує зважене ковзне середнє з експоненційно зменшуваними вагами.

Експоненційне згладжування Холта зазвичай більш надійне для обробки даних, які показують тенденції.

Потрійне експоненційне згладжування (також зване мультиплікативним – Холта-Вінтерса) є більш надійним для параболічних трендів або даних, які показують тенденції та сезонність.

Просте експоненційне згладжування

Метод експоненційного згладжування є широко використовуваним для прогнозування багатьох часових рядів. Цей метод був незалежно відкритий Броуном та Холтом. Проста та інтуїтивно зрозуміла модель часового ряду має наступний вигляд:

$$x_t = b + \varepsilon_t, \quad (1.6)$$

де b – константа; ε_t – значення випадкової помилки.

Константа b є стійкою на кожному періоді часу, але з часом може повільно змінюватися. Щоб виділити цю константу, один із інтуїтивно зрозумілих способів – використовувати згладжування ковзним середнім, де більше значення приділяється останнім спостереженням, але інші спостереження також беруться до уваги з експоненційно зменшеною вагою. Саме на таких принципах побудовано просте експонентне згладжування, але воно враховує всі попередні спостереження, а не тільки ті, що потрапили в певне вікно, як у згладжуванні ковзного середнього. Формула простого експоненційного згладжування має наступний вигляд:

$$s_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)s_{t-1}. \quad (1.7)$$

При застосуванні цієї формули рекурсивно кожне нове згладжене значення (яке є також прогнозом) обчислюється як середнє зважене поточного спостереження та згладженого ряду. Відомо, що результат згладжування залежить від значення параметра α . Якщо $\alpha = 1$, попередні спостереження повністю ігноруються. Якщо $\alpha = 0$, ігноруються поточні спостереження. Значення параметра від 0 до 1 дають проміжні результати.

Припущенням цього методу є те, що математичне очікування помилки дорівнює нулю.

Машинне навчання для прогнозування часових рядів

Машинне навчання є альтернативним способом прогнозування даних часових рядів [58, 65, 78]. Наприклад, для прогнозування трафіку можна використати нейронні мережі, лінійну регресію, XGBoost, випадковий ліс або будь-яку модель машинного навчання із методами редукції.

Нейронні мережі та глибоке навчання, наприклад, моделі RNN, LSTM також можна застосовувати для прогнозування часових рядів мережевого трафіку, але вони потребують великої кількості обчислювальних ресурсів та високої складності розробки і потребують створення навчаючої вибірки та попереднього навчання.

Фрактальний аналіз для прогнозування часових рядів

Найперспективнішим видається фрактальний аналіз трафіку [41-44, 46, 47], наприклад, R/S-аналіз, так як він враховує існуючі фрактальні властивості реального трафіку, що робить прогноз більш точним [10-14, 80-83]. Метод R/S-аналізу для прогнозування трафіку складається з наступних етапів [11]:

Етап 1. Дано початковий часовий ряд мережевого трафіку S_t . Розраховується логарифмічне відношення:

$$N_t = \ln \frac{S_{t+a+n}}{S_{t-1+a+n}}. \quad (1.8)$$

Етап 2. Ряд N розділяється на A суміжних періодів довжиною n . Кожен період позначимо як I_a , де $a = 1, 2, \dots, A$. Для кожного I_a визначається середнє значення:

$$E(I_a) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n N_{t,a}. \quad (1.9)$$

Етап 3. Розраховується відхилення від середнього значення для кожного періоду I_a :

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - E(I_a)) \quad (1.10)$$

Етап 4. Розраховується розмах в межах кожного періоду:

$$R_{I_a} = \max(X_{k,a}) - \min(X_{k,a}). \quad (1.11)$$

Етап 5. Розраховується стандартне відхилення для кожного періоду I_a :

$$S_{I_a} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (N_{k,a} - E(I_a))^2}. \quad (1.12)$$

Етап 6. Кожен R_{I_a} ділиться на S_{I_a} . Далі розраховується середнє значення R/S :

$$R/S(n) = \frac{\sum_{a=1}^A R_{I_a} / S_{I_a}}{A}. \quad (1.13)$$

Етап 7. Збільшується n та етапи 2-6 повторюються доти, поки виконується умова $n \leq N/2$.

Етап 8. Будується графік залежності $\log(R/S(n))$ від $\log(n)$ і за допомогою методу найменших квадратів знаходиться регресія виду: $\log(R/S(n)) = H \cdot \log(n) + c$, де H – показник Херста.

Етап 9. Отриманий результат перевіряється на значущість. Для цього перевіряється гіпотеза про те, що часовий ряд мережевого трафіку є нормально розподілений. Якщо R/S є випадковими змінними, нормально розподіленими, тоді можна припустити, що H також розподілені нормально. Асимптотичною границею для незалежного процесу є показник Херста, рівний 0.5. Еніс і Ллойд [12], а також Петерс [11] запропонували використовувати такі очікувані показники R/S :

$$E(R/S(n)) = \frac{n-0.5}{n} \cdot \left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)^{-0.5} \cdot \sum_{r=1}^{n-1} \sqrt{\frac{n-r}{r}} \quad (1.14)$$

Для n спостережень необхідно знайти очікуваний показник Херста $E(H)$.

Етап 10. Розраховується очікувана дисперсія показника Херста за наступною формулою:

$$\text{Variance}(H) = \frac{1}{N} \quad (1.15)$$

де H – показник Херста; N – довжина часового ряду мережевого трафіку.

Етап 11. Перевіряється значущість отриманого коефіцієнта Херста шляхом оцінки кількості стандартних відхилень, на які H перевищує $E(H)$. Значущим вважається результат, при якому показник значущості по модулю більше 2.

Інтерпретація одержаних значень показника Херста може здійснюватися наступним чином [13]:

– $H = 0.5$ – певного тренду у мережевого трафіку немає, вважаємо його повністю випадковим.

– $H > 0.5$ – мережевий трафік характеризується персистентністю – має тенденцію до збереження тренду; чим більше число, тим більш проявлене збереження тренду.

– $H < 0.5$ – мережевий трафік характеризується антиперсистентністю – будь-яку тенденцію прагне змінити протилежна; чим менше число, тим більш проявлене прагнення до зміни тренду.

Прогнозування трафіку на основі фрактального аналізу є найбільш перспективним, оскільки фрактальна розмірність трафіку відображає його самоподібність і структуру на різних часових масштабах. Це дозволяє отримувати точніші прогнози для часових рядів трафіку, ніж традиційні методи, засновані на ковзному середньому та експоненційному згладжуванні. Також зазначене вимагає менше обчислювальних ресурсів та меншої складності розробки і не потребує процесу навчання при використанні нейронних мереж, які, безумовно, також можуть виявляти складні самоподібні структури у часових рядах. Більше того, фрактальний аналіз дозволяє генерувати фрактальний трафік з різними характеристиками, що може бути корисним для створення імітаційних моделей комп'ютерних

мереж та оцінки їхньої продуктивності. Зауважимо, що методи фрактального аналізу можуть бути застосовані для оптимізації маршрутизації та управління трафіком у комп'ютерних мережах. На жаль, R/S-аналіз хоча і не потребує великих обчислювальних ресурсів та попереднього навчання, як нейронні мережі, але є досить повільним, тож перспективною є розробка методів, що дозволяють швидше визначати показник Херста [40, 45, 47].

1.3. Дослідження методів симуляції трафіку та емпіричних підтверджень його фракталоподібності

Проведений аналіз публікацій [14-33] показав актуальність питання моделювання трафіку у комп'ютерних мережах. Зокрема в [15] була проведена оцінка часу затримки пакетів в умовах зв'язку при обслуговуванні трафіку складної структури на основі розробленої імітаційної моделі. Як критерій складності структури трафіку використовується коефіцієнт варіації інтервалу часу між черговими пакетами. Як моделі трафаретних конструкцій використовуються потоки, які мають Парето- і гіперекспоненційне розподілення широкого діапазону змін їхніх вхідних параметрів і рівня завантаження вузлового обладнання мережі зв'язку. В [16] 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 спеціальних моделей до всього різноманіття характеристик різних джерел мережевого навантаження і конфігурації мережі. Запропоновано застосування контекстних методів для побудови універсальної імітаційної моделі. Як основа для побудови універсальної імітаційної моделі обраний метод динамічного марківського моделювання. Проведена адаптація методу динамічного марківського моделювання для універсальної імітаційної моделі і розроблена методика його застосування. У роботі [17] сформульована математична модель мультисервісного каналу зв'язку на основі

експоненційної GERT-мережі. У працях [18-29] розглянуті питання генерації фрактального трафіку. У роботах [30-32] пропонується метод агрегування фрактального трафіку телекомунікаційних мереж, його прогнозування та аналіз. У роботі [33] представлено результати вибору оптимальної часової шкали при апроксимації максимуму в черзі для трафікового процесу, описуваного фрактальним броунівським рухом. Доведено ряд тверджень, що дозволяють провести аналіз обраних метрик точності, доведено оптимальність на обраній метриці експоненційних часових шкал. Досліджено асимптотичні характеристики побудованих експоненційних тимчасових шкал, показані переваги і недоліки пропонованого підходу при аналізі трафіку з довготривалою залежністю, доведено застосовність підходу для будь-якого кінцевого порога черги. Виходячи з аналізу останніх досліджень і публікацій, можемо зробити висновок, що питання моделювання трафіку та використання для цих цілей генераторів фракталоподібних послідовностей є актуальним. Відкритими є питання створення генератора фрактальних бінарних послідовностей на основі скінченного автомата.

Аналіз існуючих емпіричних досліджень щодо фракталоподібності мережевого трафіку

Сьогодні для математичного опису телекомунікаційних процесів та трафіку у комп'ютерних мережах часто використовують математичні моделі самоподібного часового ряду [16, 41-44, 46, 47, 84]. На рис. 1.2, де зображена завантаженість каналу комп'ютерної мережі; самоподібність виражена наявністю викидів, кількість яких перевищує передбачення класичної статистичної теорії. На цьому рисунку на горизонтальній осі показаний час в умовних одиницях, а по вертикалі – завантаженість мережі відносно максимальної пропускної спроможності.

В роботах [59, 60] в ході експериментальних досліджень реального трафіку у гетерогенних комп'ютерних мережах, в яких передавалася відео-, аудіо- та текстова інформація, виявлено фракталоподібний персистентний трафік (з показником Херста в діапазоні $0.5 < H < 1.0$). Пізніше в роботах [61-

64] було також експериментальним чином виявлено фракталоподібний антиперсистентний трафік (з показником Херста в діапазоні $0.0 < H < 0.5$), зокрема у мобільних та домашніх Wi-Fi мережах, в наномережах датчиків та Інтернеті речей IoT. Таким чином, реальний трафік має фракталоподібні властивості, а також може бути персистентним або антиперсистентним залежно від типу мереж та інформації, що у них передається.

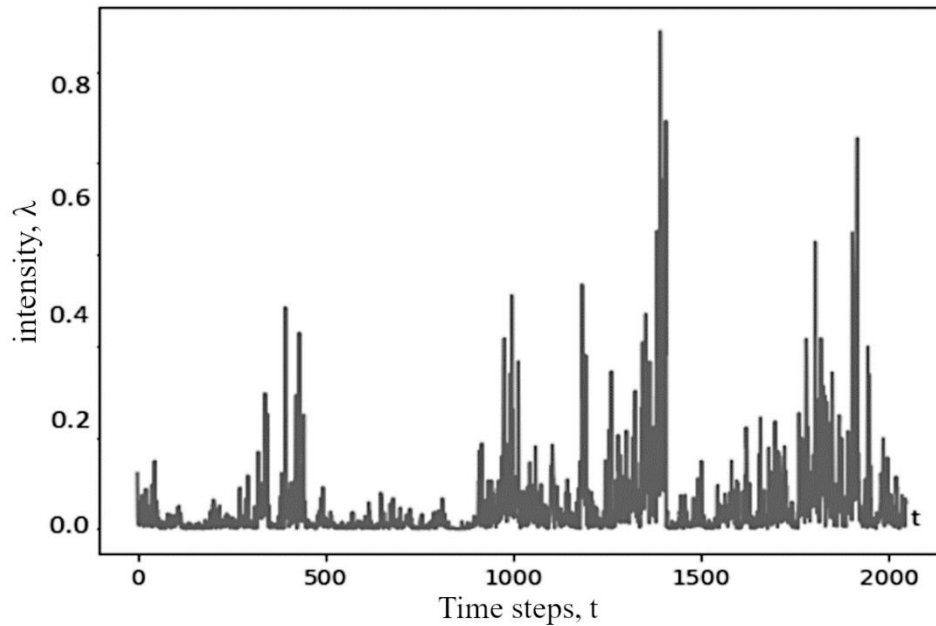


Рис. 1.2. Приклад фракталоподібного мережевого трафіку [16]

У 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 приводить до потреб у 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 комп'ютерної мережі, що досліджується [14, 15, 18, 23, 29].

З огляду на актуальність виконання задачі керування фрактальними властивостями генерованого трафіку, робота присвячена визначенню залежності фрактальних властивостей моделі трафіку від використаного масштабування.

Проведений аналіз досліджень та публікацій виявив наступне. В [40, 41, 43, 46] розглянуто загальні методи фрактального та мультифрактального аналізу часових рядів. Описані методи визначення основних показників числових послідовностей, які використовуються для аналізування трафіку в телекомунікаційних і комп'ютерних мережах. У [12] також сформульовані базові визначення та поняття теорії фрактального виміру та фрактального аналізу.

Важливість мультифрактального аналізу процесів обміну інформацією в комп'ютерних мережах описано в [15], де проведено аналіз Інтернет трафіку, статистика якого збиралася більше чотирнадцяти років. При цьому автори описують наявність розвитку глобальної мережі, при якому спостерігаються зміни в фрактальних показниках на всіх рівнях масштабування. Стаття містить докази існування самоподібності різного характеру на окремих часових масштабах.

У [16] 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. Це доводить відмінність мультифрактальних показників трафіку для даних різного виду. Тезу значного впливу на фрактальність трафіку підтверджено в [18]; наведено інформацію про успішне використання фрактального аналізу для ідентифікації потоків трафіку P2P, ігор, передачі інформації у хмарах, сканування портів та дій ботнету.

В [14-18] показано використання мультифрактального моделювання числових послідовностей для відновлення втрачених фрагментів часових рядів. Мультифрактальна інтерполяція дає кращі результати за випадкове заповнення та за класичні методи інтерполяції. Робота [21] також використовує фрактальну інтерполяцію для відновлення трафіку з відомими фрактальними властивостями, але на іншому часовому масштабі. Результати дослідження [14-18] показують, що моделювання складних мереж стає можливим при врахуванні ієрархічної самоподоби в матриці суміжності. Фактично цей підхід дає можливість вносити класифікацію великих мереж, проводити моделювання. Також теорія застосовна для мереж більш широкого змісту, наприклад, до ієрархічних зв'язків між структурними одиницями різних порядків або масштабування.

Наступні роботи [14-18] мають відношення до моделювання процесів обміну інформацією в комп'ютерних мережах з метою відновлення втрачених даних, в них розглянуто імітаційне моделювання роботи комп'ютерної мережі на різних масштабах та типів даних, аналіз трафіку мережі для різних застосунків. Всі ці задачі потребують наявності імітації джерела мультифрактального трафіку з керованими властивостями. Наявність потоку публікацій з урізноманітненням методів та засобів моделювання мультифрактального трафіку підкреслюють актуальність розвитку засобів як в напрямку підвищення точності відтворення заданих властивостей, так і в напрямку зменшення обчислювальної складності реалізацій генераторів мультифрактального трафіку, що дозволить без використання більш коштовних систем підвищити швидкодію або детальність моделювання процесів в комп'ютерних мережах.

1.4. Дослідження методів аналізу фракталоподібного трафіку

Під час дослідження та моделювання інформаційних процесів в телекомунікаційних системах та комп'ютерних мережах необхідно

враховувати фрактальні властивості мережевого трафіку. Зокрема, врахування фрактальних властивостей значно впливають на результати імітаційного моделювання процесів обміну інформацією, і, відповідно, це дозволяє передбачити розвиток подій в інформаційних процесах, які пов'язані не лише з рухом інформації в комп'ютерних мережах [34-39]. Всі ці джерела пов'язані проблемою визначення фрактальної розмірності часових рядів, і дати публікацій різняться від 1994 до 2022 років, що свідчить про те, що проблема швидкого та точного визначення фрактальної розмірності не є розв'язаною остаточно і потребує подальшого дослідження.

Часто для визначення фрактальних характеристик часового ряду використовуються методи, які базуються на моделюванні випадкового блукання, яке залежить від стандартного відхилення випадкової величини та довжини серії. Зокрема таким показником є R/S-аналіз. Вважається, що R/S-аналіз для пошуку коефіцієнта самоподібності має вищу точність для довгих рядів з великими накопичувальними сумами [39]. Також, відмічено, що визначення коефіцієнту самоподібності залежить і від довжини досліджуваного ряду [40]. Не завжди є можливість отримувати довгі часові ряди для їх аналізу. Наприклад, властивості часового ряду змінюються раніше, ніж з'являється можливість скористатися визначеною властивістю, або сам процес є занадто коротким, щоб отримати достатньо даних для впевненого аналізування. Тому можна прослідкувати, що потік наукових робіт про методи отримання коефіцієнта самоподібності часового ряду не зменшується. В підсумку це є демонстрацією актуальності розглянутої задачі.

Отже, при вирішенні задач прогнозування та оптимізації роботи комп'ютерних мереж практично обов'язковим є врахування фрактальної природи трафіку в мережі Інтернет [41-44].

Відомі критерії, за якими визначають фрактальну розмірність (наприклад, показник Херста [45]), мають значні похибки та відхилення для окремих реалізацій, тому є доцільним розробляти нові методи оцінювання

фрактальних характеристик досліджуваного сигналу, що прослідковується в ряді публікацій; наприклад, у [46] наведено методи з використанням вейвлетного аналізу.

Окремі оглядові публікації, в яких розглянуто та проведено порівняння кількох методів, використовують визначення фрактальної розмірності окремих короткочасних реалізацій, на основі яких визначають властивості цього сигналу [47]. Але існують випадки наявності ергодичного сигналу з відомим теоретичним обґрунтуванням його функції розподілу густини ймовірності. В таких випадках короткі реалізації мають високу ймовірність до відхилень, але такі реалізації дозволяють оцінювати вагові коефіцієнти відомого розподілу ймовірності. Саме в таких випадках корисно мати якісні засоби визначення фрактальної розмірності на основі функції розподілу ймовірності, що і є причиною постійного пошуку та розробки нових більш якісних методів визначення фрактальної розмірності. В процесах передачі інформації в комп'ютерних системах та мережах широко використовують пошук фрактальної розмірності трафіку мережі. Для цього використовують різні методи та підходи, що спрямовані на зменшення випадкових відхилень при проведенні розрахунків на відносно малих реалізаціях часових рядів [42-44, 46, 47]. В умовах дефіциту вхідних даних значно можуть покращити ситуацію додаткові дані про природу досліджуваного часового ряду. Наприклад, за допомогою теоретичних обґрунтувань для моделювання часових рядів, їх можна реалізувати на основі випадкових процесів з заданими розподілами ймовірності, такими як Пуасонівський процес [48, с.32], ланцюги Маркова [48, с.89], черги на основі процесу Парето [49] та інші. Кожен із розподілів має власну сферу застосування та обґрунтовується на основі прийнятих гіпотез та експериментальній перевірці на довгих реалізаціях. Проте реальні процеси мають лише наближені розподіли до теоретичних; варто лише нагадати, що теоретичне надходження кількості даних за одиницю часу обмежене пропускнуою здатністю вхідного каналу мережі. Тому покращити наближення

можна, врахувавши реальні розподіли ймовірності, які отримано експериментальним шляхом.

1.5. Дослідження методів генерування структури комп'ютерної мережі

Для тестування алгоритмів маршрутизації недостатньо тільки генерації мережевого трафіку, потрібно створити програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі в цілому. І одним з найважливіших питань, які виникають у такому разі, є питання, як моделювати структуру комп'ютерної мережі. Для рішення цієї задачі було вирішено використовувати теорію складних мереж.

Складні мережі – це стохастичні мережі з нетривіальною топологією, що відрізняються від класичних стохастичних мереж наявністю невеликої кількості вузлів із великим числом зв'язків [50, 51, 71]. Більшість реальних мереж – складні: наприклад, комп'ютерні, транспортні, електричні, біологічні та соціальні мережі є складними. За допомогою теорії складних мереж можна моделювати комп'ютерні системи та мережі, а також процеси у них та дії користувачів, що дає змогу проводити тестування різних додатків та аналіз і прогнозування різних процесів [50-53, 66-71].

У складних мереж є наступні основні властивості [50-53]: безмасштабність, невеликий діаметр мережі, високий коефіцієнт кластеризації та високий коефіцієнт транзитивності, гігантська зв'язна компонента (тобто, більше 80% вузлів пов'язані між собою, в нашій моделі комп'ютерної мережі необхідна повна зв'язність), наявні ієрархічні зв'язки, присутні складні кластерні утворення (кліки, клани тощо), асортативність (виникнення зв'язків між вершинами, які чимось схожі між собою, у вузькому розумінні – виникнення зв'язків між вершинами з великою кількістю зв'язків).

За допомогою теорії складних мереж можна моделювати структуру

комп'ютерної мережі, максимально наближену до реальної.

Було досліджено найвідоміші методи генерації структури складних мереж:

– **Метод Барабаші-Альберт** [51-53] – генерує структуру складної мережі на основі двох простих правил:

1. Правило росту. Спочатку створюється невелика кількість n_0 вузлів мережі з випадковими зв'язками. Потім на кожній новій часовій ітерації додається один новий вузол і створюється n зв'язків між ним та іншими вже існуючими вузлами (де $n \leq n_0$).

2. Правило бажаного (переважного) приєднання. Ймовірність утворення зв'язку між новим вузлом та вже існуючим i -тим вузлом тим вища, чим більше уже є зв'язків у i -го вузла, та обчислюється наступним чином:

$$p_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}, \quad (1.16)$$

де k_i – кількість зв'язків у i -го вузла (ступінь i -го вузла), а в знаменнику підраховується сума всіх степенів існуючих у мережі вузлів.

За рахунок цих двох простих правил можна створити структуру мережі, у якій буде виконуватися ряд властивостей складних мереж, зокрема степеневий закон, асортативність, малий діаметр мережі тощо.

Перевагами цього методу є те, що мережа, яку він генерує, володіє властивостями розрідженості, «тісного світу», безмасштабності. Недоліками моделі є те, що структура згенерованої мережі сильно залежить від початкового параметру n_0 .

– **Метод Ердеша-Ран'ї** [54]. Нехай V_n є множина вершин $V_n = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, а в графі не буде петель, кратних ребер і орієнтації, тому потенційних ребер буде C_n^2 . Вершини з'єднуються попарно з ймовірністю $p \in [0; 1]$, незалежно від інших вершин. У цьому методі не використовується правило бажаного приєднання. Цей метод дозволить створити стохастичний

граф комп'ютерної мережі, але він не буде мати важливих властивостей складних мереж, а саме степеневого закону розподілу степенів вершин та високого коефіцієнту кластеризації.

– **Метод Болобаша-Ріордана** [55-56]. Спочатку будується множина випадкових графів $\{G_1^n\}$, в якій у графу з номером n число вершин та ребер рівне n . Потім ця множина перетворюється в множину $\{G_k^n\}$, в якій у графу з номером n число вершин рівне n , а число ребер рівне kn , $k \in N$. Цей метод генерує складні мережі, параметри яких добре збігаються з реальними даними, одержаними емпіричним шляхом.

Проведене дослідження показало, що для моделювання структури комп'ютерної мережі найкраще підійдуть моделі, які будуть розроблятися на базі відомої моделі Барабаші-Альберта, оскільки вони дають змогу відтворити найбільшу кількість властивостей комп'ютерних мереж, зокрема степеневий закон розподілу степенів вершин, високі коефіцієнти кластеризації та транзитивності, асортативність, малий діаметр мережі. А також зазначена модель має високу швидкодію, що дуже важливо для тестування різних алгоритмів маршрутизації мережевого трафіку.

1.6. Цілі та задачі дисертаційного дослідження

В цій дисертаційній роботі вирішується науково-практична задача, що полягає у підвищенні якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та пікових навантажень на маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережевих пакетів.

QoS (quality of service, якість обслуговування) – здатність комп'ютерної мережі забезпечити необхідний сервіс заданому трафіку у певних технологічних рамках [18, 27].

QoS передбачає, зокрема, що різним класам трафіку надаються

різні пріоритети в обслуговуванні для обслуговування в першу чергу найбільш важливих категорій трафіку під час пікових навантажень на мережу [18, 84].

Також у вузькому технічному значенні термін QoS означає набір методів та засобів для управління ресурсами комп'ютерних мереж [18, 27].

Для більшості випадків якість обслуговування у комп'ютерних мережах визначається чотирма наступними параметрами [18, 17, 84-86]:

– *Швидкість передачі (Bitrate)* – визначає номінальну пропускну спроможність середовища передачі. Залежить від ширини смуги пропускання каналу зв'язку (Гц) та відношення сигнал/шум. Вимірюється біт/, Кбіт/с, Мбіт/с, Гбіт/с.

– *Затримка при передачі пакета (Delay)* – вимірюється в мілісекундах.

– *Джитер* – коливання (тремтіння) затримки під час передачі мережевих пакетів.

– *Втрата мережевих пакетів (Packet loss)* – визначає кількість пакетів, втрачених у комп'ютерній мережі під час передачі даних.

Розглянемо детальніше втрату мережевих пакетів. Відкидання пакетів відбувається, коли вхідна черга маршрутизатора заповнена. Це типова подія, яка трапляється, коли мережа перевантажена трафіком високої інтенсивності [57]. Інші причини втрати пакетів, наприклад, за рахунок фізичних вад каналу передачі, не розглядаються, бо вплив на ймовірність їх втрати програмними методами є неможливим, а також їх джерелом є не пікові навантаження на комп'ютерну мережу через велику кількість запитів користувачів, а інші причини.

Втрата пакетів відбувається, коли на маршрутизаторах закінчується буферний простір для певної черги вхідного інтерфейсу. Термін, який використовується для таких відкидань – просто «відкидання виведення» (output drop) або «відкидання хвоста» (tail drop), коли пакети відкидаються наприкінці черги.

Маршрутизатори також можуть скидати пакети з інших, менш поширених причин:

- внутрішня апаратна або програмна помилка у маршрутизаторі;
- центральний процесор перевантажений і не може обробити новий пакет та призначити йому вільний буфер;
- у пакеті виявлена помилка за допомогою циклічних збиткових кодів CRC, пакет відкидається через те, що він вважається зіпсованим.

Далі будемо розглядати втрату пакетів тільки через переповнення черги маршрутизатора, адже інші причини втрати пакетів не пов'язані напрямку з інтенсивністю трафіку через пікові навантаження мережі.

Способи запобігання втраті пакетів [34, 35, 37, 57]:

– Запросити повторну передачу пакета – найкраще рішення, але й найдорожче.

– Гарантувати достатню пропускну здатність для можливих навантажень на комп'ютерну мережу – не завжди можливо, а також слід зазначити, що навантаження на мережу з часом постійно збільшується через бурхливий розвиток ІТ-технологій та впровадження їх у всі сфери життя, тож оновлення обладнання може не встигати за збільшенням потреб користувачів.

– Запобігання перевантаженню шляхом випадкового відкидання менш важливих пакетів до виникнення перевантаження.

– Формування трафіку – затримує пакети, а не відкидає їх (формування загального трафіку GTS, формування трафіку Frame Relay FRTS і формування на основі класів).

– Контроль руху трафіку – може обмежити швидкість менш важливих пакетів, щоб забезпечити кращий сервіс для чутливих до падіння пакетів (закріплена швидкість доступу і контроль на основі класів).

– Прогнозування завантаженості мережевих пристроїв для забезпечення адаптивної маршрутизації, що буде враховувати ймовірність втрати пакетів на різних мережевих пристроях при виборі маршрутів для передачі пакетів.

Коли передавання даних стикається з проблемою «пляшкової шийки» для прийому та відправлення пакетів на маршрутизаторах, то зазвичай використовується метод FIFO (First In – First Out). При великому обсязі трафіку можуть виникати затори, які можна вирішити просто: маршрутизатор ігнорує всі пакети, які не вміщуються в чергу FIFO (для вхідного або вихідного потоку), тож вони втрачаються безповоротно. Ефективнішим методом є використання «розумної» черги, де пріоритет пакетів залежить від типу сервісу (ToS). Це передбачає наявність мітки типу сервісу у пакеті для створення «розумної» черги. Наприклад, пакетам VoIP можна дати високий пріоритет, а пакетам FTP, SMTP та клієнтам файлообмінної мережі – низький.

Протоколи транспортного рівня UDP і TCP поведуться дуже по-різному при втраті мережевих пакетів [57]. UDP сам по собі не реагує на втрату пакетів, оскільки UDP не містить механізму, за допомогою якого можна було б дізнатися, чи було втрачено пакет. При цьому якість переданої інформації втрачається від втрати пакетів, а швидкість залишається незмінною. Натомість протокол TCP уповільнює швидкість передачі даних при втраті пакетів, так як він відстежує це та робить спроби повторної передачі пакетів, щоб не знижувати якість переданих даних. На відміну від UDP, TCP містить поле в заголовку TCP для нумерації кожного TCP сегменту (порядковий номер) та інше поле, яке використовується одержувачем для підтвердження отримання пакетів (номер підтвердження). Коли приймач TCP сигналізує, що пакет не було отримано, або якщо підтвердження не отримано взагалі, відправник TCP припускає, що пакет було втрачено, і надсилає його повторно. Що ще важливіше, відправник також уповільнює надсилання даних у мережу.

Таким чином, втрата мережевих пакетів є однією з важливих проблем, які повинні вирішуватися при забезпеченні якості обслуговування у комп'ютерній мережі. На різні протоколи транспортного рівня втрата пакетів може впливати по-різному, зокрема, при використанні протоколу UDP буде

падати якість та надійність даних, що передаються; при використанні протоколу TCP буде знижуватися швидкість передачі даних при невеликих значеннях втрат пакетів, а при великих втратах пакетів будуть знижуватися і швидкість, і якість. Одним із перспективних та недостатньо досліджених методів попередження втрати мережових пакетів під час пікових навантажень на маршрутизатори є прогнозування їх завантаженості та розробка адаптивних методів маршрутизації з урахуванням ймовірності втрати пакетів на різних мережових пристроях при побудові оптимальних маршрутів передачі трафіку.

Для вирішення поставленої науково-практичної задачі була поставлена наступна мета дисертаційної роботи – зменшення ймовірності втрати IP-пакетів при високій інтенсивності трафіку за рахунок розробки і застосування моделей та методів фрактального аналізу і адаптивної маршрутизації трафіку.

Мета дисертаційної роботи визначає необхідність розв'язання таких основних задач:

1. Удосконалити математичну модель мережового фракталоподібного трафіку та метод генерації трафіку з різними властивостями.

2. Розробити метод аналізу мережового трафіку та визначення його фрактальної розмірності для прогнозування стану маршрутизаторів комп'ютерної мережі.

3. Розробити метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерних мереж з фракталоподібним трафіком та різними параметризованими характеристиками моделі комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації.

4. Удосконалити метод адаптивної маршрутизації, заснований на прогнозуванні ймовірності втрати мережових пакетів на основі аналізу трафіку, для зменшення кількості втрачених пакетів під час пікових навантажень на комп'ютерну мережу.

5. Провести експериментальне дослідження запропонованих методів аналізу та адаптивної маршрутизації трафіку.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі проведено дослідження та порівняльний аналіз моделей та методів роботи комп'ютерних мереж, а також методів аналізу, моделювання, прогнозування та маршрутизації мережевого трафіку.

Показано, що для вирішення поставленої науково-практичної задачі з підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та пікових навантажень на маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережевих пакетів доцільно застосувати методи адаптивної маршрутизації трафіку з прогнозуванням завантаженості маршрутизаторів або прогнозуванням ймовірності втрати мережевих пакетів.

Проведене дослідження показало, що прогнозування трафіку на основі фрактального аналізу є найбільш перспективним, оскільки фрактальна розмірність трафіку відображає його самоподібність і структуру на різних часових масштабах. Це дозволяє отримувати більш точні прогнози для часових рядів трафіку, ніж традиційні методи, засновані на ковзному середньому та експоненційному згладжуванні. А також вимагає менше обчислювальних ресурсів та менш високої складності розробки і не потребує процесу навчання, як при використанні, наприклад, нейронних мереж, які, безумовно, також можуть виявляти складні самоподібні структури у часових рядах. Більш того, фрактальний синтез дозволяє генерувати фрактальний трафік з різними характеристиками, що може бути корисним для створення імітаційних моделей комп'ютерних мереж та оцінки їхньої продуктивності. Тож методи фрактального аналізу та синтезу можуть бути застосовані для оптимізації маршрутизації та управління трафіком у комп'ютерних мережах.

Досліджено параметри якості обслуговування комп'ютерних мереж. Показано, що втрата мережевих пакетів є однією з важливих проблем, які повинні вирішуватися при забезпеченні якості обслуговування у комп'ютерній мережі. На різні протоколи транспортного рівня втрата пакетів

може впливати по різному, зокрема, при використанні протоколу UDP буде падати якість та надійність даних, що передаються; при використанні протоколу TCP буде знижуватися швидкість передачі даних при невеликих значеннях втрат пакетів, а при великих втратах пакетів будуть знижуватися і швидкість, і якість.

Тож одним з перспективних та недостатньо досліджених методів попередження втрати мережових пакетів під час пікових навантажень на маршрутизатори є прогнозування їх завантаженості та розробка адаптивних методів маршрутизації з врахуванням ймовірності втрати пакетів на різних мережових пристроях при побудові оптимальних маршрутів передачі трафіку.

У першому розділі також сформовано цілі та задачі дисертаційного дослідження. Для вирішення поставленої науково-практичної задачі була поставлена наступна мета дисертаційної роботи – зменшення ймовірності втрати IP-пакетів при високій інтенсивності трафіку за рахунок розробки і застосування моделей та методів фрактального аналізу і адаптивної маршрутизації трафіку.

Список літератури до розділу 1

1. Aweya J. IP Routing Protocols: Link-State and Path-Vector Routing Protocols. 1st ed. CRC Press, 2021. 438 p.
2. Cisco. IP Routed protocols. *Technology Support*. 2022. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/tech/ip/ip-routed-protocols/index.html>.
3. Cisco. Dynamic routing protocols. *Cisco Press*. 2001. URL: <https://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=24090&seqNum=4>.
4. Cisco. Understand open shortest path first (OSPF) – design guide. *Technology Support*. 2022. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/open-shortest-path-first-ospf/7039-1.html>.
5. Tadimety P. R. OSPF messages. *OSPF: A Network Routing Protocol*. Berkeley, CA: Apress, 2015. DOI: 10.1007/978-1-4842-1410-7_18.

6. Yu B. OSPF-based network engineering design and implementation. *Informatics and Management Science VI* / W. Du (Ed.). London: Springer, 2013. Vol. 209. P. 131–138. DOI: 10.1007/978-1-4471-4805-0_16.
7. Moy J. T. OSPF: Anatomy of an Internet Routing Protocol. Addison-Wesley Professional, 1998.
8. Verma A., Bhardwaj N. A review on routing information protocol (RIP) and open shortest path first (OSPF) routing protocol. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2016. Vol. 9, no. 4. P. 161–170.
9. Jain N., Payal A. Comparison between IPv4 and IPv6 using OSPF and OSPFv3 on riverbed modeler. *IEEE Int. Conf. on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. Goa, India, 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/ANTS47819.2019.9118101.
10. Ali M. Time Series Forecasting Tutorial. 2022. URL: <https://www.datacamp.com/tutorial/tutorial-time-series-forecasting#rdl>.
11. Peters E. Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics. John Wiley & Sons, 1994. Vol. 24. 336 p.
12. Anis A. A., Lloyd E. H. The expected value of the adjusted rescaled Hurst range of independent normal summands. *Biometrika*. Vol. 63, no. 1. P. 283–298. DOI: 10.1093/BIOMET/63.1.111.
13. Моделі та процедури класифікації і прогнозування недетермінованих процесів за показниками хаотичної динаміки / В. В. Скалозуб, В. М. Горячкін, І. В. Клименко, Д. О Шаповал. *System technologies*. 2022. Vol. 3, no. 140. DOI: 10.34185/1562-9945-3-140-2022-10.
14. Tian, Yu-Chu, Zu-Guo Yu, Colin Fidge. Multifractal nature of network induced time delay in networked control systems. *Physics Letters A*. 2007. Vol. 361, no. 1–2. P. 103–107. DOI: 10.1016/j.physleta.2006.09.046 (date of access: 11.06.2006).
15. Mirchandani P. B., Zou N. Queuing models for analysis of traffic adaptive signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

2007. Vol. 8, no. 1. P. 50–59. DOI: 10.1109/TITS.2006.888619.

16. Kirichenko L., Radivilova T., Bulakh V. Machine learning in classification time series with fractal properties. *IEEE Second Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, (Lviv, Ukraine, Aug. 21–25, 2018). 2018. Vol. 4, no. 1. DOI: 10.3390/data4010005.

17. Lysytsia D. O., Semenov S. G., Lysytsia A. O. Gert-model of processes of active analysis of the system resource management and implementation in the computer system. *Středoevropský věstník pro vědu a výzkum*. 2018. Vol. 6, no. 50.

18. Daradkeh Y. I., Kirichenko L., Radivilova T. Development of QoS methods in the information networks with fractal traffic. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2018. Vol. 64, no. 1. P. 27–32. DOI: 10.24425/118142.

19. Fractal modeling of big data networks / M. Barat, Z. Joveini, J. Sadri, H. A. Khoushal. *Int. Conf. on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018)*. Canada, Montreal: Concordia University, 2018. P. 1–4.

20. Jiang D., Huo L., Li Y. Fine-granularity inference and estimations to network traffic for SDN. *PLoS ONE*. / Zhihan Lv (Ed.). London, UK: University College, 2018. Vol. 13, no. 5. DOI: 10.1371/journal.pone.0194302.

21. Bulakh V., Kirichenko L., Radivilova T. Time series classification based on fractal properties. *Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP): Proc. of the 2018 IEEE Second*, (Lviv, Ukraine, Aug. 21–25, 2018). P. 198–201. DOI: 10.1109/DSMP.2018.8478532.

22. Raaijmakers Y., Albrecher H., Boxma O. The single server queue with mixing dependencies. *Methodology and Computing in Applied Probability*. 2019. Vol. 21. P. 1023–1044. URL: http://www.hec.unil.ch/halbrech_files/QueueMixing.pdf.

23. Accurate recovery of internet traffic data under dynamic measurements / K. Xie, C. Peng, X. Wang et al. *IEEE INFOCOM 2017: IEEE Conf. on Computer Communications*. 2017. P. 1–9.

24. Wang C., Maguluri S. T., Javidi T. Heavy traffic queue length behavior

in switches with reconfiguration delay. *IEEE INFOCOM 2017: IEEE Conf. on Computer Communications*. 2017. P. 1–9.

25. Fast low-rank matrix approximation with locality sensitive hashing for quick anomaly detection / G. Xie, K. Xie, J. Huang et al. *IEEE INFOCOM 2017: IEEE Conf. on Computer Communications*. 2017. P. 1–9.

26. Ivanisenko I., Kirichenko L., Radivilova T. Investigation of self-similar properties of additive data traffic. *X Int. Sci. and Tech. Conf. "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT), IEEE*. 2015. P. 169–171. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1904/1904.05925.pdf>.

27. Czarkowski M., Kaczmarek S., Wolff M. Influence of self-similar traffic type on performance of QoS routing algorithms. *INTL Journal of electronics and telecommunications*. 2016. Vol. 62, no. 1. P. 81–87. DOI: 10.1515/eletel-2016-0011.

28. Lakhmi Priya Das, Sanjay Kumar Patra, Sarojananda Mishra. Impact of hurst parameter value in self-similarity behaviour of network traffic. *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*. 2016. Vol. 5, no. 12. P. 631–633.

29. Hae-Duck Joshua Jeong. Modelling of self-similar teletraffic for simulation: D. Ph. thesis. University of Canterbury. New Zealand: Christchurch, 2002. P. 270.

30. Кучук Г. А., Можаяев О. О., Воробйов О. В. Метод прогнозування фрактального трафіка. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2006. Вип. 6. С. 181–188. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2006_6_34.

31. Кучук Г. А., Можаяев О. О., Воробйов О. В. Прогнозування трафіка для управління перенавантаженнями інтегрованої телекомунікаційної мережі. *Радіоелектронні та комп'ютерні системи*. 2007. Вип. 8. С. 261–271. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_8_48.

32. Кучук Г. А., Можаяев О. О., Воробйов О. В. Аналіз та моделі самоподібного трафіка. *Авиационно-космическая техннка и технология*. 2006.

Вип. 9, № 35. С. 173–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35.

33. Коваленко А. А., Кучук Г. А., Можаяв О. О. Побудова експоненціальних часових шкал при аналізі черги мультисерверних мереж. *Радіоелектронні та комп'ютерні системи*. 2010. Вип. 7. С. 257–262. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2010_7_52.

34. Ma C., Dai G., Zhou J. Short-term traffic flow prediction for urban road sections based on time series analysis and LSTM_BILSTM method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. DOI: 10.1109/TITS.2021.3055258. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9364926>.

35. Dymora P., Mazurek M. Influence of model and traffic pattern on determining the self-similarity in IP networks. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 190. DOI: 10.3390/app11010190.

36. Phinyomark A., Larracy R., Scheme E. Fractal analysis of human gait variability via stride interval time series. *Frontiers in physiology*. 2020. Vol. 11. P. 333. DOI: 10.3389/fphys.2020.00333. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32351405/>.

37. Millán G. Traffic flows analysis in high-speed computer networks using time series. *arXiv preprint arXiv:2103.03984*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.03984>.

38. Feldmann A., Gilbert A. C., Willinger W. Data networks as cascades: investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic. *Proc. of the ACM SIGCOMM '98 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM '98)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 1998. P. 42–55. DOI: 10.1145/285237.285256.

39. Bassingthwaite J. B., Raymond G. M. Evaluating rescaled range analysis for time series. *Annals of Biomedical Engineering*. 1994. Vol. 22. P. 432–444. DOI: 10.1007/BF02368250. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02368250#citeas>.

40. An accurate algorithm to calculate the Hurst exponent of self-similar processes / M. Fernández-Martínez, M. A. Sánchez-Granero, J. E. Trinidad Segovia, I. M. Román-Sánchez. *Physics Letters A*. 2014. Vol. 378, no. 32–33, P. 2355–2362. DOI: 10.1016/j.physleta.2014.06.018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375960114005878>.
41. Fractal analysis of printed structures / O. Zmeškal, M. Nežádal, B. Komendová et al. *Journal of Imaging Science and Technology*. (Sept./Oct. 2002). 2002. Vol. 46, no. 5. P. 453–456.
42. Leland W., Taqqu M., Willinger W. On the self-similar nature of IP-traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1997. Vol. 3. P. 423–431.
43. Кучук Г. А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка. *Системи обробки інформації*: зб. наук. праць. Харків: Харків. ун-т Повітряних Сил, 2005. Вип. 5, № 45. С. 74–84.
44. Стасєв Ю. В., Харітонов О. Л., Кучук Г. А. Визначення непараметричних статистик фрактального мережного трафіка. *Системи обробки інформації*. 2006. Вип. 4. С. 163–172. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_4_26.
45. Zhao Y., Wu L. Comparison and application of estimation of Hurst exponent. *Computer Engineering and Applications*. 2014. No. 16. P. 154–158.
46. Self-similarity and long-range dependence through the wavelet lens / P. Abry, P. Flandrin, M. S. Taqqu, D. Veitch. *Theory and Applications of Long-Range Dependence*. P. Doukhan, G. Oppenheim, M. S. Taqqu (Eds). Birkhauser, Boston. 2002. Vol. 1. P. 527–556.
47. Нич Л. Я., Камінський Р. М. Визначення показника Герста за допомогою фрактальної розмірності, обчисленої клітинковим методом на прикладі коротких часових рядів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Інформаційні системи та мережі. 2015. Вип. 814. С. 100–111.
48. Теорія телетрафіку / В. Я. Воропаєва, В. І. Бессараб,

В. В. Турупалов, В. В. Червинський. Донецьк: ДонНТУ, 2011. 202 с.

49. Математична модель розподілу навантаження в телекомунікаційних мережах спеціального призначення / І. О. Романенко, Р. М. Животовський, С. М. Петрук та ін. *Системи обробки інформації*. 2017. Вип. 3, № 149. С. 61–71.

50. Agrawal R., Srikant R. Fast algorithms for mining association rules. *Proc. 20th Int. Conf. on Very Large Databases*. 1994. P. 487–499.

51. Albert R., Barabási A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*. 2002. Vol. 74. P. 47–97. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.47.

52. Barabási A.-L., Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*. 1999. Vol. 286, no. 5439. P. 509–512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509.

53. Barabási L.-A., Albert R., Jeong H. Scale-free characteristics of random networks: the topology of the world-wide web. *Physica A: statistical mechanics and its applications*. 2000. Vol. 281, no. 1–4. P. 69–77.

54. Erdős P., Rényi A. On the evolution of random graphs. *Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*. 1960. Vol. 5. P. 17–61.

55. Directed scale-free graphs / B. Bollobás, C. Borgs., T. Chayes, O. M. Riordan. *Proc. of the Fourteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA '03)*. 2003. Vol. 3. P. 132–139.

56. Bollobás B., Riordan O. Mathematical results on scale-free random graphs. *Handbook of graphs and networks*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. P. 1–34.

57. Packet Loss. 2022. URL: <https://www.ccexpert.us/qos-implementing/packet-loss.html>.

58. Meleshko Ye., Drieiev O., Drieieva H. Method of identification bot profiles based on neural networks in recommendation systems. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 24–28. DOI: 10.20998/2522-

9052.2020.2.05.

59. Self-similarity through high-variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level / W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, D. V. Wilson. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1997. No. 5 (1), P. 71–86. DOI: 10.1109/90.554723.

60. Norros I. The management of large flows of connectionless traffic on the basis of self-similar modeling. *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications ICC'95*. 1995. Vol. 1. P. 451–455. DOI: 10.1109/ICC.1995.525210.

61. Characterisation of wireless network traffic: Fractality and stationarity / S. Mukherjee, R. Ray, M. H Khondekar et al. *Third Int. Conf. on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*. Kolkata, India, 2017. P. 79–83. DOI: 10.1109/ICRCICN.2017.8234485.

62. A statistical signal processing approach in wireless network traffic analysis / S. Chowdhury, S. Paul, D. Chatterjee et al. *Int. Conf. on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. Greater Noida, India, 2018. P. 70–73. DOI: 10.1109/GUCON.2018.8675019.

63. Samadder S., Ghosh K. Investigation of memory, nonlinearity and chaos in worldwide monthly mobile data traffic in smartphones. *Architectural Wireless Networks Solutions and Security Issues. Lecture Notes in Networks and Systems* / S. K. Das, S. Samanta, N. Dey, B. S. Patel, A. E. Hassanien (Eds). Springer, Singapore, 2021. Vol. 196. DOI: 10.1007/978-981-16-0386-0_17.

64. Biernacki A. Analysis and modelling of traffic produced by adaptive HTTP-based video. *Multimed Tools*. 2017. Vol. 76. P. 12347–12368. DOI: 10.1007/s11042-016-3623-8.

65. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Метод кластеризації користувачів соціальної мережі на основі нейронних мереж. *Комбінаторні конфігурації та їх застосування: зб. тез XXII Міжнар. наук.-практ. семінару імені А. Я. Петренюка, (Запоріжжя–Кропивницький, 15–16 трав. 2020 р.)* / за ред. Г. П. Донця. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2020. С. 87–90.

66. Методи визначення ботів серед користувачів соціальних мереж /

Є. В. Мелешко, Г. М. Дреєва, В. С. Гермак та ін. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 44.

67. Дослідження вразливостей рекомендаційних систем соціальних мереж / Є. Мелешко, О. Дреєв, М. Якименко, Г. Дреєва. *Інформація, комунікація, суспільство ICS-2021*: матеріали X Міжнар. наук. конф., (Львів, 20–22 трав. 2021 р.) / уклад. О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2021. С. 41–42.

68. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дезінформаційні атаки на рекомендаційні системи. *Безпека в сучасному світі*: зб. тез Міжнар. наук. конф., (Дніпро, 27–28 верес. 2019 р.) / ред. О. Ю. Висоцький. Дніпро: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2019. С. 51–53.

69. Мелешко Є. В., Дреєв О. М., Дреєва Г. М. Розробка методу ідентифікації ботів у рекомендаційних системах. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., (Чернігів, 29–30 квіт. 2020 р.): у 2 т. / уклад. А. М. Єрошенко. Чернігів: ЧНТУ, 2020. Т. 2. С. 165–166.

70. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дослідження проблем сучасних рекомендаційних систем. *Інформація, комунікація, суспільство 2018*: зб. тез 7-ї Міжнар. наук. конф. ІКС-2018, (Чинадієво, Україна, 17–19 трав. 2018 р.) / уклад. А. М. Пелешишин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. С. 31–32.

71. Методи моделювання складних мереж / Є. Мелешко, Г. Дреєва., М. Якименко, В. Хох. *Інформація. Комунікація. Суспільство*: матеріали IX Міжнар. наук. конф., (Львів, 21–23 трав. 2020 р.) / уклад. А. М. Пелешишин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2020. С. 29–30.

72. Montgomery D. C., Jennings C. L., Kulahci M. *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting* (Wiley Series in Probability and Statistics).

2nd ed. Wiley-Interscience, 2015. 672 p.

73. Юрченко М. Є. Прогнозування та аналіз часових рядів: метод. вказівки до практ. занять та самост. роботи студентів спец. 051 «Економіка» освітня програма «Економічна кібернетика», «Економічна аналітика». Чернігів : ЧНТУ, 2018. 88 с. URL: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/16992>.

74. Лук'яненко І. Г., Жук В. М. Аналіз часових рядів. Частина перша: Побудова ARIMA, ARCH/GARCH моделей з використанням пакета EViews 6.0: практ. посіб. для роботи в комп'ют. класі: Київ: НаУКМА; Аграр Медіа Груп, 2013. 187 с.

75. Павленко О. М. Згладжування як основний метод аналізу часових рядів. *Сучасні проблеми модернізації та структурних трансформацій економіки України і регіонів*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Запоріжжя, 2015. С. 78–85.

76. Андрусенко Ю. О. Аналіз основних моделей прогнозування часових рядів. *Кібернетика та системний аналіз*: зб. наук. праць / Харків: Харк. ун-т Повітряних Сил, 2020. Вип. 3, № 65. С. 91–96. DOI: 10.30748/zhups.2020.65.14.

77. Shumway R. H., Stoffer D. S. Time Series Analysis and Its Applications. New York: Springer Cham, 2000. Vol. 3. 562 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-52452-8>.

78. Nielsen A. Practical Time Series Analysis: Prediction with Statistics and Machine Learning. USA: O'Reilly Media, Inc., 2019. 504 p.

79. Чікіна Н. О., Антонова І. В. Предпрогнозований аналіз часових рядів з довготривалою пам'яттю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2022. № 1. С. 130–136. DOI: 10.20998/2222-0631.2022.01.14.

80. Скриник О. Я., Скриник О. А., Ошурок Д. О. Фрактальний аналіз часових рядів даних спостережень за температурою повітря в Україні. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2013. Вип. 2. С. 89–95.

81. Гардер С. Є., Корніль Т. Л. Фрактальний аналіз та прогнозування тенденції фінансового часового ряду. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, 2018. Вип. 3. С. 37–40.

82. The robust fractal analysis of time series: Concerning signal class and data length / M. H. Fattahi, N. Talebbeydokhti, G. R. Rakhshandehroo et al. *Fractals*. 2011. Vol. 19, no. 01. P. 29–49. DOI: 10.1142/S0218348X11005099.

83. Pilgrim I., Taylor R. P. Fractal analysis of time-series data sets: Methods and challenges. *Fractal analysis*. 2018. P. 5–30. DOI: 10.5772/intechopen.81958.

84. Tensor based load balancing under self-similar traffic properties with guaranteed QoS / O. Lemeshko, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, A. M. Hailan. *2020 IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. Lviv–Slavske, Ukraine, 2020. P. 293–297. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235442. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9088592>.

85. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Tensor model of fault-tolerant QoS routing with support of bandwidth and delay protection. *2018 IEEE 13th Int. Sci. and Tech. Conf. on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. Lviv, Ukraine, 2018. P. 135–138. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526707.

86. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 3. С. 127–134. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dtssi_2019_3_16.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФРАКТАЛОПОДІБНОГО ТРАФІКУ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ ТА МЕТОД ГЕНЕРАЦІЇ ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ФРАКТАЛЬНОГО ЧАСОВОГО РЯДУ

У цьому розділі запропоновано математичну модель фракталоподібного трафіку у комп'ютерних мережах та метод генерації трафіку на основі фрактального часового ряду.

Багато комп'ютерних та телекомунікаційних мереж представлені математичними моделями у вигляді систем масового обслуговування [1-9]. Це є актуальним при розробці систем забезпечення обміну інформацією в комп'ютерних та телекомунікаційних мережах. Також доведено, що трафік в комп'ютерних мережах на певних масштабах є фракталоподібним [10-15] і при цьому класичні закони розрахунку параметрів системи масового обслуговування дають хибні результати. Найбільш надійними засобами розрахунку параметрів системи масового обслуговування з фрактальним трафіком на сьогодні є результати імітаційного моделювання, бо переважна більшість фрактальних джерел трафіку не піддаються аналітичному розв'язанню. Тому для проведення чисельних експериментів з імітуванням необхідно мати генератори фракталоподібного трафіку.

2.1. Формалізація задачі дослідження

Для формалізації задачі дослідження потрібно визначити параметри та цільову функцію.

Як зазначено в задачі дослідження, необхідно здійснити підвищення якості обслуговування за рахунок зменшення ймовірності втрати пакету в черзі вузла p_i . В процесі функціонування комп'ютерної мережі величинами, які спостерігаються, є трафік у відносних величинах – інтенсивність $0 \leq \tau_{ij}(t) \leq 1$

від вузла i до вузла j , і їх значення змінне в часі t . Якщо вузли не мають фізичного каналу передачі інформації, тоді відповідні інтенсивності $\tau_{ij}=\tau_{ji}\equiv 0$ є константами, рівними нулю.

Ймовірність переповнення черги на вузлі мережі p_i є залежною від вхідного трафіку $\bigcup_j \tau_{ji}$, вихідного трафіку $\bigcup_j \tau_{ij}$, а також від фрактальної розмірності трафіку D_i . Можливі ситуації, коли різниця між вхідним та вихідним трафіками не рівна нулю $\left| \bigcup_j \tau_{ji} - \bigcup_j \tau_{ij} \right| \neq 0$, якщо вузол є постачальником або приймачем трафіку.

В результаті маємо залежність ймовірності втрати пакета на i -тому вузлі:

$$p_i = f\left(\bigcup_j \tau_{ji}, \bigcup_j \tau_{ij}, D_i\right). \quad (2.1)$$

де f шукана залежність.

Керування ймовірністю втрати пакета p_i , можливо проводити перерозподілом трафіку:

$$p_i = f\left(\bigcup_j \tau_{ji}, \bigcup_j (\tau_{ij} + \delta_{ij}), D_i\right), \quad (2.2)$$

де δ_{ij} – корегування трафіку від вузла, при цьому загальний вихідний трафік не змінюється $\sum_j \delta_{ij} = 0$. Також вимагається обмеження: $0 \leq \tau_{ij} + \delta_{ij} \leq 1$.

Перенаправлена інформація надходить до цільового вузла за альтернативними шляхами.

Тоді задача має вигляд:

$$\sum_i f\left(\bigcup_j \tau_{ji}, \bigcup_j (\tau_{ij} + \delta_{ij}), D_i\right) \rightarrow \min. \quad (2.3)$$

де D_i – шукається за допомогою фрактального аналізу; $\bigcup_j \tau_{ji}$ – сума вхідного трафіку, вимірюється вузлом мережі; δ – визначається засобами маршрутизації в мережі.

2.2. Розробка математичної моделі фракталоподібного трафіку у комп'ютерних мережах на основі ланцюга Маркова

Вже традиційно для отримання фракталоподібного трафіку на сьогоднішній день використовують випадкові числа, які генеруються за законами розподілу з «важким хвостом» [32].

Розподіли з «важким хвостом» мають повільно спадний характер розподілу густини ймовірності, що приводить до нескінченного значення дисперсії розподілу, коли математичне сподівання має конкретне значення; іноді використовуються моделі, в яких математичне сподівання теж прямує до нескінченності.

На жаль, математичні абстракції та узагальнення, які полегшують математичні перетворення або взагалі роблять їх можливими, мають межі практичного використання.

В комп'ютерній мережі вузол зв'язку не може отримати нескінченно великий запит на обслуговування з причини обмеження швидкості передачі по лініях зв'язку [16]. Обмеження обсягу генерованого запиту в процесах імітаційного моделювання систем масового обслуговування проводиться штучно, але це порушує теоретичні властивості фрактальності трафіку, тому результати моделювання не можуть вважатися надійними. За зазначеними проблемами з використанням розподілів із «важким хвостом» в роботі пропонується використовувати генератор фрактального трафіку на основі графу скінченного автомата [27, 28].

Нехай проводиться вивчення поведінки маршрутизатора в комп'ютерній або телекомунікаційній мережі, який має N рівнозначних каналів з підключеними клієнтами, має можливість перенаправити M пакетів за одиницю часу та містить загальний внутрішній буфер-чергу на K пакетів (рис. 2.1) [27].

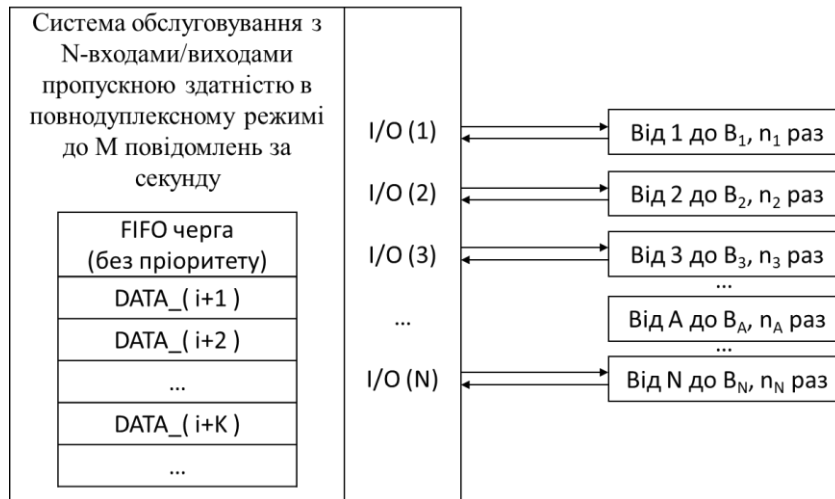


Рис. 2.1. Структурна схема процесу імітаційного моделювання

Тоді клієнти, які під'єднані до ліній входу/виходу (I/O на схемі), є генераторами фрактального трафіку та споживачами цього трафіку. Кожен клієнт генерує фракталоподібний трафік, але й зміна адреси посилання повинна змінюватися фрактально. Для забезпечення роботи описаної схеми потрібно мати генератор фракталоподібного трафіку з можливістю регулювання інтенсивності запитів та їх фрактальної розмірності. Під час проведення імітації кожен клієнт генерує з указаною ймовірністю наявність пакету даних, а також генерує випадкового отримувача пакета даних. Вибір отримувача пакета теж повинне мати фрактальну природу (для завантаження великого об'єму інформації звернення до одного й того ж джерела є високоймовірним, а при проведенні сканування мережі – запити гарантовано будуть переходити по клієнтах по черзі). Проблема генерування фракталоподібного трафіку розв'язується генераторами на основі розподілу Парето, проте обрання отримувача пакета проводиться за допомогою простого рівномірного розподілу для відомих авторам системам імітації. Причиною цього є незастосовність розподілу Парето для імітування обрання отримувача інформаційного пакета.

Процес моделювання проводиться за програмними «квантами часу», коли відбувається передача одного пакета фіксованої величини та обробка

фіксованої кількості пакетів з черги. Якщо кілька пакетів претендують на перехід до одного й того ж приймача, то надсилається лише той, що першим надійшов до системи. При переповненій черзі можна використовувати два варіанти: скидати «старі» пакети з черги, або блокувати приймання нових пакетів із джерел трафіку.

Математична модель фрактальноподібного трафіку на основі стохастичного скінченного автомата, представленого ланцюгом Маркова

Для генерування фракталоподібного трафіку пропонується використовувати скінченний автомат [21-24, 33, 34], граф якого показано на рис. 2.2. На рисунку використано наступні умовні позначення: «0» та «1» – стани автомата, коли на вихід подається відповідне значення; p_{ij} – ймовірність відповідного переходу; p_0 та p_1 – ймовірності знайти систему у відповідному стані у випадковий момент часу [27].

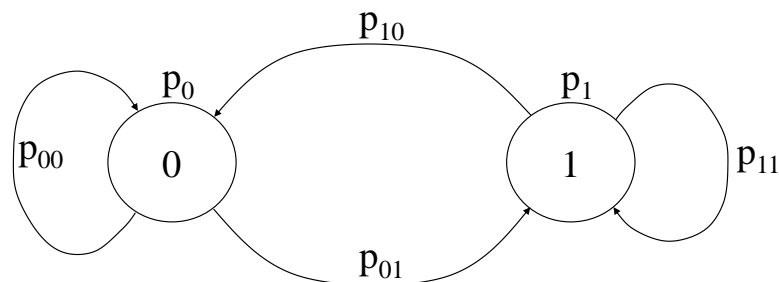


Рис. 2.2. Модель генератора фракталоподібного трафіку на стохастичному скінченному автоматі G , який описується представленим ланцюгом Маркова

Скінченний автомат має два стани «0» та «1», при цьому ймовірність переходу від «0» до «1» та від «1» до «0» в загальному випадку можуть бути різними. Для ймовірностей переходів p мають виконуватися наступні вимоги:

$$\begin{cases} p_{00} + p_{01} = 1 \\ p_{10} + p_{11} = 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

За умови $p_{01} = p_{10}$, граф стає симетричним і ймовірності $p_0 = p_1 = 0.5$ – при довгочасному спостережанні система знаходиться рівноймовірно в

одному із станів. В такому випадку математичне очікування генерованого ряду є $M=0.5$, а дисперсія – $D=0.25$. Хоч генерування наступного значення й залежить від попереднього значення, статистичні величини співпадають і для ряду незалежних випробувань. Доведемо це твердження аналітично.

Для графа рис. 2.2 справедливі наступні диференціальні рівняння відносно ймовірності станів системи:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -p_{01}p_0(t) + p_{10}p_1(t) - p_{00}p_0(t) + p_{00}p_0(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = p_{01}p_0(t) - p_{10}p_1(t) - p_{11}p_1(t) + p_{11}p_1(t). \end{cases} \quad (2.5)$$

Якщо врахувати, що знаходження системи в одному зі станів є гарантованою подією $p_0+p_1=1$, та використати умови стаціонарності процесу в часі (коли ймовірності вже не змінюють свого значення, і їх похідні рівні нулю), перетворення системи (2.5) дає наступну систему:

$$\begin{cases} p_{01}p_0(t) - p_{10}p_1(t) = 0, \\ p_0(t) + p_1(t) = 1. \end{cases} \quad (2.6)$$

З останньої системи можна отримати ймовірності перебування системи у станах «0» та «1» (2.7):

$$p_0 = \frac{p_{10}}{p_{01} + p_{10}}; p_1 = \frac{p_{01}}{p_{01} + p_{10}}. \quad (2.7)$$

Якщо врахувати умову симетричності графу $p=p_{01}=p_{10}$, то ймовірності можна виразити наступним чином (2.8):

$$(p = p_{01} = p_{10}) \Rightarrow \left(p_0 = \frac{p}{p+p}; p_1 = \frac{p}{p+p} \right) \Rightarrow (p_0 = p_1 = 0.5). \quad (2.8)$$

За означенням математичного сподівання та дисперсії ми матимемо аналогічні значення, як і для незалежних випробувань генерування «0» та «1» з рівними ймовірностями: $M(x)=0.5$, $D(x)=0.25$. Проте для моделювання роботи систем обслуговування більш впливовий результат має розподіл ймовірності часткових сум генерованих послідовностей, на яку й покажемо значний вплив фрактальної розмірності отриманих послідовностей [27, 28].

2.3. Розробка методу генерації фрактального трафіку

На основі запропонованої математичної моделі мережевого трафіку було розроблено метод генерації фрактального трафіку [24-28, 30, 31, 35, 36].

Узагальнюючи інформацію з попередніх розділів, можна надати наступні інструкції для генерування фрактального трафіку на основі запропонованої математичної моделі:

Етап 1. Ініціалізація ймовірностей перехідів між станами ланцюга Маркова для моделювання фрактального трафіку p_{01} та p_{10} . Можна здійснити вказання цих величин відповідно до замірів на реальному трафіку, який треба змоделювати. Або здійснити підбір чисельними методами за допомогою методу дотичних прямих ймовірностей p_{01} та p_{10} для заданих значень фрактальної розмірності та інтенсивності трафіку (метод підбору розглядається докладно на початку розділу 4.3, а також у лістингу 2.1 нижче).

Етап 2. Генерація випадкового часового ряду з рівномірним розподілом та дробовими числами у діапазоні $[0.0, 1.0]$.

Етап 3. На основі запропонованої математичної моделі перетворюємо згенеровану випадкову послідовність на фрактальну. Для отримання фрактального трафіку необхідно зробити наступні дії. З використанням кожного числа ряду, згенерованого на 2 етапі визначаємо ймовірність зміни стану трафіку за формулами (2.9-2.11) та формуємо відповідний ряд:

$$g[0] = \begin{cases} 1, & \text{якщо } s[0] < \lambda \\ 0, & \text{якщо } s[0] > \lambda \end{cases} \quad (2.9)$$

$$z_i = \begin{cases} s[i] - p_{01}, & \text{якщо } g[i-1] = 0 \\ s[i] - p_{10}, & \text{якщо } g[i-1] = 1 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$g[i] = \begin{cases} \overline{s[i-1]}, & \text{якщо } z_i < 0 \\ s[i-1], & \text{якщо } z_i \geq 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

Ймовірності p_{01} та p_{10} вказуються при ініціалізації алгоритму. Конкретні їх значення можна обирати попередньо дослідивши відповідні значення у реального трафіку, який треба змоделювати. Таким чином обираючи різні p_{01} та p_{10} , можна моделювати різні типи трафіку.

Щоб перед генерацією трафіку вказати конкретні значення фрактальної розмірності та інтенсивності трафіку, що може бути досить корисно в програмній імітаційній моделі для тестування алгоритмів маршрутизації у різних умовах, було запропоновано вирішувати наступну задачу: при яких ймовірностях p_{01} та p_{10} будуть одержані потрібні фрактальна розмірність та інтенсивність. Ця задача була вирішена чисельними методами за допомогою методу дотичних прямих на основі співвідношень, отриманих у 3 розділі.

Нижче наведено програмний код на мові програмування Python, який був розроблений та використаний у цій роботі для реалізації запропонованого методу генерації фрактального трафіку:

Лістинг 2.1. Метод генерації фрактального трафіку

```
class GeneratorFractalStream(object):
    fractal_dimension: float = 1.5 # (1.0 ... 2.0)
    intensivity: float = 0.5

    _prior_state: int = 0
    _probability_change_from_0_to_1 = 0.5
    _probability_change_from_1_to_0 = 0.5

    def _f_x(self, x):
        a = (1.0-self.intensivity)/self.intensivity
        return 2-self.fractal_dimension+(1-x)*np.log(1-x)/(2*x)+(1-x*a)*np.log(1-x*a)/(2*x*a)

    def _df_x(self, x):
        a = (1.0-self.intensivity)/self.intensivity
        return -(x+np.log(1-x))/(2*x*x) - (x*a + np.log(1-x*a))/(2*x*x*a)

    def __init__(self, fractal_dimension: float = None, intensivity: float = None):
        self._prior_state = 1 if random.random()>0.5 else 0
        self.fractal_dimension = fractal_dimension if fractal_dimension is not None else 0.5
        self.intensivity = intensivity if intensivity is not None else 0.5
        t = 0.0001
        d = 1.0
        N = 1
        while abs(d)>0.0001:
            d = -0.005*self._f_x(t)/self._df_x(t)
            t = t+d
            N = N+1
        # print(f'Probabilities found by {N} steps!')
        self._probability_change_from_0_to_1 = t
        self._probability_change_from_1_to_0 = self._probability_change_from_0_to_1 * (1.0-self.intensivity)/self.intensivity
        return
```

2.4. Експериментальне дослідження статистичних властивостей часових рядів, створених запропонованим методом генерації фрактального трафіку

Було проведено дослідження якості розробленого методу генерації фрактального трафіку [22, 23, 29, 37]. Зокрема, проведена оцінка статистичних властивостей часткових сум генерованих послідовностей, одержаних з застосуванням запропонованого методу генерації фрактального трафіку [29].

З метою обґрунтування доцільності теоретичних досліджень потрібно провести експериментальне підтвердження формування фрактального трафіку на часткових сумах. Для цього було створено програмне забезпечення для генерування псевдовипадкових чисел «0» та «1». На основі використаного генератора побудовано 100 сум по 100 елементів в кожній. Результати моделювання показано на рис. 2.3. Як і очікувалося, в цьому випадку математичне сподівання суми в середньому склало значення близьке до $M(S)=49.42$ (теоретично 50) з дисперсією $D(S)=24.04$ (теоретично 25). Це відповідає очікуванню показників звичайного генератора відповідних чисел з рівномірним розподілом. Тепер потрібно пересвідчитися в порушенні значення дисперсії при використанні генератора на стохастичному скінченному автоматі [29].

Перший дослід проведено з генератором, для якого ймовірність змінити стан на протилежний складає $\lambda = p_{01} = p_{10} = 0.5$. Результати показано на рис. 2.4. Розрахунок математичного очікування суми отриманих елементів є $M(S_{0.5})=49.75$, дисперсія складає $D(S_{0.5})=28.15$. Отримані результати є близькими до теоретичних, які отримано в разі використання незалежних випробувань. Можна стверджувати, що при $\lambda=0.5$ генератор на скінченному автоматі є аналогом генератора випадкових чисел.

Для наочності результатів далі проведено досліди, щоб при значеннях ймовірності змінити стан p значно відмінних від 0.5, а саме при $p=0.05$ та $p=0.95$ [27].

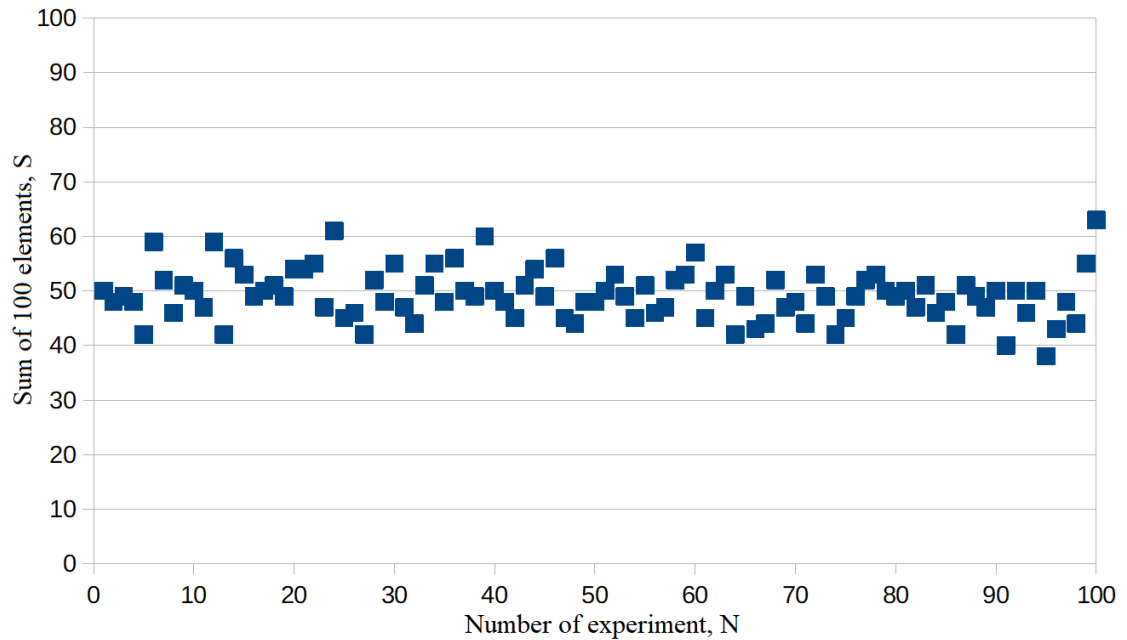


Рис. 2.3. Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних випадкових значень при незалежних випробуваннях $M(S)=49.42$, $D(S)=24.04$

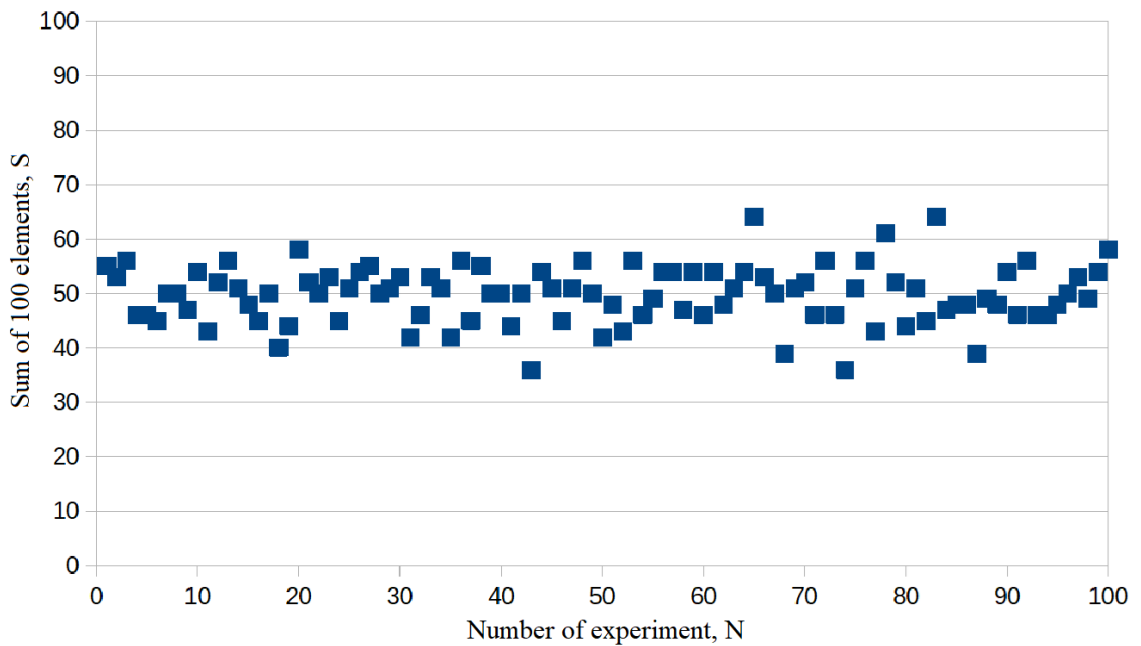


Рис. 2.4. Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних значень при $p=0.5$, $M(S_{0.5})=49.75$, $D(S_{0.5})=28.15$

Експеримент виконано при високій ймовірності системи змінити свій стан ($p=0.95$), генерований ряд має вкрай малу чисельність довгих серій з «1» та «0». Графік такої послідовності насичений високочастотними складовими, й намагається змінити попередню динаміку – ряд є антиперсистентним. Графік результату рахування 100 генерованих значень показаний на рис. 2.5. Цей графік характерний тим, що отримані суми мало відрізняються від математичного очікування, дисперсія суми є малою: $M(S_{0.95})=50.26$, $D(S_{0.95})=1,31$.

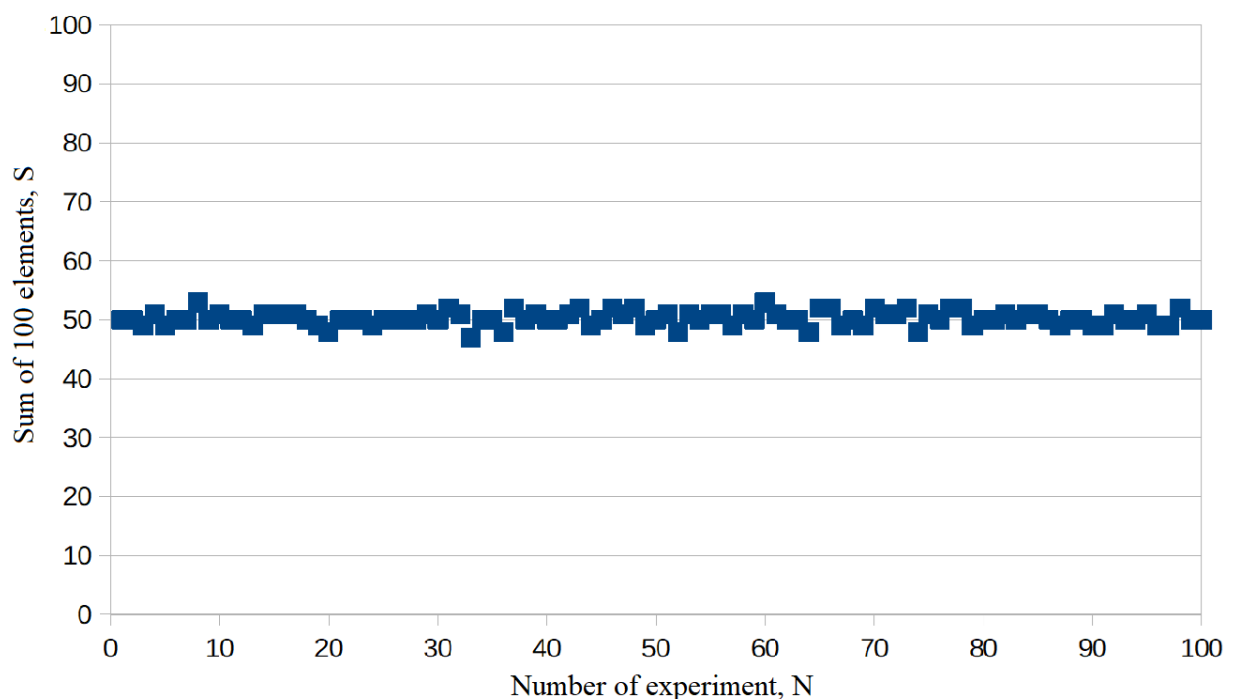


Рис. 2.5. Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних значень при $\lambda=0.95$, $M(S_{0.95})=50.26$, $D(S_{0.95})=1,31$

Натомість дослід для малої ймовірності переходу в інший стан ($p=0.05$), показує наявність довгих серій, які складаються лише з «0» або «1». При цьому суми рядів по 100 значень розкидані по всьому дозволеному діапазону (рис. 2.6) [27].

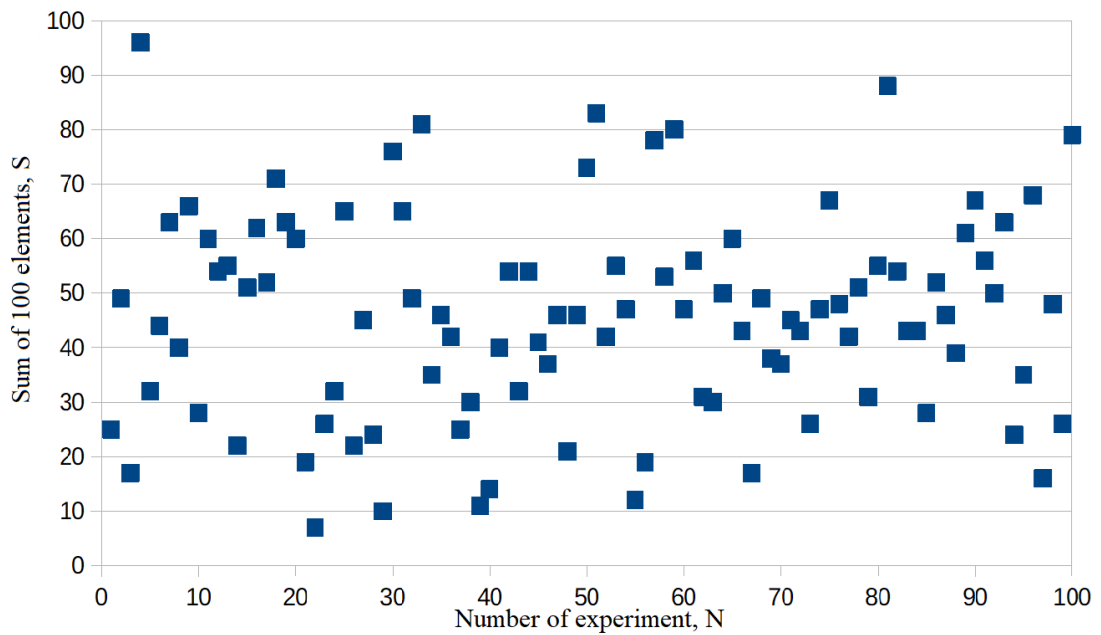


Рис. 2.6. Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних значень при $p=0.05$ $M(S_{0.05})=45.46$, $D(S_{0.05})=360.68$

В результаті математичне очікування суми ряду є незмінним (в межах статистичної похибки) $M(S_{0.05})=45.46$, а дисперсія приймає досить значну величину: $D(S_{0.05})=360.68$ [27].

Відповідно до побудованих графіків до експериментального генерування псевдовипадкових послідовностей, можна зробити висновок про наявність фрактальності в побудованих послідовностях, про що свідчить відхилення значень дисперсій часткових сум від теоретичного значення для випадкових рядів. Визначення конкретних значень фрактальної розмірності генерованих часових рядів проводилося у розділі 3.

2.5. Розробка математичної моделі генератора мультифрактального трафіку

Було додано механізм до генератора бінарного трафіку на основі стохастичного автомата G (рис. 2.2), який дозволив керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах. Це значно розширить коло застосовності генератора. В багатьох випадках обрання методу генерування

трафіку має ґрунтуватися на властивостях трафіку, отриманого експериментально з комп'ютерної мережі, де буде впроваджено алгоритми маршрутизації трафіком.

Загалом трафік у реальних комп'ютерних мережах часто має мультифрактальні властивості, зокрема, про це свідчать дослідження [17, 18].

Мультифрактальність часового ряду та методи керування мультифрактальними особливостями. Як показано в [19] (рис. 2.7), питання зміни фрактальної розмірності з масштабуванням в часі реальних даних трафіку є актуальним досить тривалий час, про це свідчить наявність публікацій на тему розробки ефективного мультифрактального генератора трафіку [17, 18]. При цьому на реальних даних фрактальна розмірність може як і зростати, так і спадати зі збільшенням часового масштабу [19].

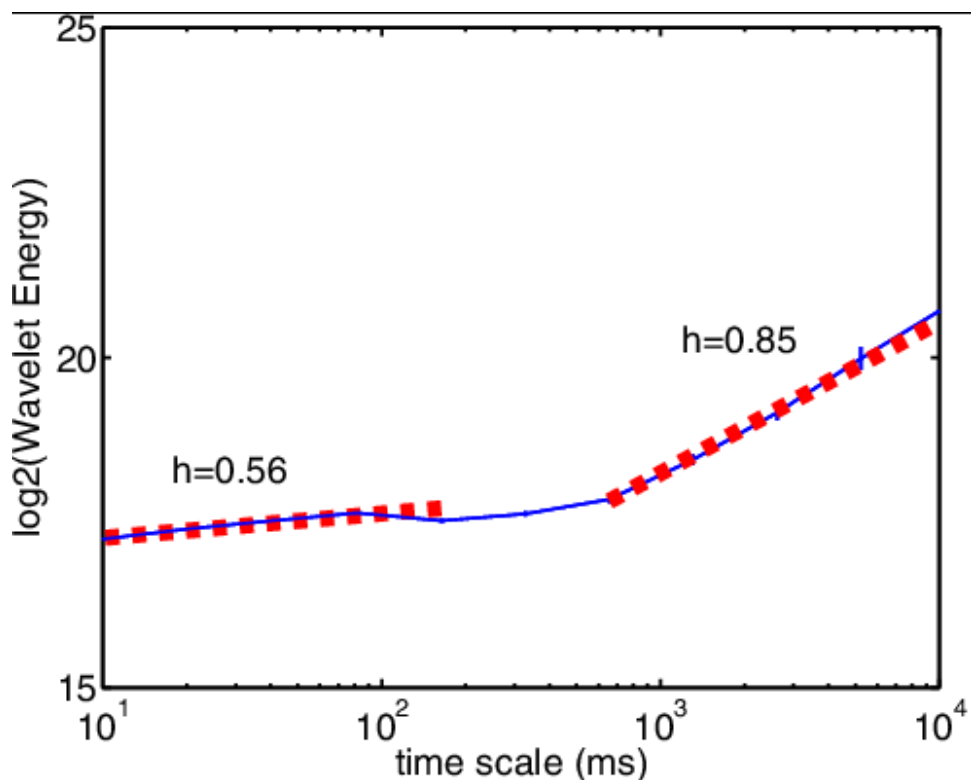


Рис. 2.7. Зміна показника Херста від масштабу в часі [17]

Для перевірки фрактальних властивостей генератора трафіку, розробленого у розділі 2.4, було проведено оцінювання показника Херста в

ході імітаційного експерименту. Імітаційний експеримент полягав у проведенні R/S-аналізу на генерованій бінарній послідовності. Одну з реалізацій методу R/S-аналізу описано в [20], і, з причини його низької точності, вимірювання проводиться 200 разів на різних реалізаціях послідовності.

З метою розкриття залежності показника Херста від довжини часткових (кумулятивних) сум при R/S-аналізі побудовано графік залежності показника Херста від довжини цих сум (рис. 2.8). Графік на рис. 2.8 містить два пучки кривих, де кожна крива відповідає одному експериментальному визначенню показника Херста з вказаним масштабуванням. Верхній пучок кривих відповідає експерименту вимірювання показника Херста при параметрах генератора G $p_0=p_1=0.9$, а нижній пучок кривих побудовано при $p_0=p_1=0.1$. Є очевидним збігання пучків до $H=0.5$ зі збільшенням довжини кумулятивних сум [22, 24].

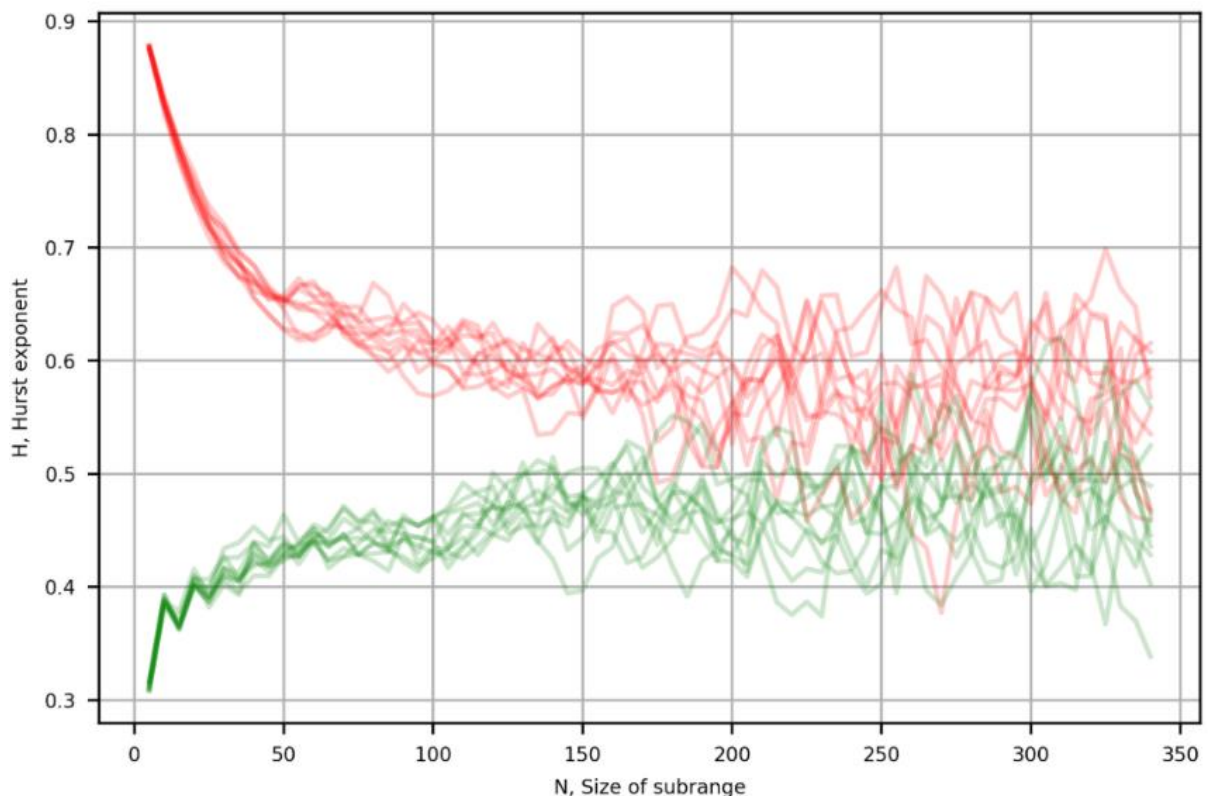


Рис. 2.8. Залежність показника Херста від довжини інтервалу N при R/S-аналізі

Практичні реалізації мультифрактального трафіку комп'ютерної мережі можуть відрізнятися на різних масштабах, тому за мету цієї роботи поставлено додавання механізму до генератора бінарного трафіку на основі стохастичного автомата G (рис. 2.9), який дозволив би керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах. Це значно розширить відповідність генерованих даних до реального трафіку мережі та розширить коло застосовності генератора.

З метою регулювання фрактальної розмірності генерованого трафіку автори пропонують на базі генератора G використовувати наступну каскадну модель генератора бінарного трафіку (рис. 2.9) [22, 24]:

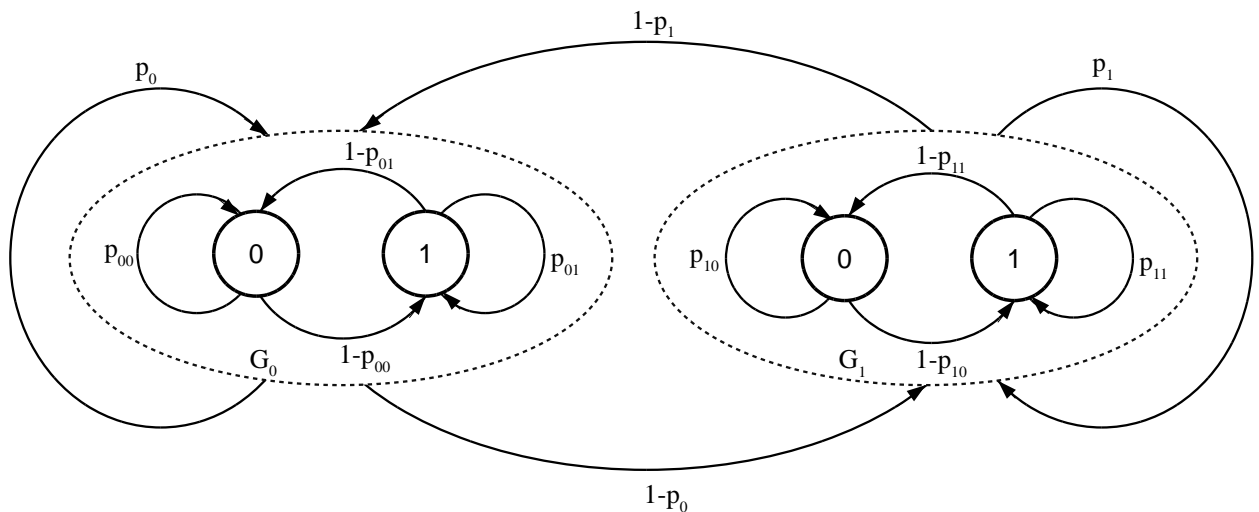


Рис. 2.9. Генератор мультифрактальної бінарної послідовності

Запропонований генератор є каскадним, містить зовнішній генератор G , який агрегує в собі генератори G_0 та G_1 . Завдяки цьому властивості генератора задаються наступними величинами: p_{00}, p_{01} – ймовірності залишити наступне значення незмінним для генератора G_0 ; p_{10}, p_{11} – ймовірності залишити наступне значення незмінним для генератора G_1 ; p_0, p_1 – ймовірності залишити наступну серію з d значень для того ж генератора G_i , що i в попередній серії.

Відповідно утворенню кумулятивних сум, генератори G_0 та G_1 повинні розрізнятися в досить тривалому часовому проміжку, що при однаковій інтенсивності генерованого трафіку за граничною теоремою не є можливим. Тому генератори налаштовують на генерування послідовностей з однаковою фрактальною розмірністю, але з різною інтенсивністю трафіку. З огляду на це, за балансування загальної інтенсивності трафіку на великому масштабі відповідає зовнішній генератор G , який в наведеному прикладі є симетричним, і завдяки цьому усереднює потоки з генераторів G_0 та G_1 .

З метою візуально оцінити утворені ряди на рис. 2.10 показано бінарний ряд, який агреговано по 25 відліків.

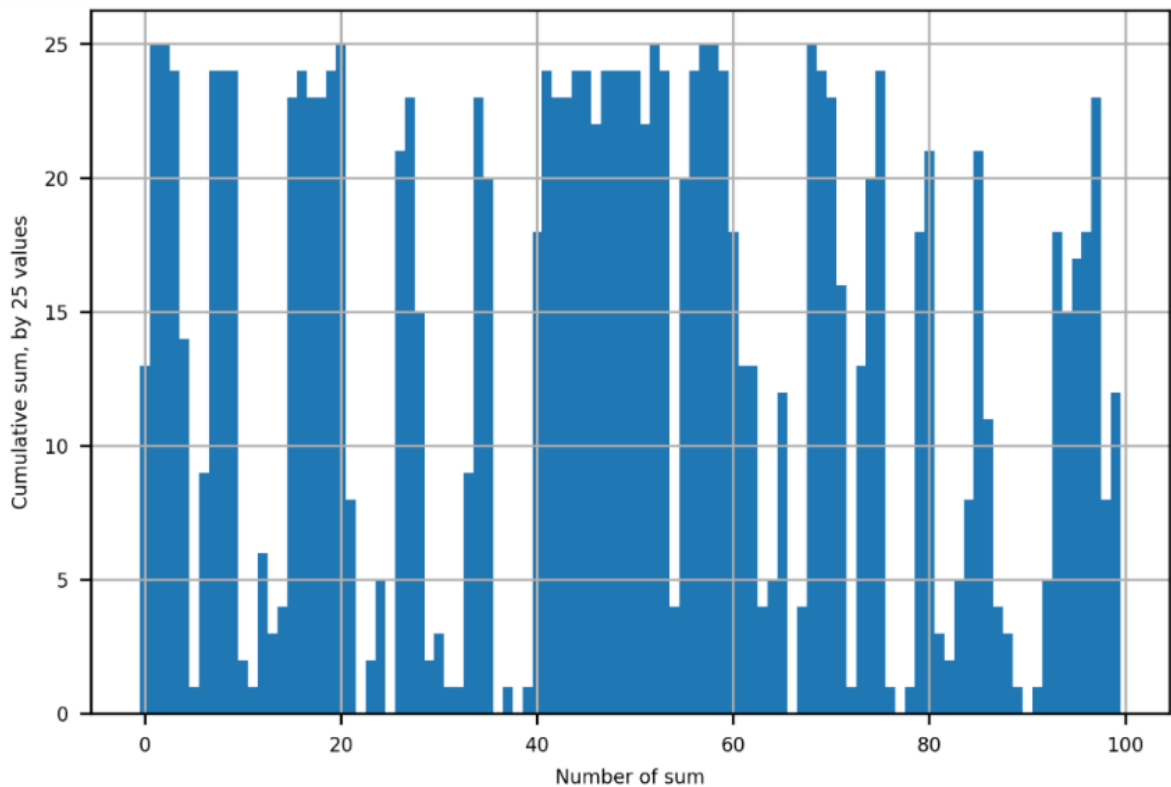


Рис. 2.10. Приклад генерованого каскадним генератором трафіку, який має персистентність на більш широкому часовому масштабі

Результат є характерним для пульсуючого трафіку високої інтенсивності $\tau=0.5$. Цей ряд отримано з наступними параметрами генерування (2.12):

$$d=10; p_0=0.9; p_1=0.9; p_{00}=0.95; p_{01}=0.15; p_{10}=0.15; p_{11}=0.95. \quad (2.12)$$

Наступна діаграма побудована аналогічно, але при наступних параметрах (2.13):

$$d=10; p_0=0.05; p_1=0.05; p_{00}=0.95; p_{01}=0.15; p_{10}=0.15; p_{11}=0.95. \quad (2.13)$$

Потрібно наголосити, що зміни відбулися лише для модулятора трафіку G (рис. 2.11):

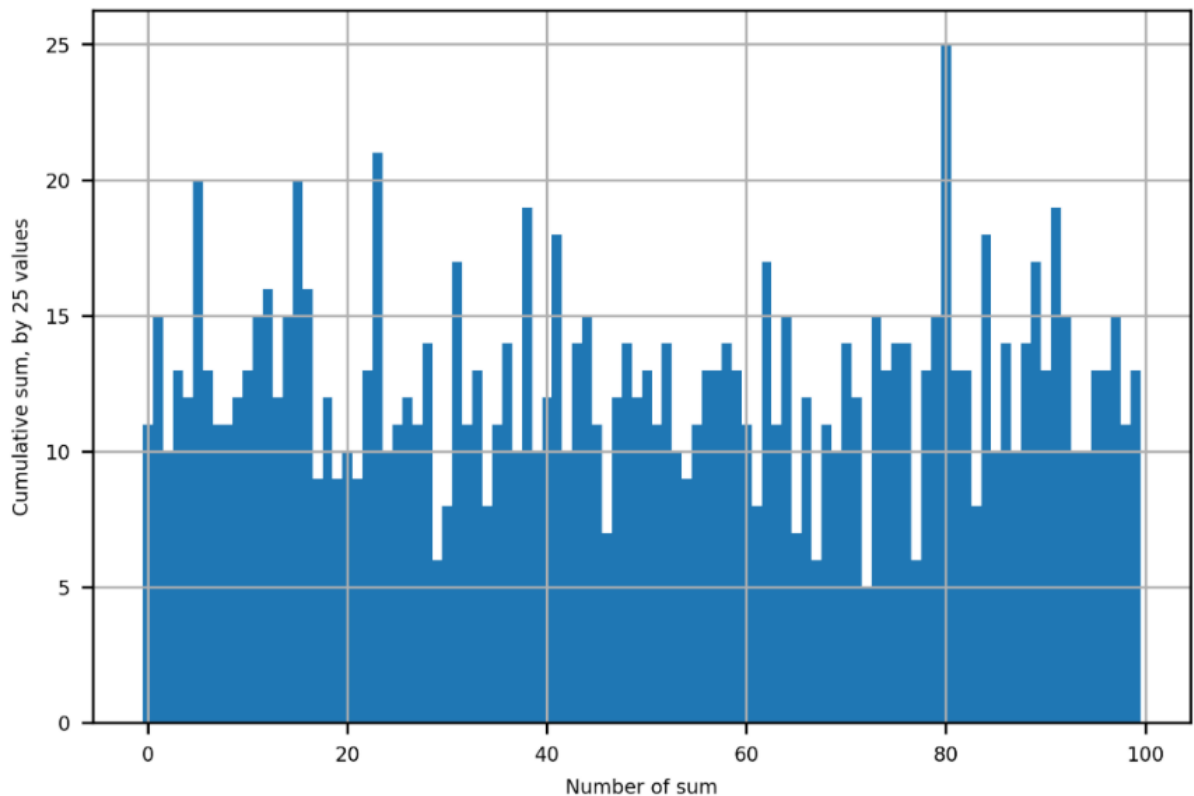


Рис. 2.11. Приклад генерованого каскадним генератором трафіку, який є персистентним та антиперсистентним на різному часовому масштабі

Крива залежності показника Херста $H(p)$ від ймовірності зміни наступного значення p , показана на графіку рис. 2.12. Графік містить три пучки кривих, які відповідають налаштуванням генератора (2.9), (2.10), які були вже наведені, і (2.14):

$$d=10; p_0=0.00; p_1=1.00; p_{00}=0.90; p_{01}=0.90; p_{10}=0.90; p_{11}=0.90. \quad (2.14)$$

Це означає, що модулятор переключається на роботу лише генератора G_1 , з параметрами $p_{10}=0.90$; $p_{11}=0.90$, і це відповідає роботі генератора G , без корегування фрактальної розмірності на більших часових ділянках. На рис. 2.12 це показано зеленим, середнім пучком кривих.

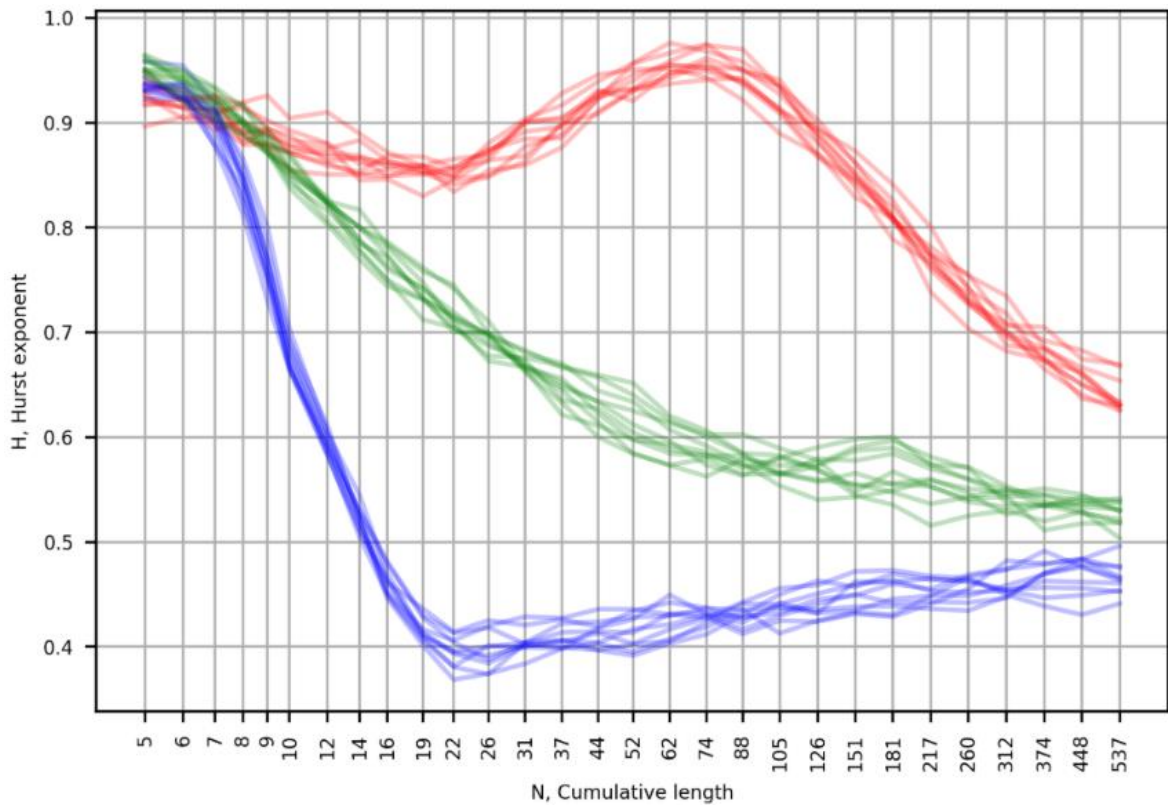


Рис. 2.12. Приклади залежності показника Херста від масштабу в часі для реалізацій каскадним генератором (верхній та нижній пучки кривих), та стандартним генератором (середній пучок кривих)

В результаті числового експерименту встановлено факт можливості регулювання показника Херста на заданому часовому масштабуванні. Отримані часові ряди за допомогою каскадного генератора бінарної послідовності мають мультифрактальні властивості. Тобто каскадний генератор має більше можливостей до підгонки до реальних прикладів бінарного трафіку.

Використання каскадного генератора є можливим лише при можливості його легкого налаштування, що фактично означає можливість

отримати коефіцієнти $d, p_0, p_1, p_{00}, p_{01}, p_{10}, p_{11}$ з прикладу реального трафіку. За визначенням ймовірності перебування однокаскадного генератора у положенні «1» (2.7), що за значенням збігається з інтенсивністю генерованого трафіку, можна виразити інтенсивності трафіку складових каскадного генератора [22]:

$$G(0) = \frac{1-p_1}{2-(p_0+p_1)}; G(1) = \frac{1-p_0}{2-(p_0+p_1)}, \quad (2.15)$$

де $G(1)$ відповідає ймовірності, що модулятор використовує перший генератор, а $G(0)$ – ймовірності використання нульового генератора.

Відповідні інтенсивності потоку для залежних генераторів можна виразити з (2.12) як (2.16):

$$\lambda_0 = \frac{1-p_{00}}{2-(p_{00}+p_{01})}, \lambda_1 = \frac{1-p_{10}}{2-(p_{10}+p_{11})}. \quad (2.16)$$

Завдяки відомим «часткам» роботи обох генераторів, G_0 та G_1 , можна виразити й загальну інтенсивність потоку для каскадного генератора (2.17):

$$\lambda = \frac{(1-p_1)}{2-(p_0+p_1)} \cdot \frac{1-p_{00}}{2-(p_{00}+p_{01})} + \frac{(1-p_0)}{2-(p_0+p_1)} \cdot \frac{1-p_{10}}{2-(p_{10}+p_{11})}. \quad (2.17)$$

За формулою (2.17) вираження інтенсивності потоку в трафіку залежить від шести параметрів, що свідчить про можливість змінювати властивості генерованого трафіку в широких межах. Але на практиці ця залежність мало застосовна, бо додатково потрібно тут зв'язати і фрактальну розмірність трафіку на двох часових масштабах, що ще не є вирішеною задачею.

2.6. Аналітичне дослідження фрактальних властивостей ряду, який отримано генератором на стохастичному скінченному автоматі

На жаль, статистичні методи знаходження дисперсії часткових сум генерованих послідовностей непридатні, бо статистичні методи передбачають незалежні випробування, а фрактальна послідовність не є такою. Процес генерування суми скінченим автоматом (з рис. 2.2) можна

для наочності розгорнути в схему, яку показано на рис. 2.13, генерування суми проводиться по схемі знизу догори.

Хоча представлення випадкових процесів у вигляді графів дозволяє застосувати методи пошуку аналітичних розв'язків (2.5), однак це стосується «протяжного» часу роботи системи, коли граф на рис. 2.13 не обмежений кількістю іспитів. Тому для пошуку фрактальної розмірності генерованих послідовностей потрібно обрати інші методи.

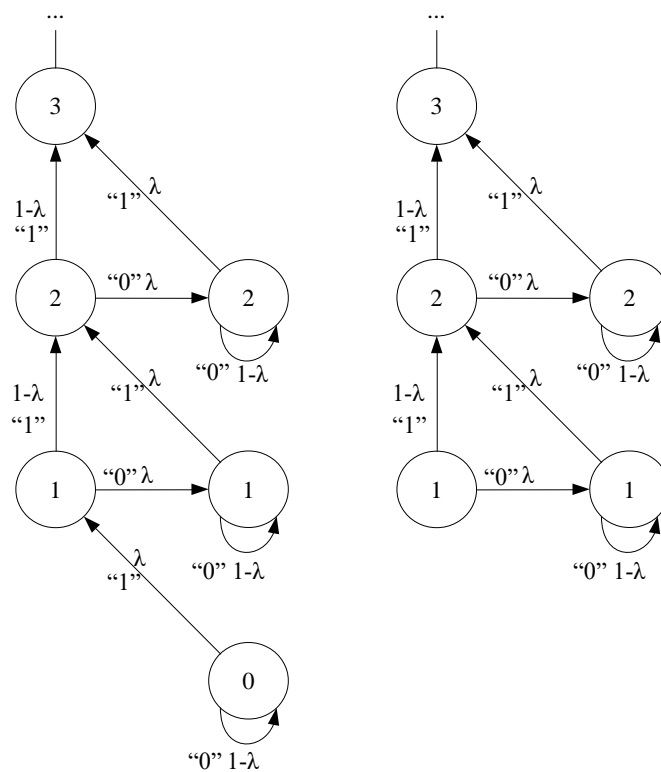


Рис. 2.13. Граф накопичення суми послідовних елементів при ймовірності зміни попереднього значення λ

Однією з характеристик фрактальності часового ряду є показник Херста. Він визначається за співвідношенням (2.18) [15, 17, 19, 20]:

$$M\left(\frac{R(S_n)}{\sqrt{D(S_n)}}\right) = Cn^H, \quad (2.18)$$

де використано позначення: $M(\dots)$ – математичне сподівання; $R(\dots)$ – розмах величини з вибірки, фактично це різниця між максимальним та мінімальним

значенням реалізації; $D(\dots)$ – дисперсія вибірки; n – кількість елементів вибірки; C – константа процесу; H – показник Херста, лежить в межах $[0..1]$.

Показник Херста можливо визначити, якщо мати часткові суми досліджуваного ряду для різних n . Проведемо оцінювання значення показника Херста з розбиттям ряду на часткові суми по $n=2$ та $n=3$ елементи. Для проведення розрахунків побудовано наступні таблиці (табл. 2.1, табл. 2.2) з ймовірністю змінити стан генератора на протилежний p .

Таблиця 2.1. Ймовірність утворення послідовностей генератором на графі $n=3$

№	Послідовність	Сума послідовності S_3	Ймовірність події
1.	0 0 0	0	$(1-p)^2/2$
2.	0 0 1	1	$(1-p) p/2$
3.	0 1 0	1	$p^2/2$
4.	0 1 1	2	$p(1-p)/2$
5.	1 0 0	1	$p(1-p)/2$
6.	1 0 1	2	$p^2/2$
7.	1 1 0	2	$(1-p) p/2$
8.	1 1 1	3	$(1-p)^2/2$

Таблиця 2.2. Ймовірність утворення послідовностей генератором на графі $n=2$

№	Послідовність	Сума послідовності S_2	Ймовірність події
1.	0 0	0	$(1-p)/2$
2.	0 1	1	$p/2$
3.	1 0	1	$p/2$
4.	1 1	2	$(1-p)/2$

В результаті отримано випадкові величини та їх ймовірності. Це дає змогу визначити їх математичні очікування $M(S_2)$ та $M(S_3)$:

$$M(S_2) = 0 \cdot (1-p)/2 + 1 \cdot p/2 + 1 \cdot p/2 + 2 \cdot (1-p)/2; \quad M(S_2) = 1. \quad R(S_2) = 2.$$

$$M(S_3) = 0 \cdot (1-p)^2/2 + 1 \cdot (1-p)p/2 + 1 \cdot p^2/2 + 2 \cdot p(1-p)/2 + 1 \cdot p(1-p)/2 + 2 \cdot p^2/2 + 2 \cdot (1-p)p/2 + 3 \cdot (1-p)^2/2;$$

$$M(S_3) = 3/2. \quad R(S_3) = 3.$$

Після визначення середніх значень знайдено дисперсії часткових сум:

$$D(S_2) = (0-1)^2 \cdot (1-p)/2 + (1-1)^2 \cdot p/2 + (1-1)^2 \cdot p/2 + (1-2)^2 \cdot (1-p)/2; \quad D(S_2) = 1-p.$$

$$D(S_3) = (0-3/2)^2 (1-p)^2/2 + (1-3/2)^2 (1-p)p/2 + (1-3/2)^2 p^2/2 + (2-3/2)^2 p(1-p)/2 + (1-3/2)^2 p(1-p)/2 + (2-3/2)^2 p^2/2 + (2-3/2)^2 (1-p)p/2 + (3-3/2)^2 (1-p)^2/2;$$

$$D(S_3) = 2p^2 - 4p + 9/4.$$

Тепер, скориставшись (2.18), отримаємо систему рівнянь (2.19):

$$\begin{cases} \frac{2}{\sqrt{1-p}} = C2^H, \\ \frac{3}{\sqrt{2p^2 - 4p + 9/4}} = C3^H. \end{cases} \quad (2.19)$$

Для знаходження показника Херста проведемо ділення рівнянь та логарифмування обох частин:

$$\ln \left(\frac{2\sqrt{2p^2 - 4p + 9/4}}{3\sqrt{1-p}} \right) = \ln \left(\left(\frac{2}{3} \right)^H \right).$$

Завдяки логарифмуванню маємо можливість винести показник за операцію логарифмування як множник, та виразити показник Херста (2.20):

$$H = \log_{2/3} \left(\frac{2\sqrt{2p^2 - 4p + 9/4}}{3\sqrt{1-p}} \right). \quad (2.20)$$

Валідація отриманих результатів

Аналогічно методу, як представлено в таблиці 2.1 та 2.2, також проведено виведення оцінювання розмаху та дисперсії для послідовності чотирьох генерованих чисел (2.21):

$$M(S_4) = 2; \quad R(S_4) = 4; \quad D(S_4) = 4(1-p)^3 + 2(1-p)p^2 + 2(1-p)^2p. \quad (2.21)$$

На основі (2.21) та до цього отриманих значень розмахів та дисперсій отримано аналітичні наближення критерію Херста через ймовірність зміни стану (2.22):

$$\begin{aligned}
H_{2/3}(p) &= 1 - \log_{2/3} \left(\frac{2\sqrt{2p^2 - 4p + 9/4}}{3\sqrt{1-p}} \right), \\
H_{2/4}(p) &= 1 - \log_{2/4} \left(\frac{2\sqrt{4(1-p)^3 + 2(1-p)p^2 + 2(1-p)^2 p}}{4\sqrt{1-p}} \right), \\
H_{3/4}(p) &= 1 - \log_{3/4} \left(\frac{3\sqrt{4(1-p)^3 + 2(1-p)p^2 + 2(1-p)^2 p}}{4\sqrt{2p^2 - 4p + 9/4}} \right). \quad (2.22)
\end{aligned}$$

Кожне із співвідношень, для випадку рівносильності випадковому процесу при $p=0.5$, дають величини передбачені експериментально: $H_{2/3}(0.5)=H_{2/4}(0.5)=H_{3/4}(0.5)=0.5$, що відповідає фрактальній розмірності $D=2-0.5=1.5$ і є розмірністю для випадкового процесу.

Причиною, що формули на кортежах різної довжини мають різні вираження, є логічним продовженням того, що персистентні ряди мають довгі залежності, що не можна виразити короткими кортежами з 2..4 елементів. Наочно це можна побачити з використанням дисперсії сум з шести елементів на графіку з рис. 2.14:

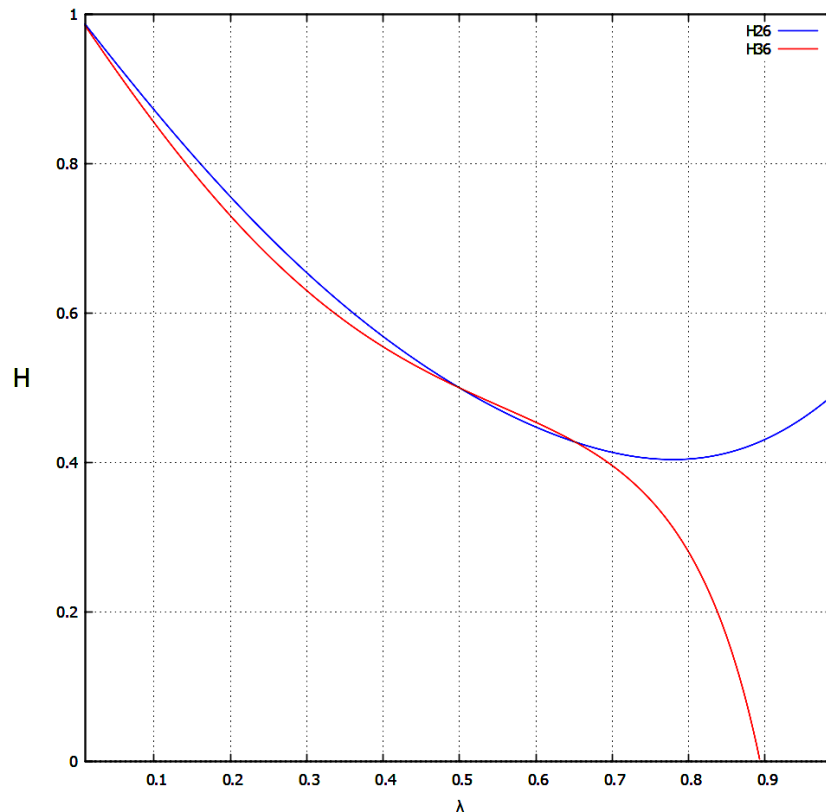


Рис. 2.14. Аналітичні наближення до оцінки критерію Херста та «катастрофа» для антиперсистентних рядів

Отримані співвідношення (2.22) можуть використовуватися для досить точної оцінки фрактальної розмірності генерованих бінарних послідовностей за допомогою генератора на скінченному автоматі. Оцінка є надійною для персистентних рядів, а для антиперсистентних рядів оцінка потребує вдосконалення (вдосконалення представлено в розділі 3).

2.7. Керування інтенсивністю генерованого трафіку на основі скінченного автомата

Інтенсивність трафіку комп'ютерної мережі може визначатися, в залежності від мети дослідження та методах захоплення передатчиком каналу зв'язку, по-різному. Тому далі використано поняття пакетної передачі інформації фіксованого об'єму. Відповідно до цього генерування пакетного трафіку відповідає бінарному сигналу, коли пункт призначення конкретного пакету в момент передачі в сегменті мережі не має значення, бо перенаправлення пакетів до споживачів в інші сегменти займається маршрутизатор. В такій інтерпретації достатнє визначення інтенсивності трафіку як ймовірності передачі пакету в даний квант часу $\tau \in [0, 1]$.

До цього моменту розглядався генератор трафіку, для якого $p(1)=p(0)$, тобто інтенсивність трафіку складала 0.5. Для проведення імітаційних дослідів та теоретичних пошуків необхідно мати можливість керувати інтенсивністю генерованих пакетів, тобто ймовірністю генерування «1»: $p(1)$.

Вище було отримано значення ймовірності $p(1)$ та $p(0)$, що записано співвідношеннями (2.7). За інтенсивність трафіку приймемо $\tau=p(1)$, і знайдемо коефіцієнти моделі генератора трафіку рис. 2.2: $p_{00}, p_{01}, p_{10}, p_{11}$. Для цього скористаємося відношеннями (2.8) й отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} 1 - \tau = \frac{p_{10}}{p_{01} + p_{10}}, \\ \tau = \frac{p_{01}}{p_{01} + p_{10}}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Однак система не має єдиного розв'язку. Наприклад, розглянемо дві реалізації генераторів послідовностей (рис. 2.15):

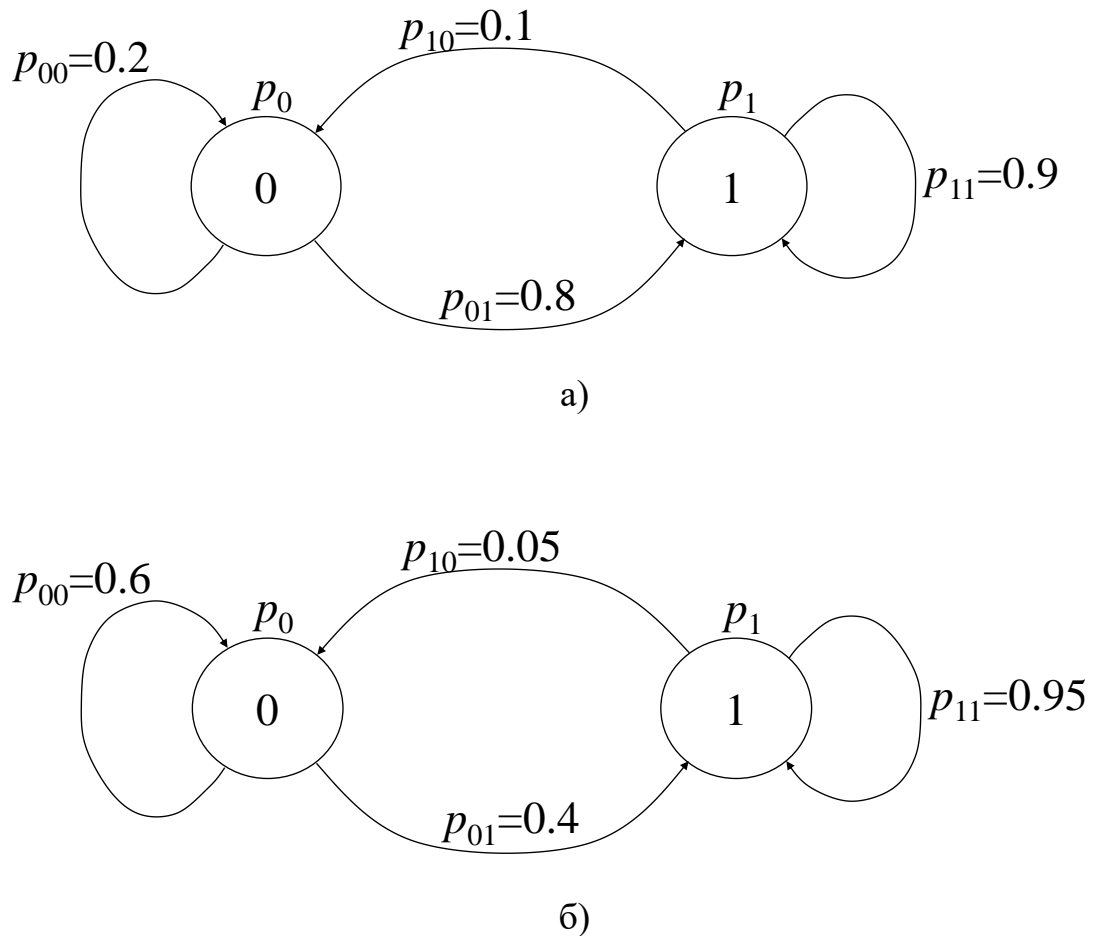


Рис. 2.15. Варіанти генераторів бінарних послідовностей однакової інтенсивності: а) варіант генератора з підвищеною ймовірністю зміни стану; б) варіант генератора зі зменшеною ймовірністю зміни стану

Як видно з рис. 2.15, інтенсивності потоку одиничних бітів $\tau=0.8/(0.8+0.1)=0.4/(0.4+0.05)=8/9$. Тобто, реалізації генераторів мають однакові значення ймовірності перебування в одиничному стані. Однак ймовірності залишитися в поточному стані й наступного кроку більші в реалізації генератора б): $0.6 > 0.2$, $0.95 > 0.9$ відповідно. Завдяки цьому генератор б) видає на вихід більш персистентний ряд. Порівняємо роботу генераторів за результатами побудованих послідовностей (рис. 2.16, 2.17).

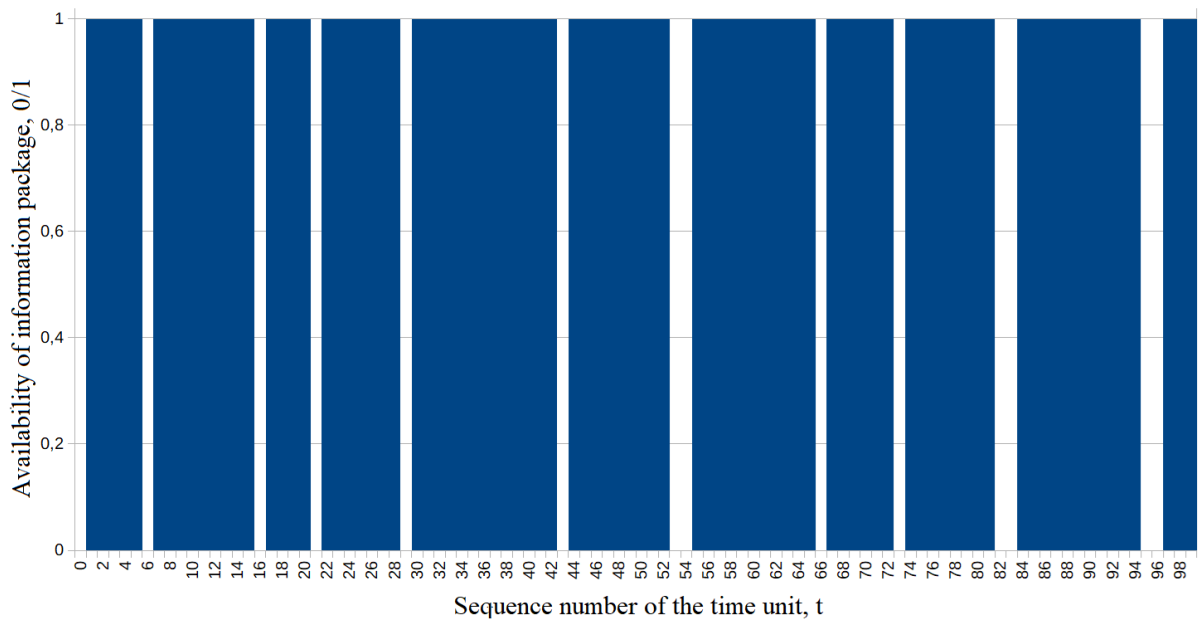


Рис. 2.16. Результат генерування 100 бітів генератор а), ($\tau=8/9$)

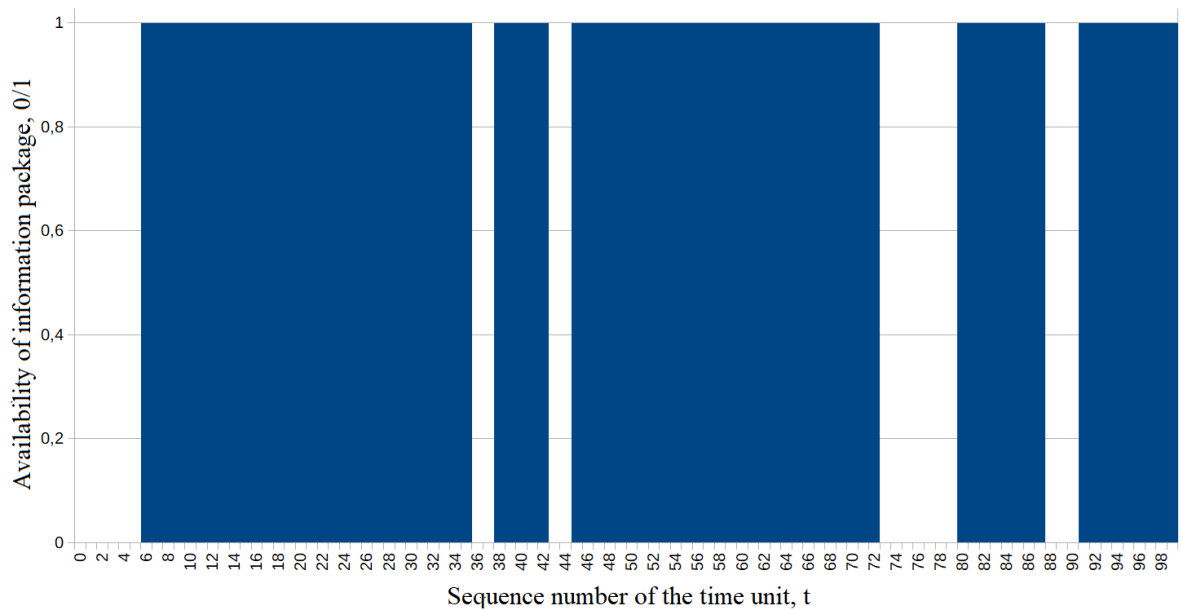


Рис. 2.17. Результат генерування 100 бітів, генератор б), ($\tau=8/9$)

Відповідно до минулих прикладів генерування послідовностей з інтенсивністю $\tau=0.5$, дві послідовності бітів, зображених на рис. 2.16 та 2.17, мають однакову інтенсивність трафіку, але мають різну фрактальну розмірність. Оцінки фрактальної розмірності критерієм Херста за формулами

(2.22) тут не є дійсними. Тому для однозначного визначення параметрів p_{01} , p_{10} зафіксуємо їх суму (2.24):

$$g = p_{01} + p_{10}, 0 < g < 2, \quad (2.24)$$

тоді система (2.23) матиме єдиний розв'язок. В результаті доповнення системи (2.23) маємо наступні вирази для пошуку ймовірностей переходів (2.25):

$$\begin{aligned} p_{01} &= g\tau, \\ p_{10} &= g(1-\tau), \\ p_{00} &= 1 - p_{01}, \\ p_{11} &= 1 - p_{10}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Але для пошуку за (2.25) потрібно врахувати, що не для кожного обраного $0 < g < 2$ можливо реалізувати інтенсивність трафіку τ . Потрібно посилити обмеження щодо вибору g :

$$\begin{cases} 0 < g < 1/\tau, \\ 0 < g < 1/(1-\tau). \end{cases} \quad (2.26)$$

Тоді при фіксуванні суми (2.24) співвідношення (2.25) з урахуванням додаткових обмежень (2.26) дають змогу визначити однозначно коефіцієнти генератора p_{00} , p_{01} , p_{10} , p_{11} [27].

2.8. Визначення показника Херста R/S-аналізом для часових рядів, створених запропонованим генератором фрактального трафіку

Оцінювання показника Херста. Імітаційний експеримент полягає в проведенні R/S-аналізу на генерованій бінарній послідовності. Одну з реалізацій методу R/S-аналізу описано в [20], і з причини його низької точності, вимірювання проводиться 200 разів на різних реалізаціях послідовності. В результаті експерименту отримується 200 значень показника Херста, які відображені на графіках рис. 2.18 та рис. 2.19, при ймовірностях залишити стан незмінним значення 0.1 та 0.9 відповідно.

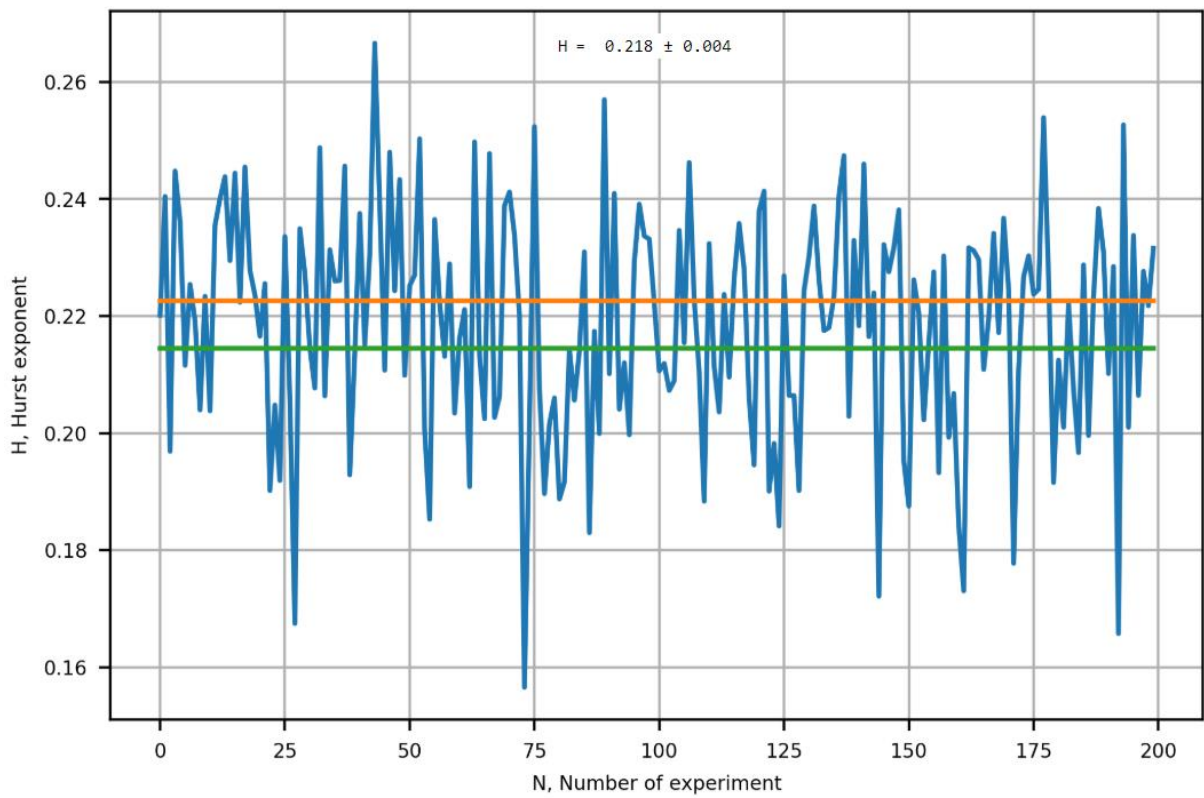


Рис. 2.18. Вимірювання показника Херста на серіях 5, 10, 15, 20 відліків,
 $p_{00}=p_{11}=0.1$

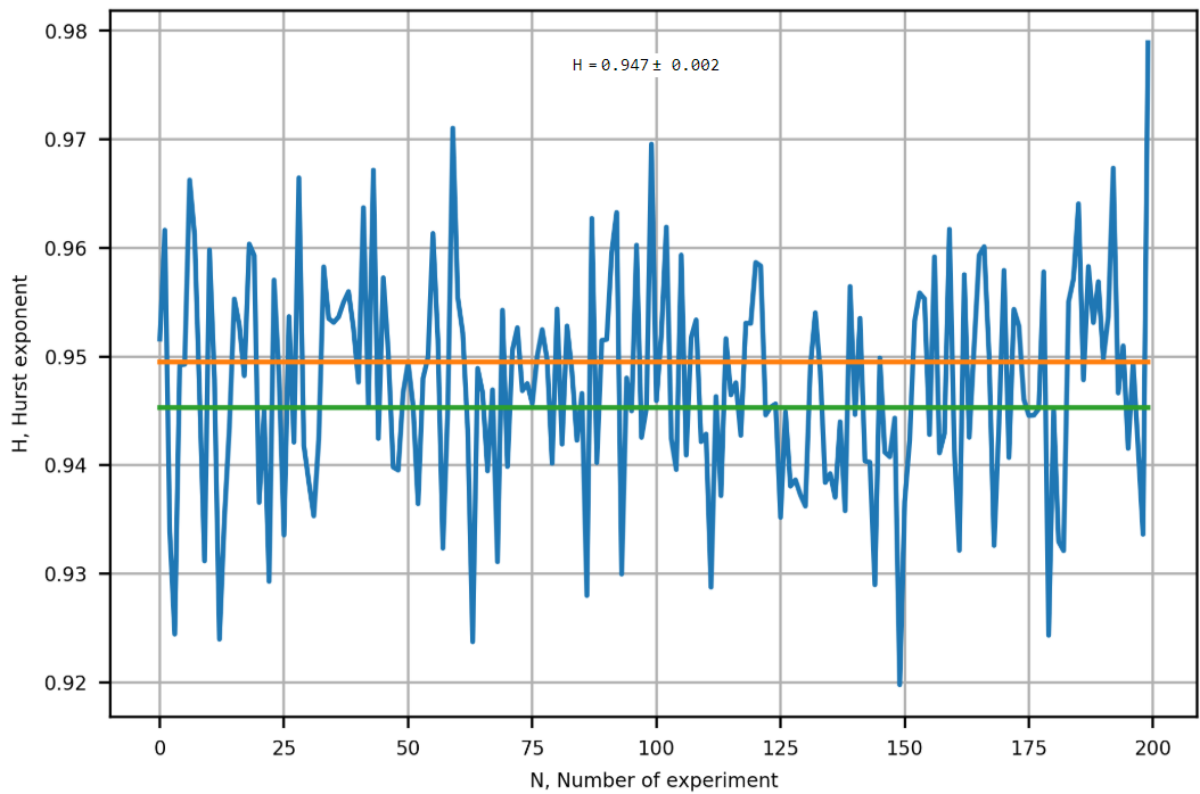


Рис. 2.19. Вимірювання показника Херста на серіях 5, 10, 15, 20 відліків,
 $p_{00}=p_{11}=0.9$

На рис. 2.19 та рис. 2.20 видно, відповідно ймовірності залишити наступне значення рівним попередньому не змінює інтенсивність потоку «1», але при цьому сильно змінюється ймовірність отримання довгих ланцюгів з «0» та «1». При високій ймовірності дістати наступне число рівним попередньому $p_{00}=p_{11}=0.9$, отримаємо ряд, який намагається зберегти тенденцію – персистентний ряд (рис. 2.20) з показником Херста $H=0.947\pm 0.002$. У випадку високої ймовірності отримати наступне число, протилежне попередньому ($p_{00}=p_{11}=0.1$), – матимемо антиперсистентний ряд з показником Херста $H=0.218\pm 0.004$.

За зв'язком фрактальної розмірності з показником Херста можна показати що (2.27) [22]:

$$H(p) = \frac{p \log(p)}{1-p}, \quad (2.27)$$

де $p=p_{00}=p_{11}$. Криву залежності показника Херста $H(p)$ від ймовірності зміни наступного значення p показано на графіку рис. 2.20:

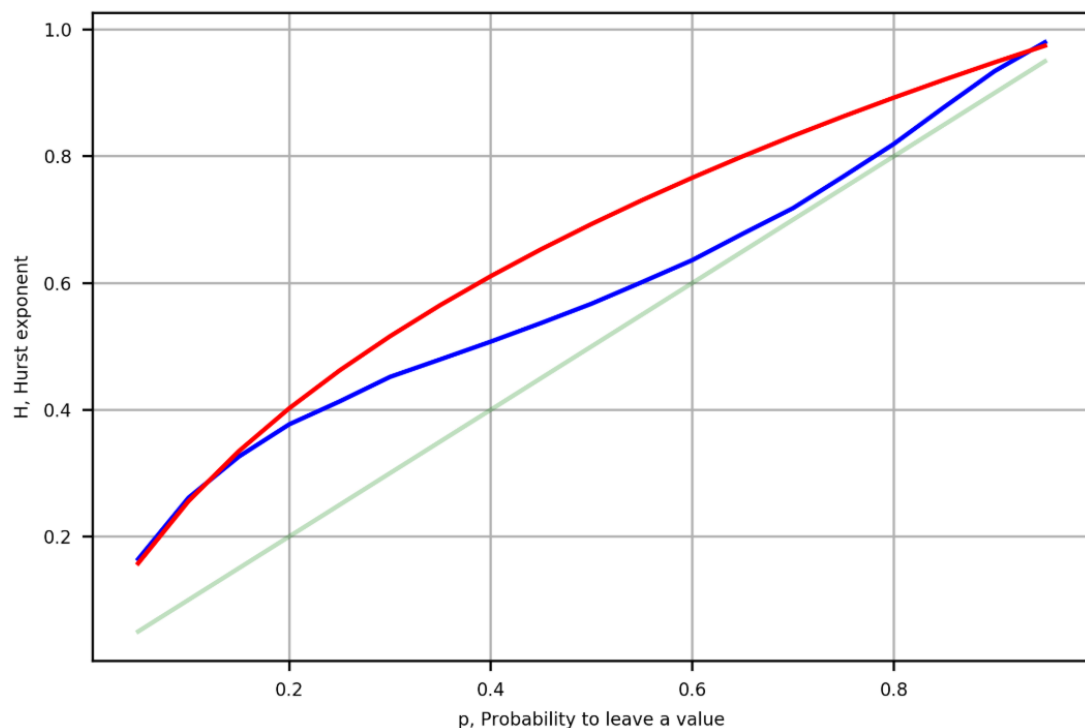


Рис. 2.20. Теоретична залежність (верхня червона крива) та практично виміряна залежність (синя крива) показника Херста від ймовірності p повторного генерування символу генератором G

Оцінювання показника Херста при різних масштабах у часі.

Було проведено оцінювання показника Херста для часового ряду мережевого трафіку при різних масштабах у часі. Для генерованого бінарного ряду фрактальна розмірність є залежною від довжини серії, для якої проводять R/S-аналіз. Наприклад, при попередніх умовах, що побудовані графіки на рис. 2.18 та 2.19, збільшення масштабування, коли розмах та дисперсія шукається не на проміжках 5-20 відліків, а на проміжках в 450-600 відліків, приводить до результатів значення показника Херста $H(0.1) \approx H(0.9) \approx 0.5$.

Результат експерименту, який демонструє «виродження» показника Херста до 0.5, показано на рис. 2.21 та рис. 2.22.

При побудові графіку, зображеного на рис. 2.21, використовувався генератор G з ймовірностями залишити попереднє значення без змін $p_{00}=p_{11}=0.1$, що повинно давати в результаті сильно виражену антиперсистентність. Однак на графіку з рис. 2.21 є очевидним, що при агрегуванні кумулятивних сум по 450, 500, 550, 600 відліків показник Херста є близьким до 0.5. Тобто, на вказаному часовому масштабі генерована послідовність не відрізняється від випадкового часового ряду, в якому наступний елемент не залежить від попереднього. Це є показником справедливості центральної граничної теореми, коли при збільшенні кількості членів накопичувальних сум числового ряду ці суми все ближче підлягають нормальному розподілу [22].

Аналогічний вплив наближення розподілу значень накопичувальних (кумулятивних) сум до нормального розподілу спостерігається і для персистентного часового ряду з високою ймовірністю повторити попереднє значення $p_{00}=p_{11}=0.9$, що видно з рис. 2.22 як зменшення показника Херста з 0.95 до 0.55.

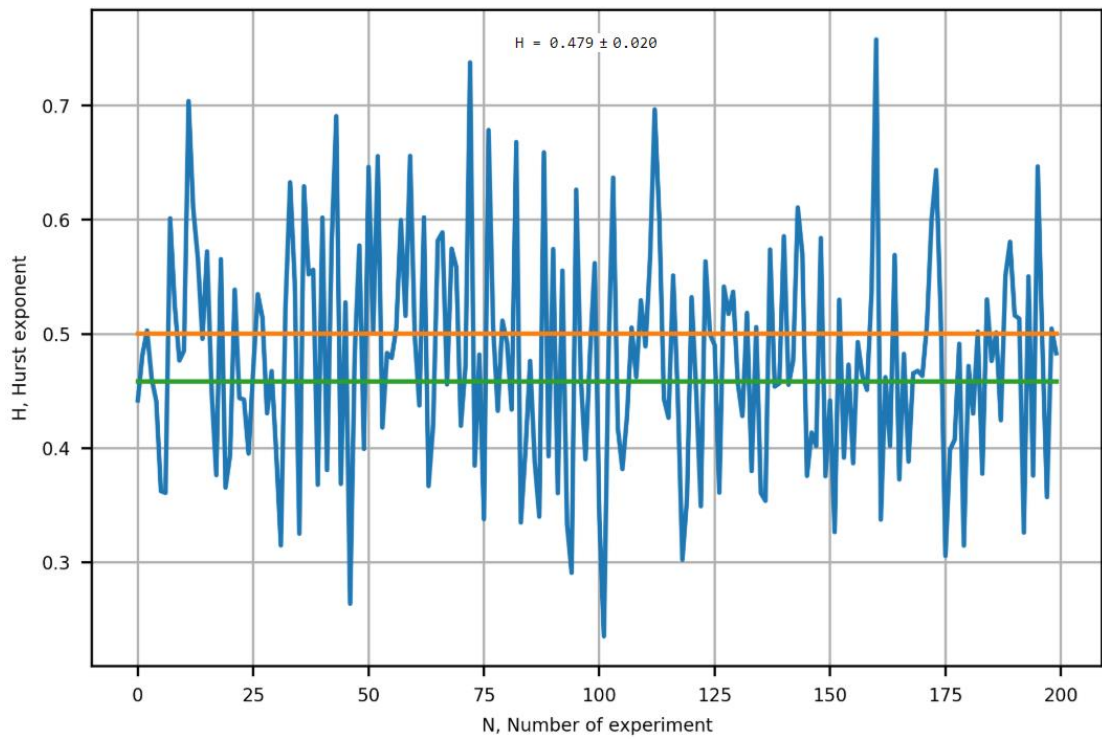


Рис. 2.21. Вимірювання показника Херста на серіях 450, 500, 550, 600 відліків, $p_{00}=p_{11}=0.1$

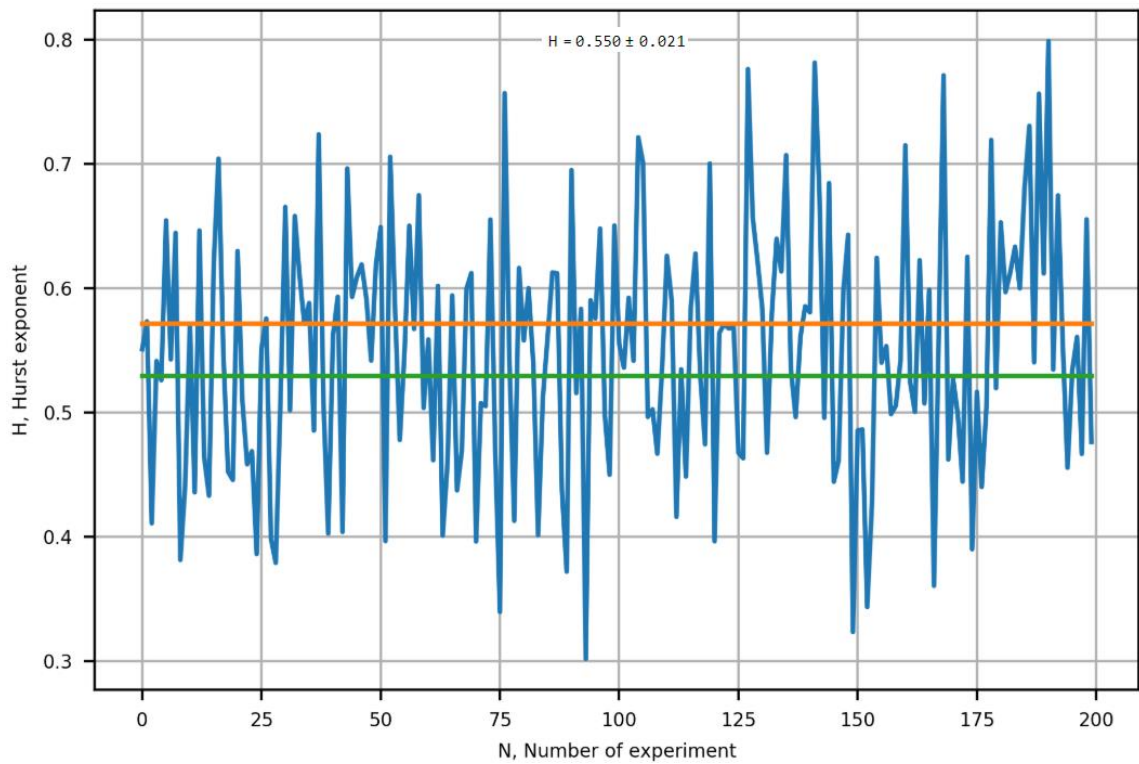


Рис. 2.22. Вимірювання показника Херста на серіях 450, 500, 550, 600 відліків, $p_{00}=p_{11}=0.9$

В результаті числового експерименту встановлено факт можливості регулювання показника Херста на заданому часовому масштабуванні. Таким чином, задача задання фрактальної розмірності генерованого трафіку є коректною задачею та може бути вирішена підбором ймовірностей переходів, які є параметрами генератора.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі запропоновано удосконалену математичну модель мережевого фракталоподібного трафіку, яка відрізняється від відомих представленням трафіку на рівні “пакет є” – “пакета немає” на вході маршрутизатора та запропонованими ланцюгами Маркова, які описують ймовірності станів генератора трафіку як стохастичного скінченного автомата, що дало змогу одержати рівняння для імітаційного моделювання фрактального та мультифрактального трафіків.

Також запропоновано удосконалений метод генерації мережевого фрактального трафіку, який відрізняється від відомих можливістю налаштовувати фрактальну розмірність та інтенсивність трафіку перед його генерацією, а отже, моделювати різні типи трафіку.

Проведено експериментальні дослідження статистичних властивостей генерованих часових рядів на основі запропонованої математичної моделі фракталоподібного трафіку.

Досліджено способи керування інтенсивністю генерованого трафіку на основі скінченного автомата.

Генератори самоподібного трафіку на ланцюгах Маркова відрізняються від аналогів меншими вимогами до обчислювальної потужності систем моделювання, що дозволяє підвищити продуктивність імітаційного моделювання руху інформації в телекомунікаційних системах та комп’ютерних мережах, тому актуальним є подальший розвиток та вивчення таких систем.

Список літератури до розділу 2

1. Vassiliou P.-C.G., Georgiou A. C. Markov and semi-Markov chains, processes, systems and emerging related fields. *Mathematics*. 2021. 294 p. DOI: 10.3390/math9192490.
2. Farahani A., Shoja A., Tohidi H. Markov and semi-Markov models in system reliability. *Engineering Reliability and Risk Assessment*. Elsevier. 2023. P. 91–130. DOI: 10.1016/B978-0-323-91943-2.00010-1.
3. Analysis of the queueing-inventory system with impatient customers and mixed sales / Y. Zhang, D. Yue, L Sun., J. Zuo. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. Vol. 2022. DOI: 10.1155/2022/2333965.
4. Developing a model of the dynamics of states of a recommendation system under conditions of profile injection attacks / Ye. Meleshko, O. Drieiev, M. Yakymenko, D. Lysytsia. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, no. 2 (106). P. 14–24. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096707995&origin=resultslist>.
5. Dimitrakos T. D., Kyriakidis E. G. A semi-Markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous repair times. *International Journal of Production Economics*. 2008. Vol. 111, no. 2. P. 752–762. DOI: 10.1016/j.ijpe.2007.03.010.
6. Li Q.-L., Lui J. C. S. Block-structured supermarket models. *Discrete Event Dynamic Systems*. 2014. Vol. 26, no. 2. P. 147–182. DOI: 10.1007/s10626-014-0199-1.
7. Okamura H., Miyata S., Dohi T. A Markov decision process approach to dynamic power management in a cluster system. *IEEE Access*. 2015. Vol. 3. P. 3039–3047. DOI: 10.1109/access.2015.2508601.
8. Li Q.-L. Nonlinear Markov processes in big networks. *Special Matrices*. 2016. Vol. 4, no 1. DOI: 10.1515/spma-2016-0019.
9. Feinberg E. A., Yang F. Optimal pricing for a GI/M/k/N queue with several customer types and holding costs. *Queueing Systems*. 2015. Vol. 82, no. 1–2. P. 103–120. DOI: 10.1007/s11134-015-9457-7.

10. Ma C., Dai G., Zhou J. Short-term traffic flow prediction for urban road sections based on time series analysis and LSTM_BILSTM method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 23, no. 6. P. 5615–5624. DOI: 10.1109/TITS.2021.3055258. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9364926>.
11. Dymora P., Mazurek M. Influence of model and traffic pattern on determining the self-similarity in IP networks. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 1 (190). DOI: 10.3390/app11010190. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/190>.
12. Phinyomark A., Larracy R., Scheme E. Fractal analysis of human gait variability via stride interval time series. *Front Physiol*. 2020. Vol. 11. DOI:10.3389/fphys.2020.00333. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32351405/>.
13. Millán G. Traffic Flows Analysis in High-Speed Computer Networks Using Time Series. *arXiv preprint arXiv:2103.03984*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.03984>.
14. Feldmann A., Gilbert A. C., Willinger W. Data networks as cascades: investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic. *Proc. of the ACM SIGCOMM '98 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM '98)*. Association for Computing Machinery. New York, NY, USA, 1998. P. 42–55. DOI: 10.1145/285237.285256.
15. Bassingthwaite J. B., Raymond G. M. Evaluating rescaled range analysis for time series. *Annals of Biomedical Engineering*. 1994. Vol. 22. P. 432–444. DOI: /10.1007/BF02368250. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02368250#citeas>.
16. Anderson T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 4th ed: CRC Press, 2017. 688 p. DOI: 10.1201/9781315370293.
17. Millána G., Lefranc G. A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks. *Information Technology and*

Quantitative Management (ITQM2013) Procedia Computer Science. 2013. Vol. 17. P. 420–425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.054>.

18. Areström E., Carlsson N. Early online classification of encrypted traffic streams using multi-fractal features. *IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. 2019. P. 84–89. DOI: 10.1109/INFCOMW.2019.8845127.

19. Ribeiro V. J., Zhang Z.-L Christophe Diot small-time scaling behavior of Internet backbone traffic. *Computer Networks*. 2005. Vol. 48, no. 3. P. 315–334. DOI: 10.1016/j.comnet.2004.11.012.

20. GitHub - Mottl/hurst: Hurst exponent evaluation and R/S-analysis in Python. URL: <https://github.com/Mottl/hurst>.

21. Method of fractal traffic generation by a model of generator on the graph / H. Drieieva, O. Smirnov, O. Drieiev et al. *Control, Optimisation and Analytical Processing of Social Networks: CEUR-WS, Lviv, Ukraine / Solomiia Fedushko, Thierry Oscar Edoh (Eds)*. 2020. Vol. 2616. P. 3–379 (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2616/paper31.pdf>.

22. Managing multifractal properties of the binary sequence generated with the Markov chains / H. Drieieva, O. Smirnov, O. Drieiev et al. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019): CEUR-WS, Zaporizhzhia, Ukraine / Sergey Subbotin (Ed.)*. 2020. Vol. 2608. P. 633–645. (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper49.pdf>.

23. Multifractal properties of traffic generator based on Markov chains / V. Simakhin, S. Bondar, H. Drieieva et al. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019): Proc. of the Int. Workshop, (Lviv, Ukraine, Nov. 29, 2019) /Solomiia Fedushko (Ed.)*. 2019. Vol. 2588. P. 567–579. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2588/paper48.pdf>.

24. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова / Г. М. Дреєва, О. М. Дреєв, Є. В. Мелешко, І. В. Миронець. *Вісник Черкаського державного*

технологічного університету. 2022. № 4. С. 58–66. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2022.269137. URL: <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/269137>.

25. Дреєва Г. М. Метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, 2022. Т. 4, № 70. С. 75–78. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.075. URL: <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2757>.

26. Computer simulation model of a computer network with fractal traffic for testing routing algorithms / H. Drieieva, Ye. Meleshko, O. Drieiev, V. Mikhav. *Advanced Information Systems*. 2022. No. 6 (4). P. 11–18. DOI: 10.20998/2522-9052.2022.4.02. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/268306>.

27. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Метод генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 1 (32). С. 173–183. URL: http://mariea.kntu.kr.ua/archive/32/32_Hanna.html. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).173-183.

28. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Метод генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та інформаційні технології: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка*. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2019. С. 123–139.

29. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Дослідження мультифрактальних властивостей генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова *Кібербезпека та інформаційні технології: монографія*. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 93–105.

30. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Миронець І. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією фракталоподібного трафіку. *Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій (ІПШРІТ-2022): зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., (Черкаси, 9 груд. 2022 р.) / упоряд.: Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко; М-во*

освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 53–54.

31. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Міхав В. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., (Кропивницький, 10–11 листоп. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2022. С. 44–45.

32. Modeling heavy tails in traffic sources for network performance evaluation / V. Ramaswami, K. Jain, R. Jana, V. Aggarwal. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, New Delhi, 2014. Vol. 246. P. 23–44. DOI: 10.1007/978-81-322-1680-3_4.

33. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Реалізація генератора фрактального трафіку в системах імітаційного моделювання. *Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2019*: матеріали XXVII Міжнар. наук.-практ. конф.: у 4 ч., (Харків, 15–17 трав. 2019 р.) / ред. Є. І. Сокол. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Ч. 4. С. 146.

34. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., (Харків, 24–25 квіт. 2019 р.) / ред. С. П. Євсєєв. Харків: ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2019. С. 27.

35. Drieieva H., Smyrnov O., Drieiev O. Method of generating fractal traffic for conducting numerical experiments on simulating load in a computer network. *Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives (MIMCS 2019)*: Materials of the 1st Int. Sci.-Pract. Conf., (Baku, Azerbaijan, July 01–02, 2019) / Azerbaijan State Oil and Industry University (ASOIU). Baku: ASOIU, 2019. P. 32–33.

36. Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Розробка методу імітаційного моделювання мережевого трафіку з фрактальними властивостями. *Цифрова трансформація суспільства: зб. тез доп. I Міжнар. наук.-практ. конф.*, (Кропивницький, 21–22 квіт. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 100.

37. Дреєва Г. М., Смірнов С. А., Коноплицька-Слободенюк О. К. Дослідження генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова та його мультифрактальних властивостей. *Інформаційна безпека та інформаційні технології: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф.*, (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 35.

РОЗДІЛ 3

МЕТОД АНАЛІЗУ МЕРЕЖЕВОГО ФРАКТАЛОПОДІБНОГО ТРАФІКУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ

У цьому розділі запропоновано метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку для визначення його фрактальної розмірності. Проведено експерименти для визначення якості роботи запропонованого методу та порівняння його з відомим методом R/S-аналізу.

В сучасних роботах для оптимізації роботи комп'ютерних та телекомунікаційних систем та мереж обов'язковим є врахування фрактальної природи трафіку в Інтернет-мережі [1-6]. Врахування фрактальності дозволяє значно краще прогнозувати та моделювати параметри системи до дійсних значень, адже у природніх та технічних процесів тією чи іншою мірою наявна властивість фрактальності [1-6, 8], тому визначення фрактальної розмірності є актуальною та важливою задачею. Відомі критерії, за якими визначають фрактальну розмірність, мають значні похибки та відхилення для окремих реалізацій, тому доцільним є отримувати нові методи оцінювання фрактальних характеристик досліджуваних сигналів.

Окремі оглядові публікації, в яких розглянуто та проведено порівняння кількох методів, використовують визначення фрактальної розмірності окремих короткочасних реалізацій, на основі яких визначають властивості сигналу [7, 10, 11, 13]. Але існують випадки наявності ергодичного сигналу з відомим теоретичним обґрунтуванням його функції розподілу густини ймовірності. В таких випадках короткі реалізації мають високу ймовірність до відхилень, але такі реалізації дозволяють оцінювати вагові коефіцієнти відомого розподілу ймовірності. Саме в цих випадках корисно мати засоби визначення фрактальної розмірності на основі функції розподілу ймовірності, що і є метою проведеного у цьому розділі дослідження.

3.1. Розробка методу аналізу мережевого фракталоподібного трафіку для визначення його фрактальної розмірності

У процесах передачі інформації в комп'ютерних системах та мережах широко використовують пошук фрактальної розмірності трафіку мережі. Для цього використовують різні методи та підходи, спрямовані на зменшення випадкових відхилень при проведенні розрахунків на відносно малих реалізаціях часових рядів [9-12]. В умовах дефіциту вхідних даних значно можуть покращити ситуацію додаткові дані про природу часового ряду, який досліджується. Наприклад, за допомогою теоретичних обґрунтувань для моделювання часових рядів їх реалізацію побудовано на основі випадкових процесів із заданими розподілами ймовірності, такі як Пуасонівський процес [15, с. 32], ланцюги Маркова [15, с. 89], черги на основі процесу Парето [14] та інші. Кожен із розподілів має власну сферу застосування та обґрунтовується на основі прийнятих гіпотез та експериментальній перевірці на довгих реалізаціях. Проте реальні процеси мають лише наближені до теоретичних розподіли; варто лише нагадати, що теоретичне надходження кількості даних за одиницю часу обмежено пропускною здатністю вхідного каналу мережі. Тому покращити наближення можна, врахувавши реальні розподіли ймовірності, які отримано експериментальним шляхом.

Виходячи з наведеного вище, була поставлена задача отримання математичного співвідношення для отримання очікуваного значення фрактальної розмірності числової послідовності на основі знання розподілу густини ймовірності $p(x)$.

Для розподілу густини ймовірності $p(x)$ справедливі наступні співвідношення:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1, p(x) \geq 0, M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x)dx, \quad (3.1)$$

де $M(x)$ – математичне очікування випадкової величини x . Числова послідовність складається з ряду реалізацій x_i , де i є порядковим номером елемента.

За означенням, розмірність Мінковського це є значення наступної межі:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N_\varepsilon)}{-\ln(\varepsilon)},$$

де ε є діаметром елементу покриття, та N_ε – їх кількість. На практиці геометрично задачу розв’язують покриттям досліджуваної фігури квадратами (кубами), де за діаметр приймається його сторона. В [34] наведено варіант, при якому покриття замінюється прямокутниками шириною ε та висотою, яка є мінімальною для покриття ділянки графічного представлення числового ряду (рис. 3.1).

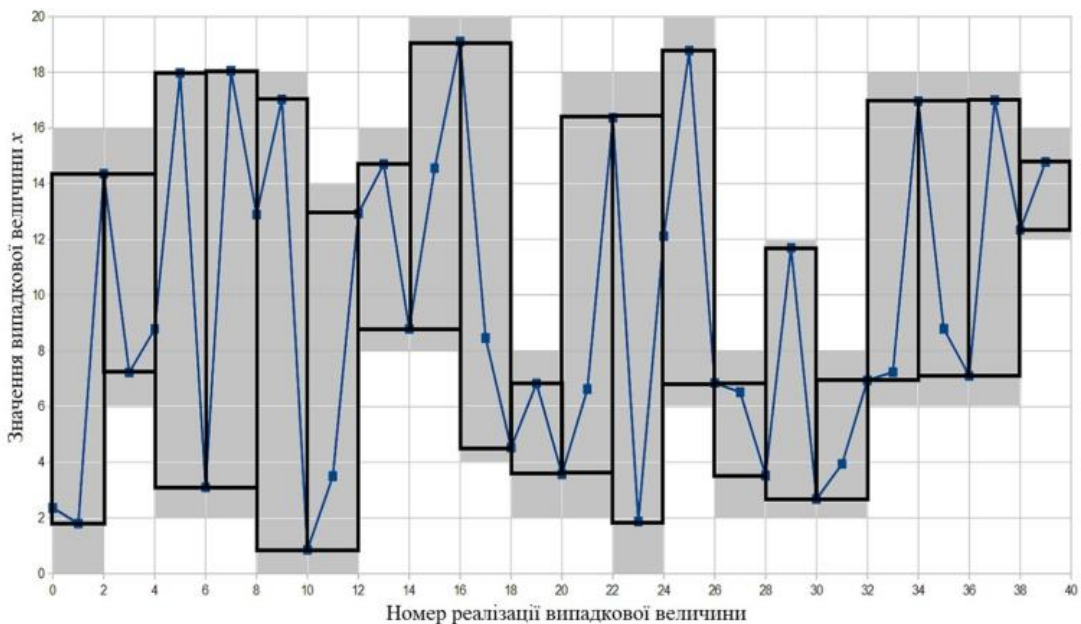


Рис. 3.1. Демонстрація результату покриття прямокутниками та квадратами

При використанні прямокутників кількість фігур покриття замінюється площею покриття:

$$S(\varepsilon) = \sum_{k=0}^{N_\varepsilon} h_k, \quad (3.2)$$

де h_k є висотою відповідного прямокутника k [34].

Якщо прийняти $\varepsilon > 1$ за кількість дискретних відліків числового ряду x_i , тоді h_k шукається за наступним алгоритмом:

$$h_k = \max(x_i) - \min(x_i), \text{ де } i = k\varepsilon, \dots, (k+1)\varepsilon - 1 \quad (3.3)$$

З рис. 3.2 видно, що для похилої прямої покриття зі зменшенням ε в два рази зменшує площу теж удвічі. На рисунку це показано зафарбованою частиною прямокутників, які утворено зменшенням діаметру покриття ε в два рази: з 10 до 5. Це відповідає розмірності $D = 1$ [34].

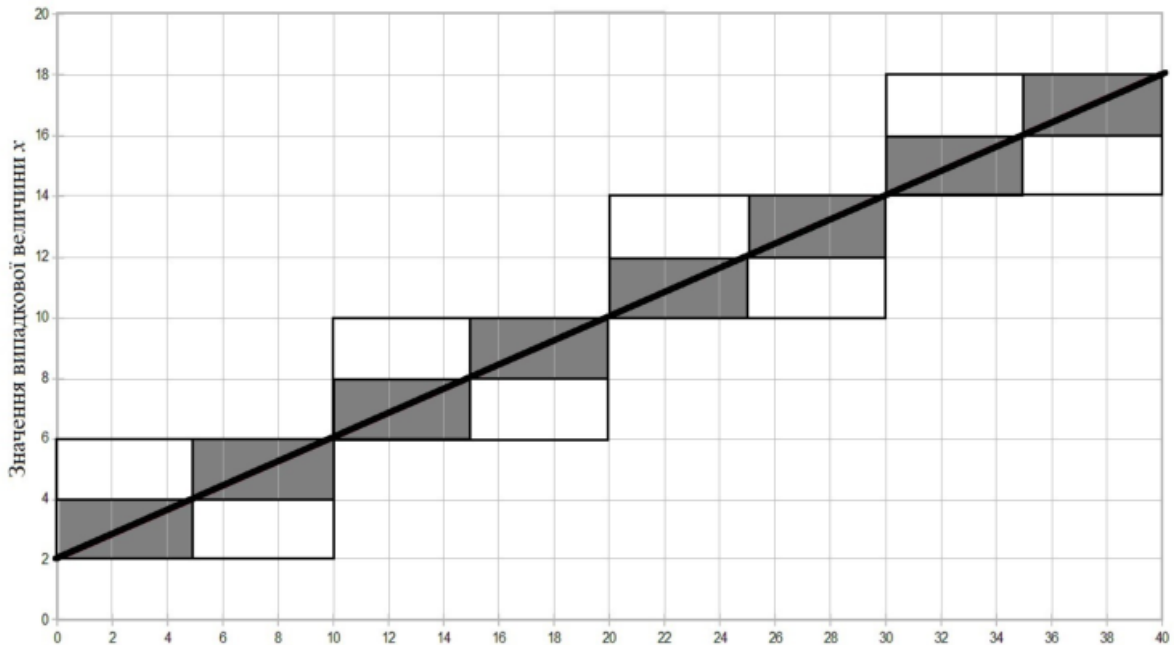


Рис. 3.2. Покриття прямокутниками прямої при $\varepsilon = 10$ та $\varepsilon = 5$

Для фігури, яка покриває площину (наприклад, крива Гільберта або Піано), при змінах ε значення площі не змінюється і покриває всю частину площини. Це відповідає фрактальній розмірності площини $D = 2$. Тому фрактальна розмірність виражається через площі покриття [34] за допомогою співвідношення (3.4), якщо ширину прямокутника змінено в γ разів:

$$D = 2 - \log_{\gamma}(S(\varepsilon \cdot \gamma) / S(\varepsilon)). \quad (3.4)$$

Для значної кількості відліків числової послідовності N , доступна заміна значень висот прямокутників покриття h_k на їх математичне сподівання $M(h_k)$. Але математичне очікування висоти прямокутника залежить від кількості відліків на розбиття ε , і ця залежність є нелінійною. Тому позначимо математичне сподівання висоти прямокутника в залежності від його ширини ε як $M(\varepsilon)$, де математичне очікування площі

окремого прямокутника виражатиметься як добуток його ширини на очікувану висоту (3.5):

$$S_k(\varepsilon) = M(\varepsilon) \cdot \varepsilon. \quad (3.5)$$

Тоді матимемо вираз визначення фрактальної розмірності через покриття прямокутниками із формули (3.2) з урахуванням (3.5):

$$S(\varepsilon) = \sum_{k=0}^{N_\varepsilon} S_k(\varepsilon) \Rightarrow S(\varepsilon) = \sum_{k=0}^{N_\varepsilon} M(\varepsilon) \cdot \varepsilon \Rightarrow S(\varepsilon) = M(\varepsilon) \cdot \varepsilon N_\varepsilon \Rightarrow S(\varepsilon) = M(\varepsilon) \cdot N, \quad (3.6)$$

де N – загальна кількість елементів ряду, націло ділиться на ε (хоча для $N \gg \varepsilon$ цією вимогою можна знехтувати і приймати неповні останні прямокутники покриття).

Якщо використати отримане співвідношення (3.6) до значення розмірності, отримаємо:

$$D = 2 - \log_\gamma \left(\frac{M(\varepsilon \cdot \gamma)}{M(\varepsilon)} \right), \quad (3.7)$$

в якому кількість чисел в реалізації ряду N було скорочено і далі вона не використовується.

На жаль, математичне сподівання висоти прямокутника (3.3) не є відомим. Тому отримуємо його від математичного сподівання самої величини. Для цього знайдемо ймовірність $q_3(h)$ висоти прямокутника для $\varepsilon=2$:

$$q_2(h) = \int_{-\infty}^{+\infty} 2p(x) \cdot p(x+h) dx, \quad (3.8)$$

тут використано додатковий множник 2, бо результуюча ймовірність отримується в двох незалежних випадках: коли менше число отримано раніше та пізніше [34].

Загальний вираз для $q_3(h)$ отримується, якщо всі наступні реалізації числа x , по кількості $\varepsilon-2$, будуть розташовані на проміжку $[x, x+h]$. Для цього

ймовірність попадання в цей проміжок $\int_x^{x+h} p(x) dx$ потрібно піднести до степеню

$\varepsilon-2$ та помножити на їх можливі комбінації розташування граничних значень x та $x+h$, в якості якого виступає біноміальний коефіцієнт $C_\varepsilon^{\varepsilon-2} = \varepsilon(\varepsilon-1)/2$:

$$p_{\varepsilon-2}(x, x+h) = \varepsilon(\varepsilon-1) \left(\int_x^{x+h} p(t) dt \right)^{\varepsilon-2}. \quad (3.9)$$

Тому для $q_3(h)$ вираз записується з (3.8) з урахуванням (3.9) як наступний інтеграл (10):

$$q_3(h) = \varepsilon(\varepsilon-1) \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot p(x+h) \left(\int_x^{x+h} p(t) dt \right) dx. \quad (3.10)$$

Формула (10) по факту надає інформацію про густину розподілу ймовірності висоти прямокутника покриття шириною в ε відліків. Значення виразу не є дійсним при $\varepsilon < 2$, бо при одиничній ширині прямокутника він повинен покривати лише одну точку, тому його висота завжди матиме значення нуля. В інших випадках, нуль та менше відліків взяти не можна, бо кількість відліків ε є натуральним числом.

Тепер, коли є значення розподілу ймовірності ширини прямокутника (3.10), можна записати значення математичного сподівання цієї висоти (3.11):

$$M(\varepsilon) = \varepsilon(\varepsilon-1) \cdot \int_0^{+\infty} h \left(\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot p(x+h) \left(\int_x^{x+h} p(t) dt \right)^{\varepsilon-2} dx \right) dh. \quad (3.11)$$

Для математичного сподівання $M(\varepsilon)$ межі інтегрування взято на проміжку $[0; +\infty]$, бо висота прямокутника не може мати від'ємне значення.

Остаточно, використавши отримане математичне сподівання висоти прямокутника (3.11) для виразу (3.7), матимемо оцінку фрактальної розмірності на основі густини розподілу (3.1) [34]:

$$D = 2 - \log_{\gamma} \left(\frac{\gamma(\varepsilon \cdot \gamma - 1) \int_0^{+\infty} h \left(\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot p(x+h) \left(\int_x^{x+h} p(t) dt \right)^{\varepsilon \cdot \gamma - 2} dx \right) dh}{(\varepsilon - 1) \cdot \int_0^{+\infty} h \left(\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot p(x+h) \left(\int_x^{x+h} p(t) dt \right)^{\varepsilon - 2} dx \right) dh} \right). \quad (3.12)$$

Іноді вигідно використовувати некратне відношення розбиття, тому більш корисним буде наступний запис виразу (3.12) [34]:

$$D = 2 - \log_{\varepsilon_2/\varepsilon_1} \left(\frac{\varepsilon_2(\varepsilon_2 - 1) \int_0^{+\infty} h \left(\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot p(x+h) \left(\int_x^{x+h} p(t) dt \right)^{\varepsilon_2-2} dx \right) dh}{\varepsilon_1(\varepsilon_1 - 1) \cdot \int_0^{+\infty} h \left(\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot p(x+h) \left(\int_x^{x+h} p(t) dt \right)^{\varepsilon_1-2} dx \right) dh} \right). \quad (3.13)$$

Формула для отримання математичного сподівання фрактальної розмірності послідовності випадкових чисел з відомою густиною розподілу ймовірності (3.13) отримана.

Приклад. Розглянемо випадковий процес, для якого можливі лише два випадки реалізації випадкового числа: це 0 та 1 з рівними ймовірностями. Для цього приймемо розподіл густини ймовірності (3.14):

$$p(x) = \frac{(\delta(x) + \delta(x-1))}{2}, \quad (3.14)$$

де δ є дельта-функція Дірака, що має наступні властивості:

$$\delta(x) = 0, x \neq 0; \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1.$$

Тоді $p(x)=0$, крім $x=0$ та $x=1$, де функція приймає нескінченні значення, але інтегрування в цих точках дає значення 0,5. В результаті маємо процес рівноймовірної генерації значень 0 та 1.

Припустимо, то було зроблено покриття прямокутниками з шириною ε ; тоді прямокутники можуть мати висоту 0 лише тоді, коли всі значення випадкової величини за ε реалізацій співпадають. Таких випадків два: всі результати дали нуль та всі результати дали одиницю. Кортежі з реалізованих чисел 0 та 1 дають двійкове число із ε цифр, тому кількість варіантів запису такого числа буде 2^ε , з яких тільки два є кортежами лише з одиниць чи нулів. Тому ймовірність отримання прямокутника нульової та одиничної висоти складатиме:

$$Q_\varepsilon(0) = \frac{2}{2^\varepsilon}, \quad Q_\varepsilon(1) = \frac{2^\varepsilon - 2}{2^\varepsilon}, \quad (3.15)$$

З ймовірностей отримання висот прямокутників покриття (3.15), можна записати й математичне сподівання для висоти прямокутника.

Завдяки точковій природі розподілу, інтегрування зводиться до пошуку сум двох добутків, для одного з яких величина значення висоти є нульовою:

$$M(\varepsilon) = 0 \cdot \frac{2}{2^\varepsilon} + 1 \cdot \frac{2^\varepsilon - 2}{2^\varepsilon} \Rightarrow M(\varepsilon) = 1 - 1/2^{\varepsilon-1}. \quad (3.16)$$

Скориставшись формулою (3.7), матимемо вираз для обчислення фрактальної розмірності випадкової послідовності з двома результатами 0 та 1, тобто процес, який є аналогом підкидання монетки (3.17):

$$D = 2 - \log_{\varepsilon_2/\varepsilon_1} \left(\frac{1 - 2/2^{\varepsilon_2}}{1 - 2/2^{\varepsilon_1}} \right). \quad (3.17)$$

На наступному рисунку можна побачити, як змінюється фрактальна розмірність послідовності, якщо розбиття $\varepsilon_1 = \varepsilon$, $\varepsilon_2 = \varepsilon + 1$ (рис. 3.3).

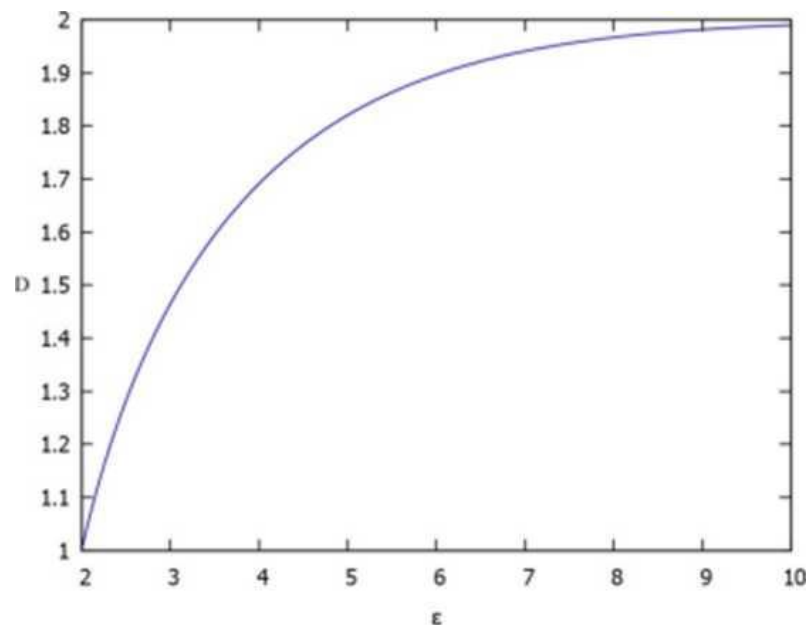


Рис. 3.3. Графік залежності отриманої фрактальної розмірності від довжини розбиття ε

Фактично, формула (3.17) дозволяє обирати довільне співвідношення розбиття, тому графік зміни фрактальної розмірності можна будувати й для $\varepsilon_1 = 2$, $\varepsilon_2 = \varepsilon + 1$ (рис. 3.4):

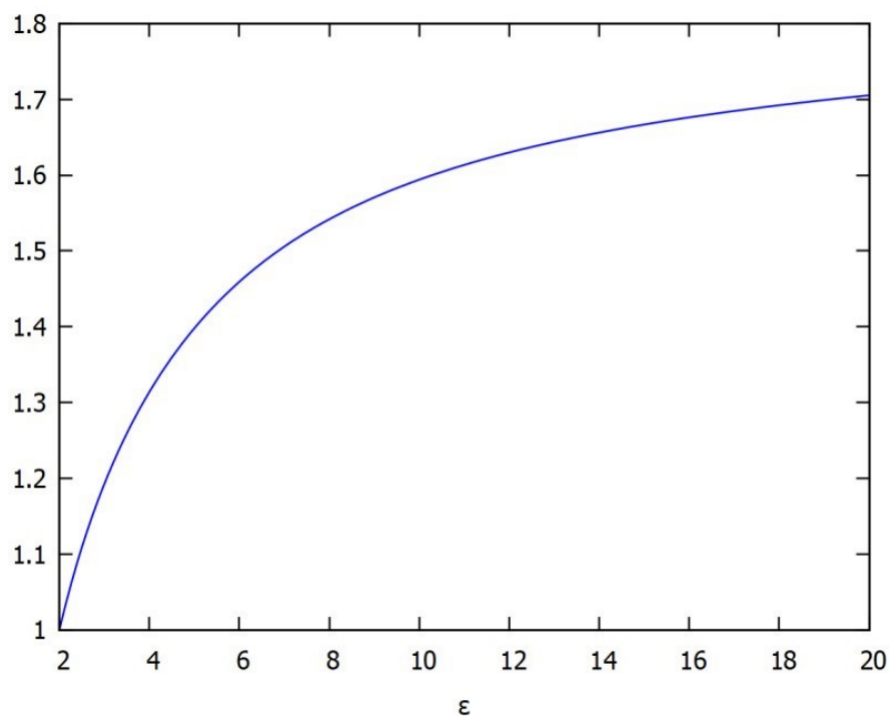


Рис. 3.4. Зростання фрактальної розмірності при фіксації одного розбиття $\varepsilon_1 = 2$

При цьому можна спостерігати аналогічне, але менш швидке, зростання фрактальної розмірності до межі $D = 2$.

Результат практичної перевірки математичного сподівання фрактальної розмірності при різному розбитті свідчить про залежність фрактальної розмірності від масштабування розбиття. Це означає, що від обраного масштабу розбиття на прямокутники можна отримати довільне значення розмірності від 1 до 2, що цілком істотно при розгляданні граничних випадків. Зокрема, при досить широкому розбитті, коли до прямокутника належить значна кількість елементів числової послідовності, висота прямокутника покриває майже весь дозволений діапазон реалізації випадкових значень; утворюється послідовність майже рівних по висоті прямокутників, що є аналогом двовимірної полоси, яка майже не змінює своєї ширини при збільшенні розбиття. Відповідно до логічної побудови, полоса є двовимірним об'єктом, а вихід з полоси на практиці заборонений

фізичними реальними процесами, в яких не допускається безобмежене зростання сигналу.

Також залежність фрактальної розмірності від діапазону розбиття означає, що кількість точок вибірки на покриття прямокутником обирається з області зацікавлення конкретної задачі, бо симетрії масштабування для обмежених в діапазоні випадкових чисел немає.

Отримана формула (3.13) є перехідною для оцінювання фрактальної розмірності бінарного ряду, який складається лише з елементів рівних 0 або 1.

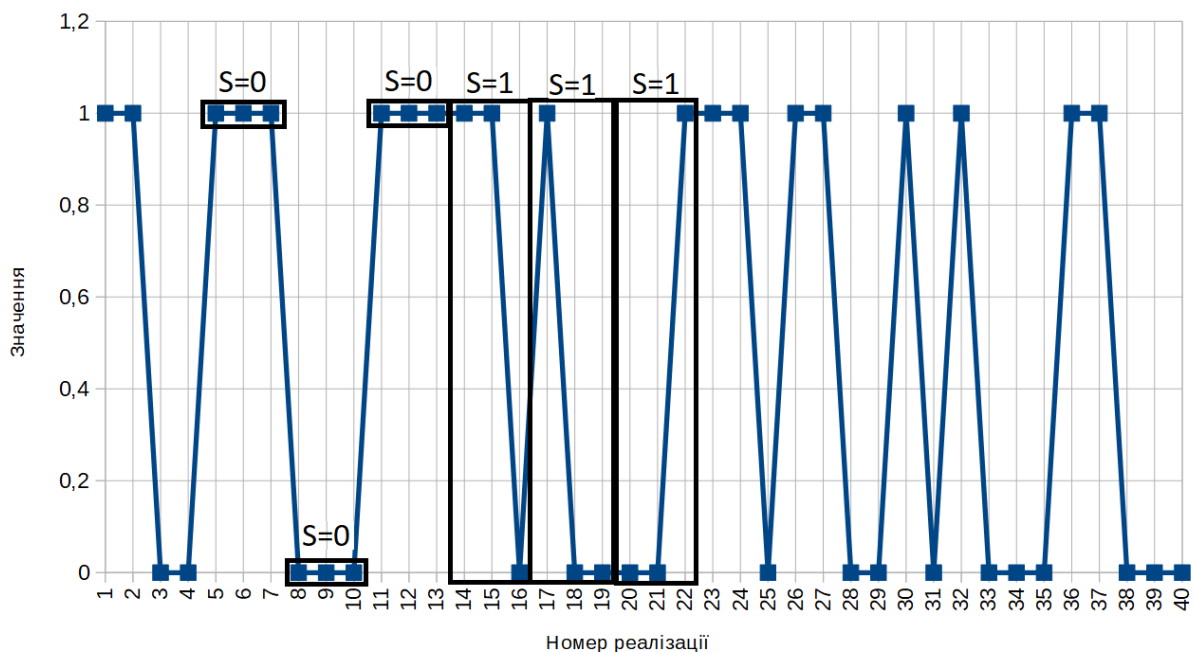


Рис. 3.5. Візуалізація нульових покриттів на дискретному бінарному числовому ряді

Щоб оцінити фрактальну розмірність такого бінарного ряду, потрібно визначити ймовірність отримання послідовності заданої довжини ε нулів $p_0(\varepsilon)$ та одиниць $p_1(\varepsilon)$:

$$p_0(\varepsilon) = p_{00}^\varepsilon, p_1(\varepsilon) = p_{11}^\varepsilon,$$

де p_{00} – ймовірність збереження нульового стану, p_{11} – ймовірність зберегти одиничний стан.

Відповідно визначеним ймовірностям, математичне очікування міри покриття n елементів послідовності виражатиметься наступною формулою:

$$M(n) = 1 - \frac{(1 - p_{11})p_{00}^n + (1 - p_{00})p_{11}^n}{(1 - p_{00}) + (1 - p_{11})}.$$

Якщо для зручності перейти до позначень ймовірностей і змінити поточний стан в серії з нуля до одиниці та навпаки, $p_{01}=1-p_{00}$ та $p_{10}=1-p_{11}$, то в (3.13) можна використати дискретні суми замість інтегралів.

Визначення математичного очікування міри покриття $M(n)$ дає можливість скористатися наступною формулою для визначення фрактальної розмірності бінарної послідовності:

$$D(n_1, n_2, p_{01}, p_{10}) = 2 - \ln \left(\frac{p_{01} + p_{10} - p_{10}(1 - p_{01})^{n_1} - p_{01}(1 - p_{10})^{n_1}}{p_{01} + p_{10} - p_{10}(1 - p_{01})^{n_2} - p_{01}(1 - p_{10})^{n_2}} \right) / \ln(n_1 / n_2).$$

Вираз для пошуку фрактальної розмірності містить не лише ймовірності переходів, а й довжини покриття. Це призводить до неоднозначності отриманої розмірності.

Щоб позбутися неоднозначності, спрямуємо n_1 до n_2 , а потім кількість елементів спрямуємо до 1. В результаті знаходження меж отримується остаточна формула визначення фрактальної розмірності бінарної послідовності за ймовірностями переходів [30]:

$$D(p_{01}, p_{10}) = 2 + \frac{p_{10}(1 - p_{01})\ln(1 - p_{01}) + p_{01}(1 - p_{10})\ln(1 - p_{10})}{2p_{01}p_{10}}. \quad (3.18)$$

Завдяки тому, що бінарний часовий ряд заданий ймовірностями змінити або залишити стан, вдалося виразити фрактальну розмірність аналітично (3.18). Візуально це можна оцінити на рис. 3.6.

На жаль, спосіб покриття має вплив на значення фрактальної розмірності, тому для співставлення результатів потрібно проводити перехід від отриманої розмірності до інших за допомогою регресії.

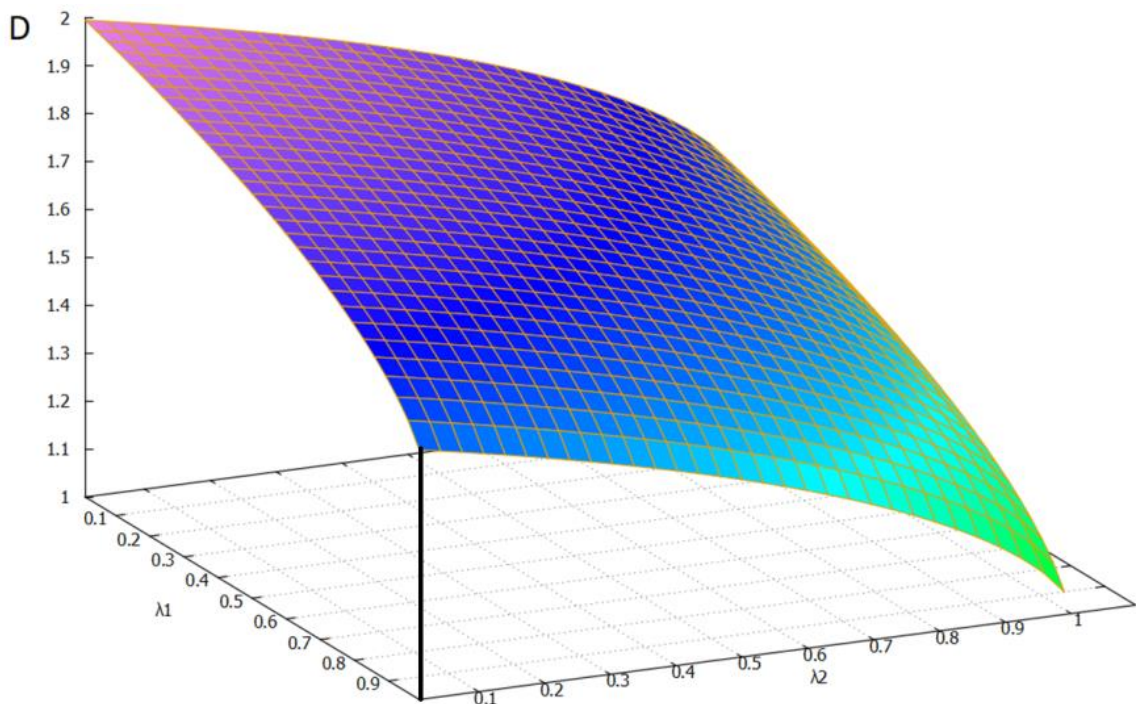


Рис. 3.6. Залежність фрактальної розмірності бінарного ряду від ймовірностей змін стану системи

В результаті отримано метод аналізу мережевого трафіку для визначення його фрактальної розмірності за ймовірнісними властивостями:

Етап 1. Накопичується бінарний часовий ряд, для якого потрібно визначити фрактальні властивості. Його можна отримати, збираючи статистику проходження реального трафіку через маршрутизатор за певний проміжок часу, або засобами програмного імітаційного моделювання.

Етап 2. Оцінюються ймовірнісні властивості ряду. Оцінюються ймовірнісні властивості ряду. В накопичених даних розраховується кількість входжень пар послідовних елементів n_{00} : «0, 0» та n_{01} : «0, 1». Отримуємо p_{01} як ймовірність зміни стану з «0» на «1» за означенням ймовірності $p_{01} = n_{01}/(n_{01}+n_{00})$. Аналогічно оцінюється ймовірність зміни стану з «1» на «0» як $p_{10} = n_{10}/(n_{10}+n_{11})$, де n_{10} – кількість пар послідовних елементів «1, 0»; n_{11} – кількість пар послідовних елементів «1, 1».

Етап 3. Визначається фрактальна розмірність бінарної послідовності за формулою (3.18).

3.2. Експериментальне дослідження якості роботи запропонованого методу аналізу мережевого фракталоподібного трафіку для визначення його фрактальної розмірності

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 [16-24, 35]. Для генерації фрактального бінарного трафіку використано запропоновану математичну модель з розділу 2.2. Цей генератор характеризується станами 0 або 1, та ймовірностями знаходження в цих станах як $p_0=p_{10}/(p_{01}+p_{10})$ та $p_1=p_{01}/(p_{01}+p_{10})$. Інтенсивність трафіку такого генератора буде в межах $[0, 1]$ і дорівнюватиме ймовірності отримати на виході генератора 1: p_1 . Алгоритм роботи генератора показано на рис. 3.7.

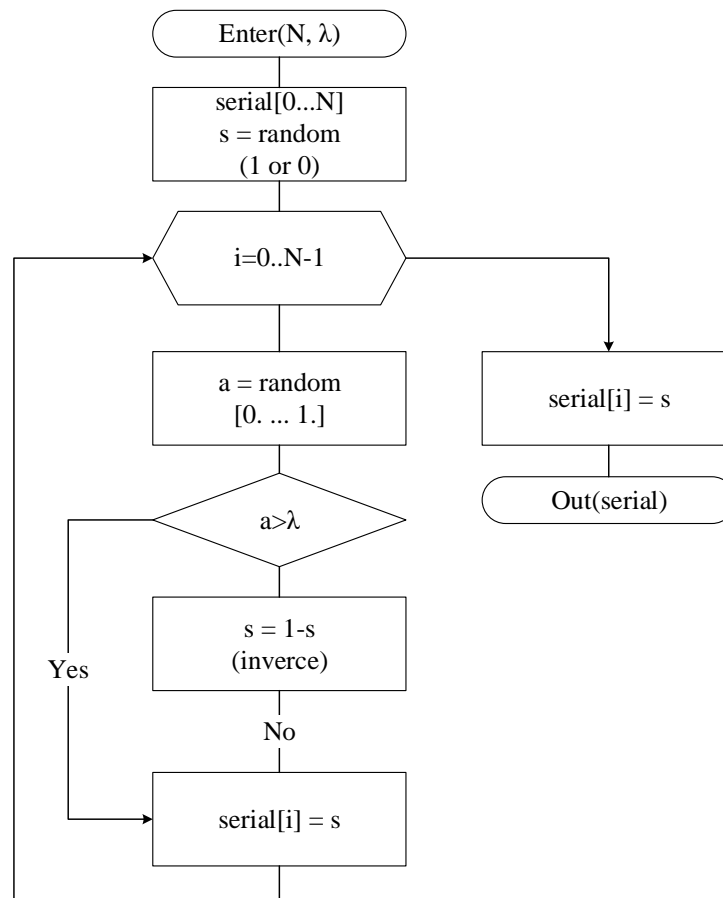


Рис. 3.7. Алгоритм експериментального вимірювання коефіцієнта Херста

Генерування трафіку інтенсивністю $\frac{1}{2}$ починається із завданням ймовірності збереження стану $\lambda = p_{00} = p_{11}$. 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 λ . 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 зі співвідношенням (3.18).

З метою визначення фрактальних властивостей бінарних рядів, отриманих розробленим генератором, було проведено експериментальне вимірювання коефіцієнта Херста методом R/S-аналізу [30], результати якого показано на рис. 3.8.

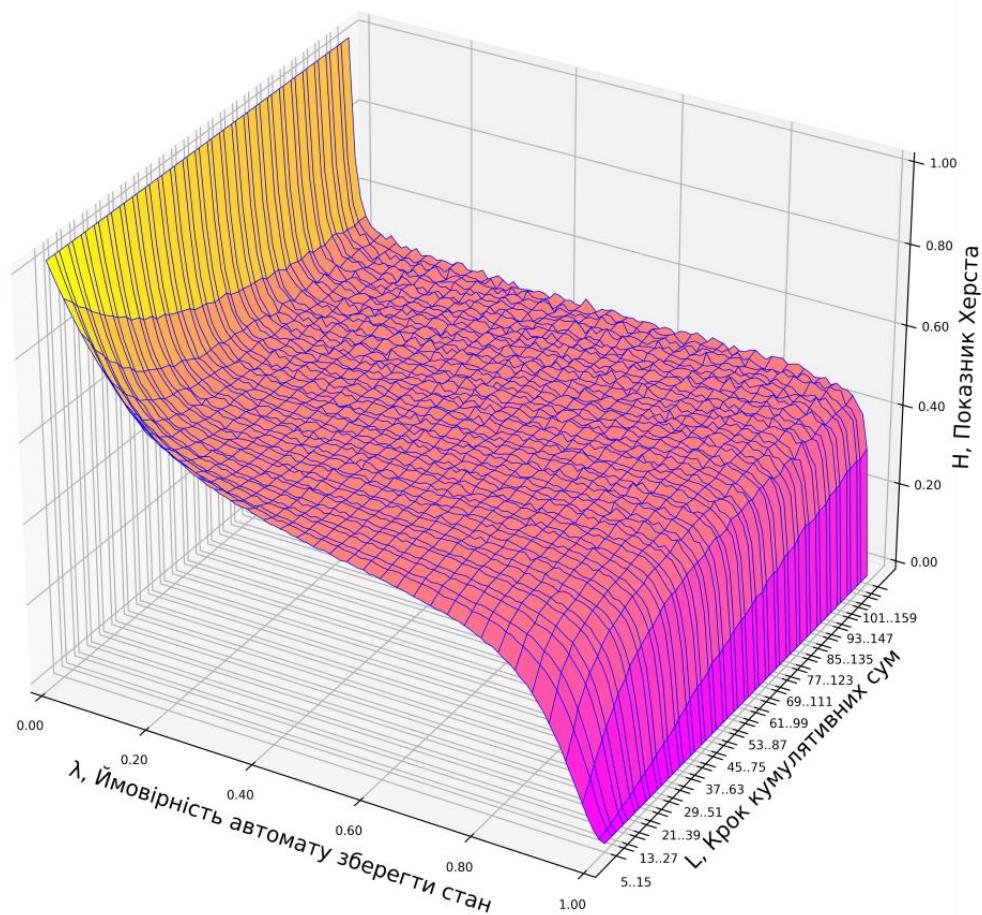


Рис. 3.8. Результати експериментального вимірювання коефіцієнта Херста H

Рис. 3.8 містить результати аналізу бінарного трафіку інтенсивністю $p_1=0.5$. Для цього достатньо виконання умови рівності ймовірностей переходів $\lambda=p_{00}=p_{11}$, або, що рівносильно, $p_{01}=p_{10}$. Цей показник відповідає за персистентність часового ряду і впливає на його фрактальні властивості. Також для розрахунку коефіцієнта Херста H потрібно виділяти серії випадкового блукання – кумулятивні (накопичувальні) суми. Кількість кроків накопичувальних сум показано окремою віссю L . На графіку видно, що при зменшенні довжини кумулятивних сум графік прямує до прямої лінії, яка сполучає одиничне та нульове значення коефіцієнта Херста. Навпаки, якщо кумулятивні суми є досить довгими, коефіцієнт Херста прямує до значення 0.5 без відображення персистентності часового ряду.

Алгоритм, який використано для проведення експерименту, показано на рис. 3.9.

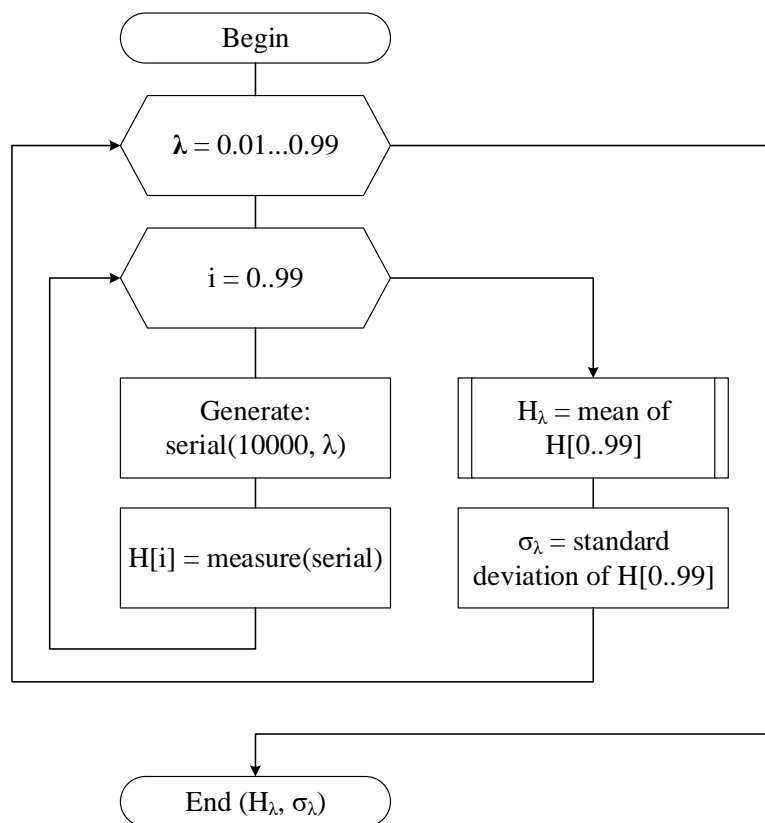


Рис. 3.9. Алгоритм побудови графіку змін показника Херста

Розрахунок коефіцієнта Херста [25] проводився за методом R/S-аналізу, який реалізований наступним програмним кодом [30]:

Лістинг 3.1. Розрахунок коефіцієнта Херста методом R/S-аналізу

```
1 # Input data:
2 # ts - array with series data
3 # lasg - array with shifts in cumulative data
4 ts = numpy.cumsum(ts)
5 tau = [numpy.sqrt(numpy.subtract(ts[lag:], ts[:-lag])).std()] for lag in
lags]
6 m = numpy.polyfit(numpy.log(lags), numpy.log(tau), 1)
7 hurst = m[0]*2.0
8 # output data: hurst - Hurst coefficient
```

Алгоритм приймає на вході послідовність, яка аналізується, та лаги – значення зсувів при розрахунку кумулятивних (накопичувальних) сум.

На рис. 3.10 показано середнє значення для цих 100 вимірювань. Для кожної точки графіка, яка відповідає ймовірності зберегти стан, та діапазону довжин кумулятивних сум, проводиться 100 разів генерування випадкової серії в 10000 значень, для яких розраховуються коефіцієнти Херста з вказаними довжинами кумулятивних сум. Кращої наочності потребують крайові результати. На рис. 3.10 показано результат використання мінімальних кумулятивних сум в 1 та 3 послідовних значень.

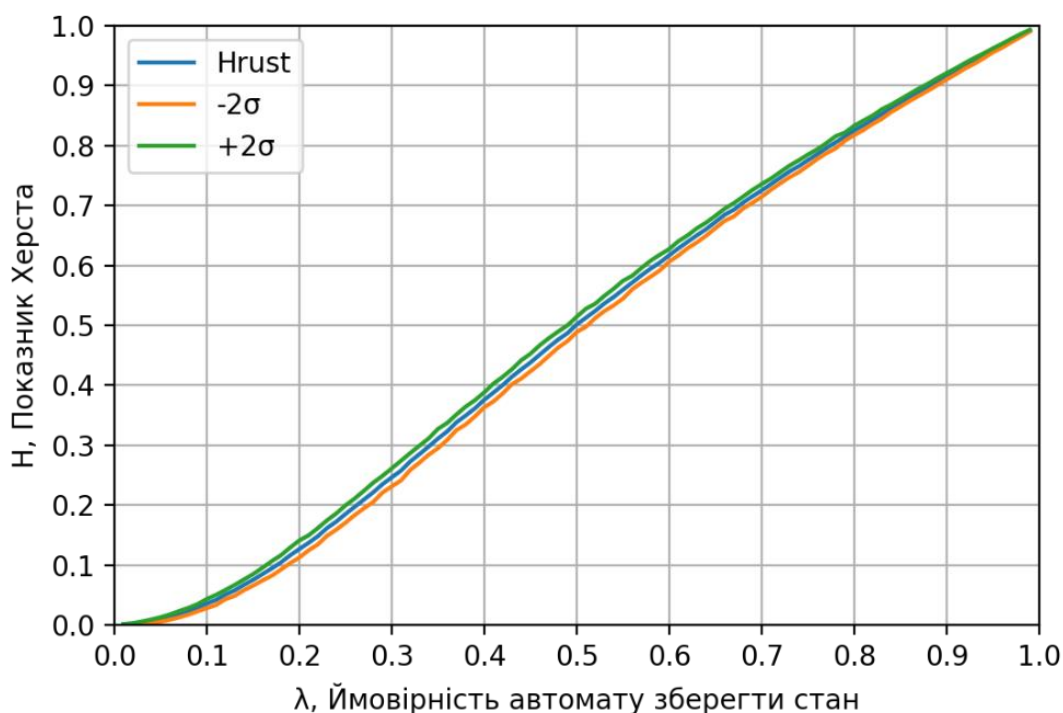


Рис. 3.10. Результати експериментального вимірювання коефіцієнта Херста для кумулятивних сум в 1, 3 відліки із зазначеними відхиленнями у 2σ

В результаті маємо криву, що є наближенням лінійної залежності між ймовірністю збереження попереднього стану λ та коефіцієнтом Херста. Також розмітка відхилень показує малу розбіжність результатів від експерименту до експерименту. Проте це є наслідком навмисно взятого довгого ряду для аналізування, з метою отримання надійних результатів експерименту.

Наступний рис. 3.11 є представленням іншої крайньої позиції (на рис. 3.8 ця тенденція розвивається “вглиб”), коли кумулятивні суми є довгими:

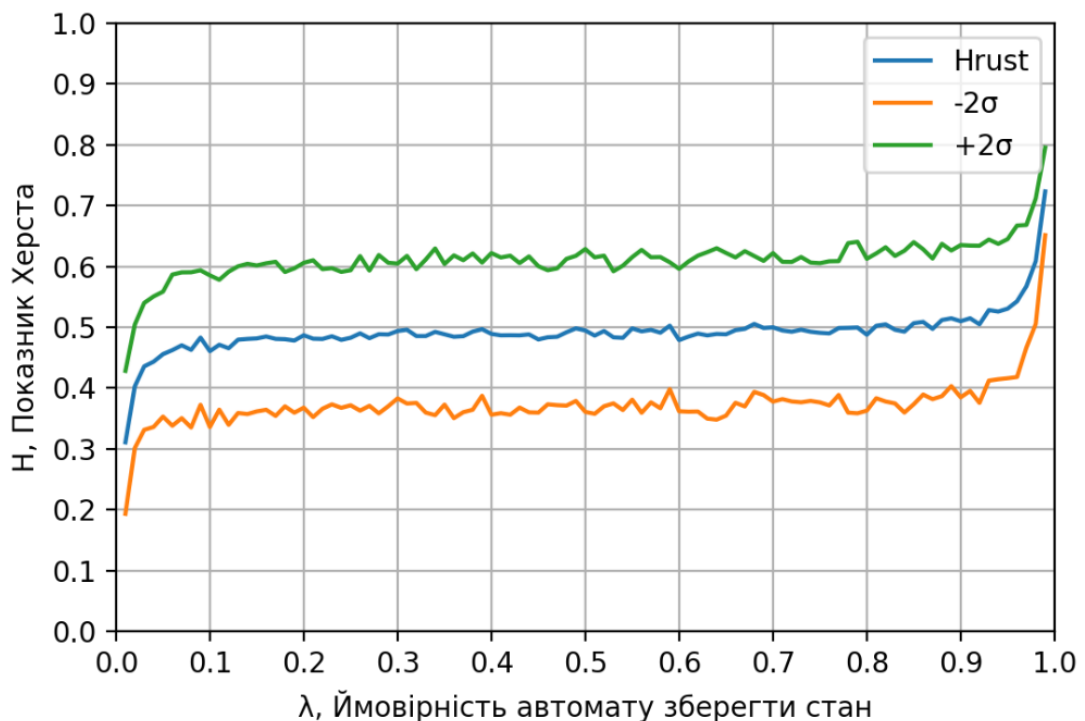


Рис. 3.11. Результати експериментального вимірювання коефіцієнта Херста для кумулятивних сум в 100, 120, 150 відліків із зазначеними відхиленнями у 2σ

Тут є очевидним наявне значне відхилення в окремих вимірюваннях, що позначилося на ширині смуги відхилень у 2σ . Це свідчить, що вимірювання коефіцієнту Херста є вкрай неточним. При цьому, у великому діапазоні ймовірностей збереження попереднього стану, близько $[0.1; 0.9]$, R/S-аналіз показав, що ряд є випадковим.

Порівняння графіків на рис. 3.10 та рис. 3.11, як і результат аналізу результатів рис. 3.8, приводить до висновків, що результат залежить від обрання користувачем параметрів, зокрема довжини ряду або довжин кумулятивних сум [30].

Пропонується використання ймовірнісного підходу, який ґрунтується на прямому вимірюванні ймовірності зміни стану з 0 на 1 (r_0) та зі стану 1 в стан 0 (r_1) за формулою визначення фрактальної розмірності (3.18), яка реалізується кодом мовою Python 3:

Лістинг 3.2. Розрахунок коефіцієнта Херста запропонованим методом

```
1 r0 = (series[0:-2] < series[1:-1]).sum() / (series[0:-2] < 1).sum()
2 r1 = (series[0:-2] > series[1:-1]).sum() / (series[0:-2] > 0).sum()
3 d = 1 - (r1 * (1 - r0) * math.log(1.0 - r0) + r0 * (1 - r1) * math.log(1.0 - r1)) / (2.0 * r0 * r1)
4 H = 2.0 - d
```

де `series` – одновимірний масив, який містить бінарний часовий ряд. Використання цього коду для визначення фрактальних властивостей часового ряду показано на рис. 3.12:

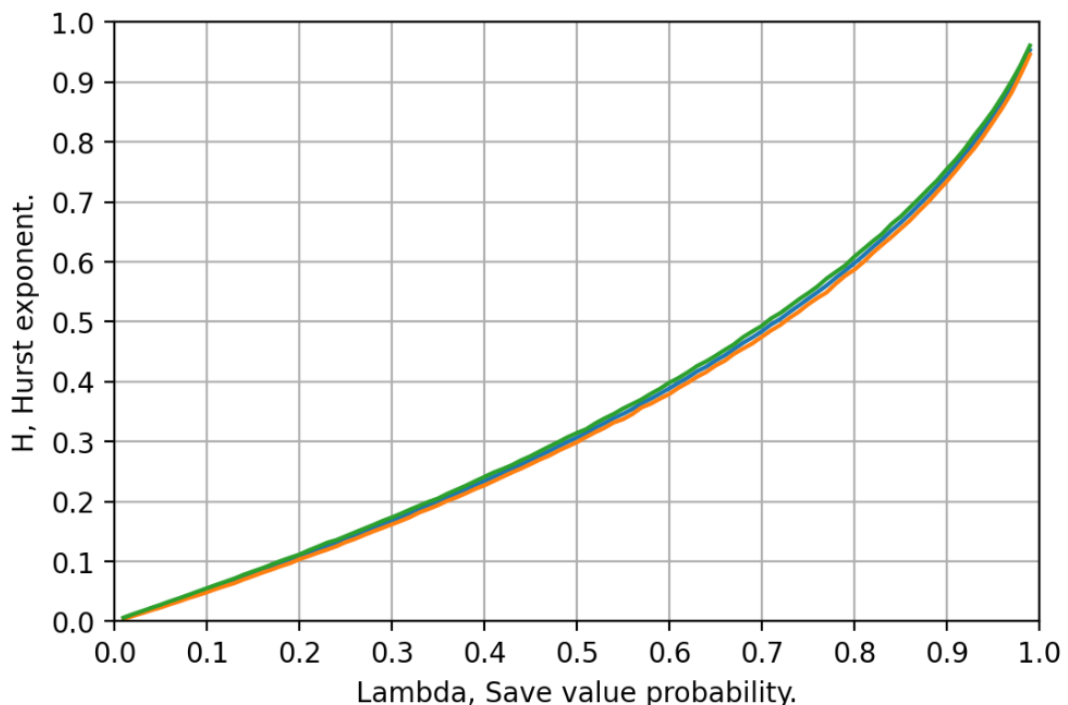


Рис. 3.12. Результати експериментальної ймовірнісної оцінки коефіцієнта Херста із зазначеними відхиленнями у 2σ

Результати дослідження якості роботи Ймовірнісного методу та порівняння його з відомим методом R/S-аналізу наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Результати порівняння якості роботи методів визначення фрактальної розмірності – відомого методу R/S-аналізу та запропонованого Ймовірнісного методу (PM)

№	λ	H , R/S	H , PM	σ , R/S	σ , PM	Deviations for R/S, %	Deviations for PM, %
1	0,01	0,020862173	0,004996201	0,001825691	0,000435045	8,751204779	8,707522638
2	0,06	0,115130822	0,030678064	0,005365203	0,001102508	4,660093493	3,593801913
3	0,11	0,197424495	0,057299125	0,006720639	0,001636951	3,404157102	2,856851724
4	0,16	0,266660733	0,084636434	0,008166731	0,001946542	3,062592345	2,299887334
5	0,21	0,321224610	0,113072840	0,009107072	0,002310433	2,835110483	2,043314238
6	0,26	0,367964061	0,143068708	0,009842329	0,002886502	2,674807286	2,017564092
7	0,31	0,404989816	0,173980449	0,010944700	0,003172788	2,702463230	1,823646757
8	0,36	0,435730431	0,206981323	0,011123077	0,003080814	2,552742787	1,488450246
9	0,41	0,462658106	0,240125774	0,011055708	0,003745437	2,389606470	1,559781461
10	0,46	0,485639655	0,277501570	0,009411981	0,003754746	1,938058694	1,353054180
11	0,51	0,502866839	0,313936619	0,011826159	0,004215003	2,351747645	1,342628967
12	0,56	0,520859605	0,354596924	0,011126878	0,004295506	2,136252974	1,211377335
13	0,61	0,540472278	0,398324387	0,010182414	0,004817891	1,883984610	1,209539751
14	0,66	0,561685180	0,444444295	0,012015554	0,004776983	2,139197425	1,074821662
15	0,71	0,587349580	0,494695839	0,010646189	0,004218451	1,812581414	0,852736347
16	0,76	0,619086392	0,549212501	0,010121335	0,005005190	1,634882623	0,911339444
17	0,81	0,667516915	0,609945932	0,010737486	0,005076275	1,608571380	0,832250120
18	0,86	0,737425650	0,680389339	0,009941918	0,004865064	1,348192641	0,715041204
19	0,91	0,836641573	0,762035440	0,010570512	0,004452206	1,263445799	0,584251869
20	0,96	0,949146972	0,866270314	0,007584074	0,005016391	0,799041091	0,579079216
Середні значення:				0,009416	0,003541	2,597437	1,852847

Для побудови кожного рядка таблиці було проведено 100 генерувань бінарної послідовності довжиною 10000 елементів із відповідним значенням λ . Для кожної з них було визначено показник Херста H , R/S-аналізом та на основі оцінки ймовірності переходів (PM) від 1 до 0 та від 0 до 1. Завдяки проведенню сотні незалежних випробувань є можливість визначити середнє значення показника Херста (3.19), стандартне відхилення σ (3.20) та процент відхилення (3.21) [30]:

$$H = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} H_i, \quad (3.19)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} (H_i - H)^2}, \quad (3.20)$$

$$Deviations = \frac{\delta}{H} 100\%. \quad (3.21)$$

Побудована таблиця дає змогу оцінити точність знайдених показників Херста за двома останніми колонками (табл. 3.1). Відповідно до значень у цих колонках, відносна величина відхилень для Ймовірного методу є меншою. Це пояснюється тим, що R/S-аналіз вимагає оцінювання “розкиду” R , яке є кумулятивною сумою кількох елементів досліджуваної послідовності. Зрозуміло, що така величина потребує більшої кількості вимірювань значень трафіку і вимагає для оцінки значення з відповідною точністю, тобто більшу кількість експериментів.

R/S-аналіз дає різні значення при різних розмірах кумулятивної суми, і чим більший крок кумулятивної суми, тим сильніше відрізняється визначене нею значення показника Херста між собою. Це свідчить про неоднозначність згаданого методу та можливість маніпулювання результатами за допомогою обрання розміру кумулятивних сум. Запропонований же метод не має цього недоліку. Розроблений метод є однозначним і не залежить від проміжку розглядання, тому що він не використовує кумулятивні суми.

Також, як видно з табл. 3.1, розроблений метод дає менший відсоток відхилення від середнього значення показника Херста, а саме: 1,8%, на відміну від R/S-аналізу, що дає відхилення 2,5%. А отже, запропонований метод має більшу точність визначення фрактальної розмірності.

3.3. Дослідження результатів роботи розробленого генератора трафіку запропонованим методом аналізу мережевого трафіку

Було проведено дослідження результатів роботи генератора трафіку запропонованим методом фрактального аналізу [31, 32, 36].

Фрактальна розмірність числового ряду може бути виражена різними метриками, що може привести до інших значень фрактальної розмірності.

Використання окремої метрики на моделі та реальних даних також дозволяє порівняти їх фрактальні властивості.

Тому для запропонованого генератора фрактального трафіку побудована окрема метрика числового ряду, для якої ширина покриття вважається одиничною, якщо всі n послідовних не дорівнюють одному значенню, та нульовою, якщо всі n послідовних значень рівні лише 1 або 0. Завдяки цьому легко отримати аналітичну форму розрахунку ймовірності зустріти сегмент нульового розмаху з n елементів, і ця ймовірність дорівнює:

$$p_{01}(1-p_{10})^n + p_{10}(1-p_{01})^n.$$

На основі статистичного моделювання роботи зазначеного генератора отримано математичне сподівання розмаху випадкового блукання з n кроків, що дало можливість аналітично визначити фрактальну розмірність ряду. При цьому фрактальна розмірність залежить від довжини n отриманої числової послідовності за наступним законом (3.22):

$$D(n, p_{01}, p_{10}) = 2 + \frac{p_{10}(1-p_{01})^n \ln(1-p_{01}) + p_{01}(1-p_{10})^n \ln(1-p_{10})}{p_{01} + p_{10} - p_{10}(1-p_{01})^n - p_{01}(1-p_{10})^n}, \quad (3.22)$$

Для значення ймовірностей переходу $p_{01}=p_{10}=0.5$, що відповідає класичному випадковому процесу, показано графік залежності фрактальної розмірності D від кількості елементів генерованого ряду n отриманого з формули (3.22), рис. 3.13 [31, 32]:

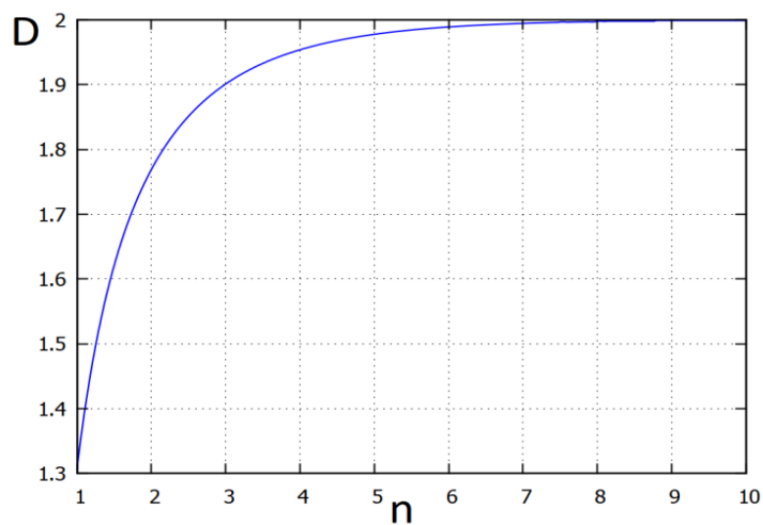


Рис. 3.13. Теоретично визначена фрактальна розмірність $D(n)$ при ймовірності зміни стану $p_{01}=p_{10}=0.5$

Наявність в математичних об'єктах на різних рівнях масштабування різних значень фрактальної розмірності має назву мультифрактальності. В [26] показана наявність мультифрактальності в трафіку комп'ютерних мереж.

Для використання методів фрактального аналізу часових рядів на основі розмірності Мінковського або R/S-аналізу потрібно проводити додаткові дослідження.

Використані методи розрахунку фрактальної розмірності

Для визначення фрактальної розмірності можна скористатися означенням фрактальної розмірності в інтерпретації Мінковського (3.23), [27-29]:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(N)}{-\ln(\varepsilon)}, \quad (3.23)$$

де використано позначення:

ε – розмір, або діаметр підмножини, яким покривають множину, розмірність якої визначається;

N – мінімальна кількість підмножин ε , яку потрібно використати для покриття всієї множини, розмірність якої визначається.

Безпосередньо використати означення (3.23) до дискретної множини не є можливим з причини того, що існує мінімум ε . Тому потрібно скористатися фіксованими значеннями ε .

Нехай для покриття основної множини використовують покриття розмірами ε та $k\varepsilon$ (k – для дискретної системи є заданим натуральним числом; ε – невідомий коефіцієнт, який характеризує обрану дискретну систему). Тоді, відповідно обраним підмножинам, кількість таких підмножин для покриття складатиме $N(\varepsilon)$ та $N(k\varepsilon)$. Метод розрахунку метрики $N(k\varepsilon)$ є досить вільним, і обирається згідно величин, які вивчаються в конкретному процесі. З відношення (3.23), при умові відкидання визначення межі, для дискретної системи, матимемо (3.24):

$$-D \ln(k) - C = \ln(N(k\varepsilon)), C = D \ln(\varepsilon). \quad (3.24)$$

Тут $\ln(k)$, $\ln(N(k\varepsilon))$ є величинами, які розраховуються для кількох значень k ; D та C отримуються в результаті лінійної регресії до точок $(\ln(k), \ln(N(k\varepsilon)))$. З причини випадковості числового ряду, $N(k\varepsilon)$ теж є випадковою величиною, з певним математичним сподіванням та дисперсією. Як наслідок, отримані точки $(\ln(k), \ln(N(k\varepsilon)))$ будуть наближатися до прямої, але не обов'язково належатимуть їй.

З метою зменшення додаткових розрахунків та перетворень в розглянутому генераторі було змінено подію генерування «0» на генерування «-1», в результаті для $p_{01}=p_{10}$ математичне сподівання генерованої послідовності стало складати 0, а стандартне відхилення 1. Наступним кроком побудовану послідовність $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ замінено на кумулятивний ряд, який відповідає випадковому блуканню $\{b_1, b_2, \dots, b_n \mid b_i = a_1 + a_2 + \dots + a_i\}$. Для такого ряду вводиться розрахунок ширини покриття $N(k\varepsilon)$ сегмента довжиною в k дискретних елементів:

$$N(k\varepsilon) = \sum_{i=0}^{n/(k-1)} (\max(b_{ik+1}, \dots, b_{i(k+1)}) - \min(b_{ik+1}, \dots, b_{i(k+1)})). \quad (3.25)$$

Більш зручно в якості n брати степінь двійки, тоді k можна буде теж змінювати вдвічі при побудові опорних точок для лінійної апроксимації.

Вказаний процес для $k = 8, 16, 32, 64, 128$ дозволив побудувати п'ять точок, для яких лінійна апроксимація визначає показник Херста пробної послідовності в 0.53 як кут нахилу отриманої прямої (рис. 3.14) [33].

Теоретично для випадкової послідовності результат мав складати $H=0.5$, або, що те саме, $D=1.5$. Це є близьким до отриманих результатів. Класично ширина покриття $N(k\varepsilon)$ для кривих на площині повинна виражатися у кількості квадратів зі стороною $k\varepsilon$, що покривають криву випадкового блукання. Але прийнята міра (3.22) є асимптотично рівною до міри Мінковського; більш того, при однаковому виборі значеннях k , показник Херста співпадає з отриманим за допомогою R/S-аналізу, для якого зв'язок із фрактальною розмірністю вже відомий.

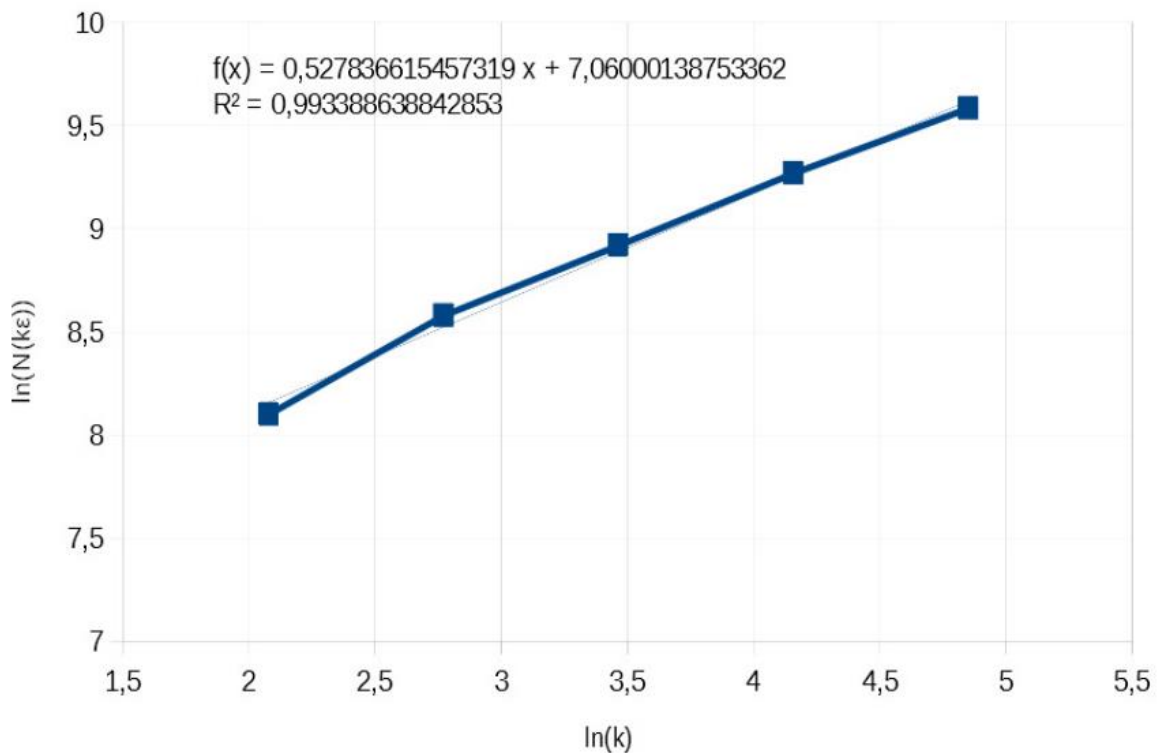


Рис. 3.14. Визначений коефіцієнт Херста $H=0.53$,
що відповідає фрактальній розмірності $D=1.47$
при ймовірностях змінити стан $p_{01}=p_{10}=0.5$

3.4. Експериментальне дослідження залежності фрактальної розмірності числового ряду від обраного масштабу

З метою експериментального підтвердження залежності фрактальної розмірності числового ряду від обраного масштабу було використано 11 реалізацій послідовностей в 1024 чисел «-1», «1». Для кожної з 11 реалізацій було розраховано показник Херста на основі R/S-аналізу з п'яти контрольних точок при $k=\{1024, 512, 256, 128, 64\}; \{512, \dots, 32\}; \{256, \dots, 16\}; \{128, \dots, 8\}$, де k – набори довжин кумулятивних сум. Результати чисельного експерименту показані на таблицях 3.2-3.4 [33].

Одинадцять експериментів, для кожного з режимів генерування, утворюють у відповідному масштабі незалежне вимірювання показника Херста. Це дозволяє використати статистичну обробку результату, для якого знайдено середнє значення показника Херста та стандартне відхилення σ

середнього значення, яке обернено пропорційне кореню з довжини вибірки. На основі стандартного відхилення розрахований довірчий інтервал з надійністю 99%, який забезпечується для відхилення від середнього значення $\pm 3\sigma$. Межі інтервалу надійності в 99% в таблиці показано відповідно в стовпцях -3σ та $+3\sigma$ відповідно.

Результати з усіх трьох таблиць свідчать про зміну показника Херста зі зміною масштабування, що є підтвердженням припущення, яке було висунуте в попередньому пункті (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Показники Херста при генеруванні послідовності з параметрами $p_{01}=p_{10}=0.95$

<i>k</i>	№ експ. 1	№ експ. 2	№ експ. 3
1024..64	0.38	0.23	0.48
512..32	0.40	0.33	0.52
256..16	0.42	0.35	0.53
128..8	0.42	0.35	0.46
<i>k</i>	№ експ. 4	№ експ. 5	№ експ. 6
1024..64	0.44	0.34	0.29
512..32	0.50	0.34	0.38
256..16	0.48	0.38	0.41
128..8	0.40	0.40	0.39
<i>k</i>	№ експ. 7	№ експ. 8	№ експ. 9
1024..64	0.42	0.46	0.40
256..16	0.41	0.45	0.45
128..8	0.41	0.42	0.43
<i>k</i>	№ експ. 10	№ експ. 11	Mean
1024..64	0.26	0.40	0.37
512..32	0.31	0.48	0.41
256..16	0.39	0.47	0.43
128..8	0.41	0.43	0.41
<i>k</i>	Mean -3σ	Mean $+3\sigma$	
1024..64	0.30	0.45	
512..32	0.35	0.48	
256..16	0.38	0.48	
128..8	0.39	0.44	

З табл. 3.2 видно, що при високій ймовірності змінити попередній стан на протилежний модуляція трафіку відбувається майже постійно, що приводить до значно меншої ймовірності отримання викидів. Це відбивається

на показнику Херста, який має значення, для різних масштабів, від 0.37 до 0.41. Побудований сигнал при таких параметрах показано на рис. 3.15.

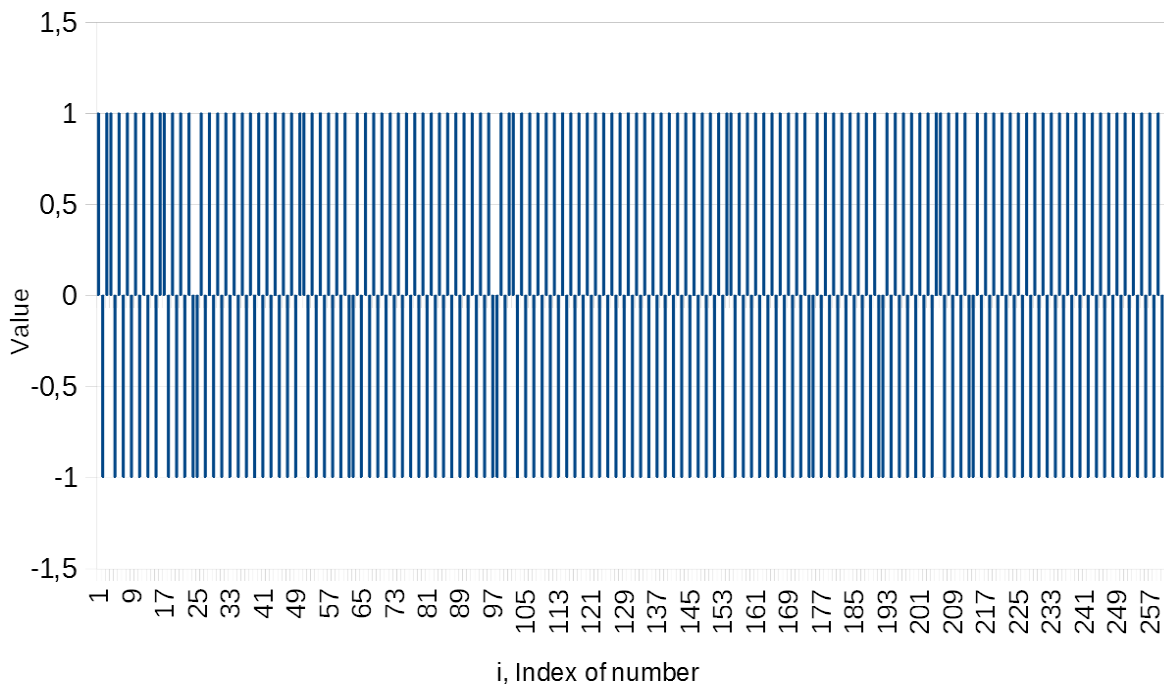


Рис. 3.15. Гістограма сигналу, отриманого генеруванням з параметрами $p_{01}=p_{10}=0.95$

В результаті випадкового блукання на основі отриманої послідовності віддалення від початку руху буде відбуватися значно повільніше, бо на кожен крок в сторону буде значно більш висока ймовірність отримання наступного кроку протилежного напрямку [33].

Наступна табл. 3.3 містить результати чисельного експерименту з налаштуванням генератора на рівну ймовірність збереження та зміни поточного стану $p_{01}=p_{10}=0.50$. В такому режимі генератор повинен відповідати класичному випадковому процесу з показником Херста $H=0.5$. Однак, з таблиці 3.3 видно, що результати визначення показника Херста вже при різниці k в чотири рази дають оцінки значення показника Херста з надійністю більше 99%, які не перетинаються. Тобто, з надійністю більше 99% дослідження числового ряду на 1024 відліках дають менші значення показника Херста, ніж на 256 відліках.

Це свідчить про відмінність фрактальних властивостей числової послідовності на різних масштабах. Відповідно до цього факту, можна обирати довжину черги для системи обслуговування, для якої показник Херста матиме значення близьке до 0.5, і використовувати для визначення характеристики такої системи обслуговування теорію випадкового потоку Пуассона без урахування самоподібності за допомогою класичної статистики.

Таблиця 3.3. Показники Херста при генеруванні послідовності з параметрами $p_{01}=p_{10}=0.5$

к	№ експ. 1	№ експ. 2	№ експ. 3
1024..64	0.41	0.46	0.39
512..32	0.48	0.48	0.53
256..16	0.52	0.55	0.58
128..8	0.55	0.59	0.61
к	№ експ. 4	№ експ. 5	№ експ. 6
1024..64	0.41	0.50	0.37
512..32	0.47	0.54	0.48
256..16	0.52	0.52	0.55
128..8	0.57	0.57	0.57
к	№ експ. 7	№ експ. 8	№ експ. 9
1024..64	0.40	0.54	0.35
512..32	0.45	0.60	0.47
256..16	0.52	0.56	0.56
128..8	0.56	0.59	0.60
к	№ експ. 10	№ експ. 11	Mean
1024..64	0.41	0.42	0.42
512..32	0.52	0.46	0.50
256..16	0.59	0.55	0.55
128..8	0.66	0.59	0.59
к	Mean -3σ	Mean +3σ	
1024..64	0.37	0.47	
512..32	0.46	0.54	
256..16	0.52	0.57	
128..8	0.56	0.61	

Переглянути фрагмент отриманої послідовності з параметрами генерування $p_{01}=p_{10}=0.50$ можна на рис. 3.16.

Останній експеримент, результати якого наведено в табл. 3.4, був проведений із параметрами генерування $p_{01}=p_{10}=0.05$, тобто ряд з малою ймовірністю змінює напрям руху.

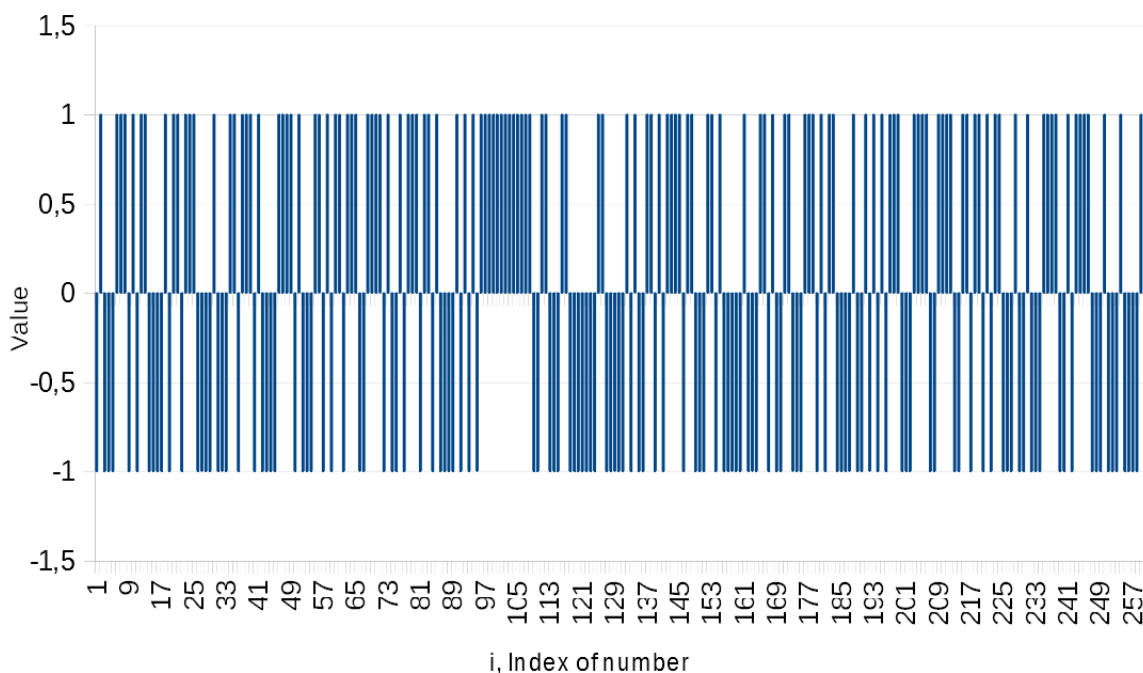


Рис. 3.16. Гістограма сигналу, отриманого генеруванням з параметрами $p_{01}=p_{10}=0.50$

Таблиця 3.4. Показники Херста при генеруванні послідовності з параметрами $p_{01}=p_{10}=0.05$

k	№ експ. 1	№ експ. 2	№ експ. 3
1024..64	0.48	0.58	0.45
512..32	0.52	0.63	0.56
256..16	0.66	0.77	0.72
128..8	0.78	0.83	0.83
k	№ експ. 4	№ експ. 5	№ експ. 6
1024..64	0.54	0.61	0.58
512..32	0.60	0.66	0.61
256..16	0.77	0.67	0.69
128..8	0.84	0.73	0.82
k	№ експ. 7	№ експ. 8	№ експ. 9
1024..64	0.51	0.37	0.64
512..32	0.58	0.49	0.69
256..16	0.62	0.65	0.79
128..8	0.73	0.79	0.86
k	№ експ. 10	№ експ. 11	Mean
1024..64	0.39	0.64	0.53
512..32	0.45	0.69	0.59
256..16	0.58	0.76	0.70
128..8	0.73	0.80	0.80
k	Mean -3σ	Mean $+3\sigma$	
1024..64	0.44	0.61	
512..32	0.52	0.66	
256..16	0.64	0.76	
128..8	0.75	0.84	

В результаті, числова послідовність персистентна і здатна зберігати тренд деякий час. Але, в той же час, на великих проміжках у 1024 відліків значення показника Херста спостерігається близьким до $H=0.5$. Це означає, що на великих відстанях розмах кумулятивного ряду не відрізняється від кумулятивного ряду класичної випадкової послідовності, де різниця між максимальним та мінімальним значеннями зростає в середньому пропорційно кореню з кількості зроблених кроків.

На малих відстанях показник Херста сильно відрізняється, і сягає $H=0.8$. Відповідно до цього, існує масштаб, для якого самоподібний трафік, як і в попередньому випадку, матиме властивості класичного випадкового процесу.

Фрагмент отриманої послідовності можна побачити на рис. 3.17.

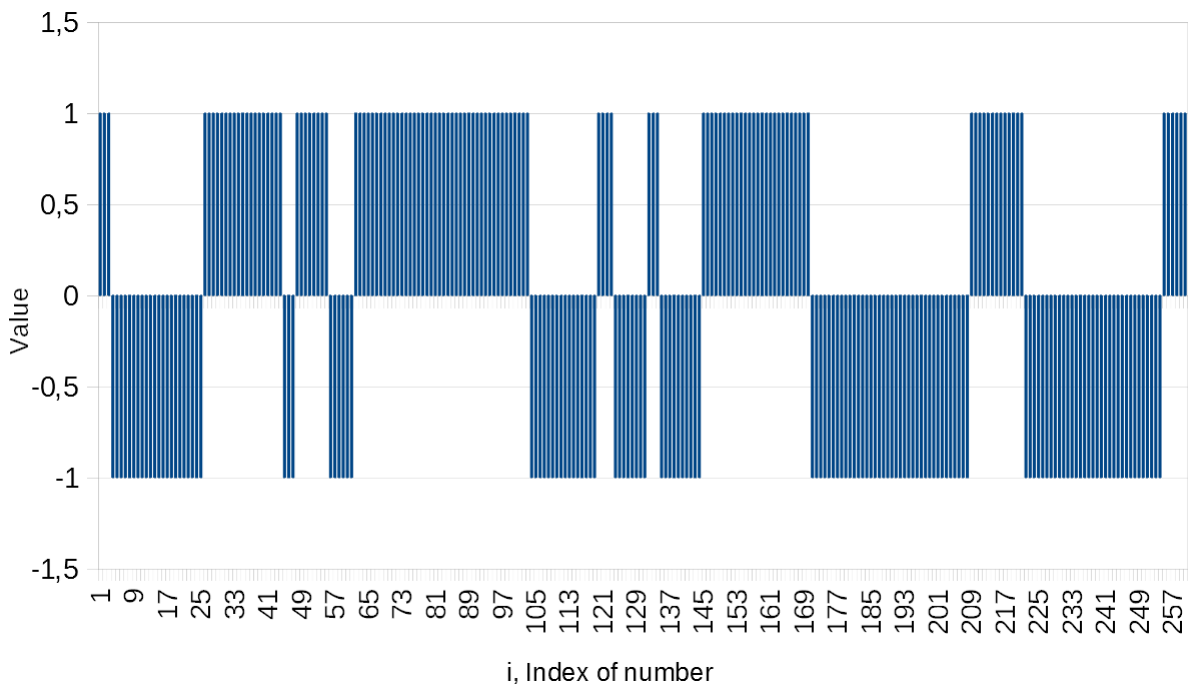


Рис. 3.17. Гістограма сигналу, отриманого генеруванням з параметрами $p_{01}=p_{10}=0.05$

Таким чином, експеримент показав, що на різних масштабах показники Херста відрізняються.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі запропоновано метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку, який відрізняється від відомих використанням нової міри визначення фрактальної розмірності бінарного трафіку, що дало змогу зв'язати аналітично його статистичні та фрактальні властивості, підвищити точність визначення фрактальної розмірності та зменшити кількість арифметичних операцій при фрактальному аналізі.

Розв'язано задачу аналітичного вираження фрактальної розмірності числової послідовності на основі її густини розподілу випадкової величини (3.18). На основі побудованого підходу розглянуто конкретний випадок випадкової бінарної послідовності, на якій показано наявність залежності фрактальної розмірності від ширини розбиття послідовності на прямокутники. На основі наявності такої залежності сформульовано вимогу виконувати розбиття в діапазонах, що використовуються для розв'язання конкретних задач. Результати можуть бути використані для покращення моделювання фрактальних випадкових послідовностей, систем масового обслуговування, моделювання трафіку комп'ютерних та телекомунікаційних мереж.

Проведено експериментальне дослідження якості роботи запропонованого методу аналізу мережевого трафіку, а саме: здійснено визначення фрактальної розмірності мережевого трафіку за його ймовірнісними властивостями. Також результати якості роботи запропонованого методу було порівняно з отриманими за методом на основі R/S-аналізу.

Для проведення експериментів було використано бінарний часовий ряд, змодельований за допомогою теорії марківських процесів, персистентність якого регулюється завданням ймовірностей зміни станів «0» та «1» на протилежний.

Як показали проведені експерименти на симульованому мережевому трафіку, запропонований метод дає більшу точність роботи та однозначність результатів, на відміну від методу R/S-аналізу, незалежно від довжини досліджуваного ряду.

R/S-аналіз дає різні значення при різних розмірах кумулятивної суми, і чим більший крок кумулятивної суми, тим сильніше відрізняється визначене нею значення показника Херста між собою. Зазначене свідчить про неоднозначність цього методу та можливість маніпулювання результатами за допомогою обрання розміру кумулятивних сум. Запропонований же метод не має цього недоліку. Розроблений метод є однозначним і не залежить від проміжку розглядання, тому що він не використовує кумулятивні суми.

Розроблений метод дає менший відсоток відхилення від середнього значення показника Херста, а отже – й більшу точність визначення фрактальної розмірності: R/S-аналіз має відхилення 2,5%, а розроблений метод – 1,8%.

Список літератури до розділу 3

1. Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level / W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, D. V. Wilson. *IEEE/ACM Transactions on networking*. 1997. No. 5 (1). P. 71–86. DOI: 10.1109/90.554723.
2. Norros I. The management of large flows of connectionless traffic on the basis of self-similar modeling. *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications ICC'95*. 1995. Vol. 1. P. 451–455. DOI: 10.1109/ICC.1995.525210.
3. Стасев Ю. В., Харітонов О. Л., Кучук Г. А. Визначення непараметричних статистик фрактального мережного трафіка. *Системи обробки інформації*. 2006. Вип. 4. С. 163–172. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_4_26.

4. Characterisation of wireless network traffic: Fractality and stationarity / S. Mukherjee, R. Ray, M. H. Khondekar et al. *Third Int. Conf. on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*. Kolkata, India, 2017. P. 79–83. DOI: 10.1109/ICRCICN.2017.8234485.
5. A statistical signal processing approach in wireless network traffic analysis / S. Chowdhury, S. Paul, D. Chatterjee et al. *Int. Conf. on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. Greater Noida, India, 2018. P. 70–73. DOI: 10.1109/GUCON.2018.8675019.
6. Biernacki A. Analysis and modelling of traffic produced by adaptive HTTP-based video. *Multimed Tools*. 2017. Vol. 76. P. 12347–12368. DOI: 10.1007/s11042-016-3623-8.
7. Fractal analysis of printed structure images / O. Zmeškal, M. Nežádal, B. Komendová et al., Institute of Physical and Applied Chemistry, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic. *Harmonic and Fractal Image Analysis*. 2001. P. 3–5. URL: http://imagesci.fch.vut.cz/download/en07_brat03.pdf.
8. Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature* Hardcover. Times Books. 2nd ed. New York: WH freeman, 1982. 468 p.
9. Кучук Г. А., Можаяев О. О., Воробйов О. В. Аналіз та моделі самоподібного трафіка. *Авиационно-космическая техннка и технология*. 2006. Вып. 9, № 35. С. 173–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35.
10. On the self-similar nature of Ethernet traffic / W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, D. Wilson. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1994. Vol. 2, no. 1. P. 1–15. DOI: 10.1109/90.282603.
11. Кучук Г. А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка. *Системи обробки інформації: зб. наук. праць*. Харків: Харк. ун-т Повітряних Сил, 2005. Вып. 5, № 45. С. 74–84.
12. Казімірова В. В., Можаяев М. О., Кузьменко В. Є. Особливості моделювання передачі інформації у комп'ютерній мережі системи

автоматичної ідентифікації суден. *Системи обробки інформації*. 2014. Вип. 7, № 123. С. 83–88.

13. Нич Л. Я., Каменський Р. М. Визначення показника Герста за допомогою фрактальної розмірності, обчисленої клітинковим методом на прикладі коротких часових рядів. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Інформаційні системи та мережі*. 2015. Вип. 814, № 1. С. 100–111. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/29767>.

14. Математична модель розподілу навантаження в телекомунікаційних мережах спеціального призначення / І. О. Романенко, Р. М. Животовський, С. М. Петрук та ін. *Системи обробки інформації*. 2017. Т. 3, № 149. С. 61–71. DOI: 10.30748/SOI.2017.149.13.

15. Теорія телетрафіку / В. Я. Воропаєва та ін. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. 202 с. URL: <http://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/4134>.

16. Vassiliou P.-C. G., Georgiou A. C. Markov and Semi-Markov Chains, Processes, Systems and Emerging Related Fields: Mdpi AG. 2021. 294 p. DOI: 10.3390/math9192490.

17. Farahani A., Shoja A., Tohidi H. Markov and semi-Markov models in system reliability. *Engineering Reliability and Risk Assessment*. Elsevier, 2023. P. 91–30. DOI: 10.1016/B978-0-323-91943-2.00010-1.

18. Analysis of the queueing-inventory system with impatient customers and mixed sales / Y. Zhang, D. Yue, L. Sun, J. Zuo. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. Vol. 2022. DOI: 10.1155/2022/2333965.

19. Developing a model of the dynamics of states of a recommendation system under conditions of profile injection attacks / Ye. Meleshko, O. Drieiev, M. Yakymenko, D. Lysytsia. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, no. 2 (106). P. 14–24. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096707995&origin=resultslist>.

20. Dimitrakos T. D., Kyriakidis E. G. A semi-Markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous

repair times. *International Journal of Production Economics*. 2008. Vol. 111, no. 2. P. 752–762. DOI: 10.1016/j.ijpe.2007.03.010.

21. Li Q.-L., Lui J. C. S. Block-structured supermarket models. *Discrete Event Dynamic Systems*. 2014. Vol. 26, no. 2. P. 147–182. DOI: 10.1007/s10626-014-0199-1.

22. Okamura H., Miyata S., Dohi T. A Markov decision process approach to dynamic power management in a cluster system. *IEEE Access*. 2015. Vol. 3. P. 3039–3047. DOI: 10.1109/access.2015.2508601.

23. Li Q.-L. Nonlinear Markov processes in big networks. *Special Matrices*. 2016. Vol. 4, no. 1. DOI: 10.1515/spma-2016-0019.

24. Feinberg E. A., Yang F. Optimal pricing for a GI/M/k/N queue with several customer types and holding costs. *Queueing Systems*. 2015. Vol. 82, no. 1–2. P. 103–120. DOI: 10.1007/s11134-015-9457-7.

25. Park J. How can calculate hurst exponent in python? (lags parameter issue). 2018. URL: <https://quantopian-archive.netlify.app/forum/threads/how-can-calculate-hurst-exponent-in-python-lags-parameter-issue.html>.

26. Millán G., Urrutia E. S. J., Guzmán M. V. A simplified multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks. *Computación y Sistemas*. 2019. Vol. 23, no. 4. P. 1517–1521. DOI: 10.13053/cys-23-4-2831.

27. Minkowski-Bouligand Dimension. Wolfram Mathworld. URL: <https://mathworld.wolfram.com/Minkowski-BouligandDimension.html>.

28. Schroeder M. Fractals, chaos, power laws: Minutes from an infinite paradise. *Physics Today*. 1991. Vol. 44, no. 11. P. 41–45. DOI: 10.1063/1.2810323.

29. Rossales I., Luppe M. Architecture for fractal dimension estimation based on Minkowski-Bouligand method using integer distances. *IEEE 27th Int. Conf. on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*, (July, 2016). P. 231–232. DOI: 10.1109/ASAP.2016.7760803.

30. A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method / H. Drieieva, O. Drieiev, Ye. Meleshko et al. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*: CEUR-WS, Gliwice, Poland / Vasyl Lytvyn (Ed.). 2022. Vol. 3154, P. 1694–1707 (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>.

31. Multifractal properties of traffic generator based on Markov chains / V. Simakhin, S. Bondar, H. Drieieva et al. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*: CEUR-WS, Lviv. Ukraine / Solomiia Fedushko (Ed.). 2019. Vol. 2588. P. 567–579 (ISSN 1613-0073). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2588/paper48.pdf>.

32. Фрактальний аналіз генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова / Г. М. Дреєва, О. А. Смірнов, О. М. Дреєв, Т. В. Смірнова. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 2 (33). С. 161–172. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/33/33_Drieieva.html. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.2(33).161-172.

33. Дреєва Г. М., Смірнов С. А. Дослідження мультифрактальних властивостей генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова. *Кібербезпека та інформаційні технології*: монографія. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 93–105.

34. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Денисенко О. О. Визначення фрактальної розмірності числової послідовності за розподілом ймовірності значень її елементів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2018. Вип. 31. С. 119–128. DOI: 10.32515/2409-9392.2018.31.119-128. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/eng/archive/31/31_Dreyeva.html.

35. Дослідження якості роботи методу визначення фрактальної розмірності мережевого трафіку за його ймовірнісними властивостями / Г. М. Дреєва, О. М. Дреєв, Є. В. Мелешко та ін. *Сучасні напрями розвитку*

інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: тези доп. 12-ї Міжнар. наук.-техн. конф., (Баку–Харків–Жиліна, 27–28 квіт. 2022 р.) / уклад. В. В. Косенко. Харків: ФОП Петров В.В., 2022. Т. 1. С.

36. Дреєва Г. М., Смірнов С. А., Коноплицька-Слободенюк О. К. Дослідження генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова та його мультифрактальних властивостей. *Інформаційна безпека та інформаційні технології: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 35.*

РОЗДІЛ 4

МЕТОД ПРОГРАМНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ ТА МЕТОД АДАПТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВТРАТИ ПАКЕТІВ НА МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЯХ

У цьому розділі було створено програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, марківських процесів та фрактальних часових рядів. Також розроблено метод адаптивної маршрутизації фракталоподібного трафіку для підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності трафіку. Якість роботи запропонованого методу маршрутизації була перевірена шляхом проведення серії експериментів на розробленій програмній імітаційній моделі комп'ютерної мережі при моделюванні пікових навантажень на маршрутизатори.

Запропонований метод адаптивної маршрутизації трафіку спрямований на підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених мережевих пакетів завдяки врахуванню ймовірності втрати пакетів маршрутизатором при розрахунку найкоротших шляхів передачі інформації.

Також запропонована програмна імітаційна модель, що дозволяє генерувати структуру комп'ютерної мережі та симулювати рух трафіку між мережевими пристроями з метою тестування алгоритмів маршрутизації.

Структура комп'ютерних мереж моделювалася за допомогою теорії складних мереж. Складні мережі є стохастичними мережами з нетривіальною топологією, що відрізняються від класичних стохастичних мереж наявністю невеликої кількості вузлів з великим числом зв'язків [1, 2]. Більшість реальних мереж – складні; наприклад, комп'ютерні, транспортні та соціальні мережі є складними. У складних мереж є такі основні властивості [1-4]: безмасштабність, невеликий діаметр мережі, високий коефіцієнт

кластеризації та високий коефіцієнт транзитивності, гігантська зв'язна компонента або повна зв'язність, присутні ієрархічні зв'язки, присутні складні кластерні утворення, асортативність – виникнення зв'язків між вершинами, які чимось схожі між собою, у вузькому розумінні – виникнення зв'язків між вершинами з великою кількістю зв'язків. Усі ці властивості наявні у комп'ютерних мережах, тому методи моделювання складних мереж дозволяють досить добре відтворювати їх характеристики.

Мережевий трафік має фрактальні властивості і може моделюватися з застосуванням фрактальних часових рядів та марківських процесів [5, 6, 12-15, 25-27]. Тож генерацію мережевого трафіку для відтворення його фрактальних властивостей у цій роботі було вирішено здійснювати на основі марківських процесів, що часто використовується для моделювання трафіку різних систем масового обслуговування [16-19].

4.1. Розробка методу програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку

Чим більша та складніша комп'ютерна мережа, тим більше вимог висувається до алгоритмів маршрутизації для того, щоб вони могли забезпечити потрібну якість обслуговування. При дослідженні, удосконаленні та розробці алгоритмів маршрутизації важливим є їх тестування. Для тестування алгоритмів маршрутизації повинна бути наявність комп'ютерна мережа заданої складності або програмна імітаційна модель. Обидва варіанти мають свої плюси та мінуси, але можна сміливо зауважити, що на початкових етапах розробки якісна програмна імітаційна модель значно прискорить процес розробки, а фінальні експерименти перед практичним впровадженням доцільно проводити уже на реальних комп'ютерних мережах.

Комп'ютерна мережа у розробленій моделі представлена повнозв'язним неорієнтованим зваженим графом, в якому вузлами є

маршрутизатори, а ребрами – мережеві зв'язки між ними. Вага ребер – величина, обернена до пропускної спроможності каналу зв'язку. Вузли містять у собі черги, в яких розміщуються прийняті пакети перед визначенням маршруту його відправлення та відправкою на наступний вузол. Час у моделі представлений дискретними ітераціями. Маршрутизація здійснюється на основі алгоритму, який і необхідно протестувати на моделі.

У розробленій моделі передбачено два режими роботи:

1) на кожній ітерації генерується випадкова кількість пакетів трафіку з випадковими пристроями відправниками та одержувачами та здійснюється їх маршрутизація;

2) на першій ітерації однократно генерується деяка кількість пакетів трафіку з випадковими пристроями відправниками та одержувачами, на всіх наступних ітераціях здійснюється тільки їх маршрутизація.

Етапи роботи розробленої програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі:

Етап 1. Генерація структури комп'ютерної мережі (рис. 4.1) на основі моделі Барабаші-Альберт [11].

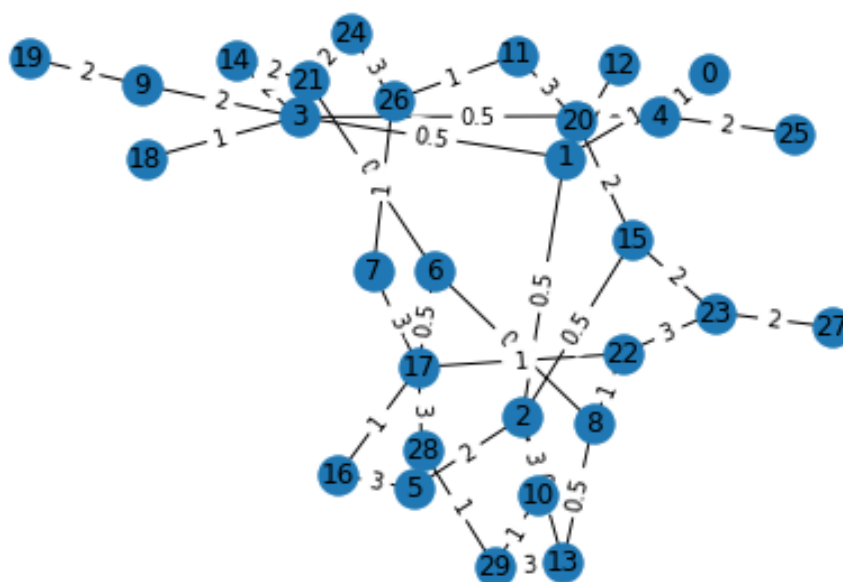


Рис. 4.1. Приклад структури комп'ютерної мережі, згенерованої у розробленій програмній імітаційній моделі (вузли пронумеровані, на ребрах показана вартість переходу)

Етап 2. Перевірка, чи отриманий граф мережі повнозв'язний. Якщо згенерований граф не повнозв'язний – додавання ребер між відокремленими частинами графу.

Етап 3. Присвоєння ребрам ваги, що залежить від того, які вершини вони з'єднують – чим більше зв'язків у вузлів, які з'єднує ребро, тим менша вага цього ребра (і, відповідно, тим більша пропускна спроможність відповідного каналу зв'язку).

Етап 4. Генерація пакетів трафіку на відправку. На кожен вузол з деякою ймовірністю відправляється випадкова кількість пакетів з випадковими адресатами. Пристрій, що отримав пакети, ставить їх у свою внутрішню чергу. Трафік генерується з фрактальними властивостями [22-24]. Генерація трафіку відбувається на основі теорії марківських процесів, що часто використовується для моделювання трафіку різних систем масового обслуговування [17-21].

Етап 5. Тестування алгоритмів маршрутизації. Обирається алгоритм маршрутизації для тестування. Пакети трафіку, що стоять у чергах у вузлах мережі, обслуговуються за допомогою обраного алгоритму маршрутизації. Моделюється рух пакетів по мережі. Якщо деякому пакету не вистачило місця у черзі деякого вузла – пакет втрачається. У моделі підраховуються всі отримані та втрачені пакети.

Етап 6. Завершення роботи моделі. Відбувається по досягненню заданої кількості ітерацій (наприклад, 1000 ітерацій), або якщо модель працює у другому режимі роботи, то умовою зупинки також може бути стан, коли всі черги порожні і всі пакети знаходяться серед розісланих чи втрачених.

Для генерації фрактального бінарного трафіку використано запропоновану математичну модель з розділу 3.2.

Цей генератор характеризується станами 0 або 1, та ймовірностями знаходження в цих станах як $p_0=p_{10}/(p_{01}+p_{10})$ та $p_1=p_{01}/(p_{01}+p_{10})$, де p_{ij} –

ймовірності відповідних переходів. Інтенсивність трафіку такого генератора буде в межах $[0, 1]$ і дорівнюватиме ймовірності отримати на виході генератора 1: p_1 [10].

4.2. Дослідження роботи відомого алгоритму маршрутизації OSPF при пікових навантаженнях на мережеві пристрої у запропонованій програмній імітаційній моделі комп'ютерної мережі

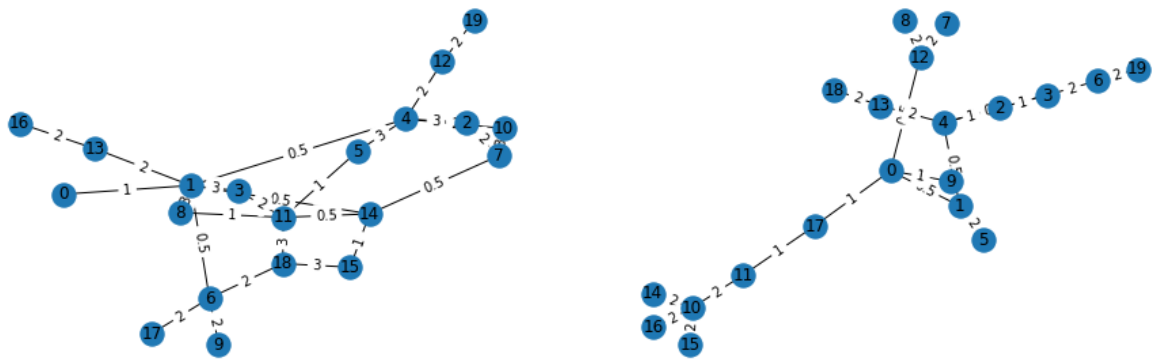
На розробленій моделі було проведено тестування алгоритму маршрутизації OSPF, що заснований на технології відстеження стану каналу (link-state technology) і використовує для пошуку найкоротшого шляху алгоритм Дейкстри. Одержані результати показали працездатність розробленої моделі. В подальшому на розробленій моделі нами будуть тестуватися покращення цього алгоритму.

На розробленій моделі було проведено серію експериментів для визначення того, як саме різна фрактальна розмірність трафіку при високих значеннях інтенсивності трафіку впливає на кількість втрачених пакетів, а отже – і на якість обслуговування.

Було згенеровано три комп'ютерні мережі, зображені на рис. 4.2(а-с). В кожній із мереж по 20 маршрутизаторів. Довжина черги в кожному маршрутизаторі – 128 пакетів. Інтенсивність трафіку становила 0.7. Значення фрактальної розмірності бралися наступні: 1.99, 1.87, 1.75, 1.50, 1.37, 1.25, 1.01.

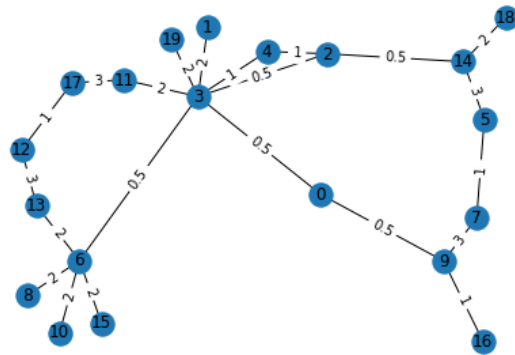
Використовувався перший режим роботи моделі – на кожній ітерації генерується випадкова кількість пакетів трафіку з випадковими пристроями відправниками й одержувачами та здійснюється їх маршрутизація. Підраховувалася кількість втрачених пакетів трафіку по проходженню 100 ітерацій часу моделі.

Результати експериментів наведені у таблиці 4.1, де подано середні значення на основі експериментів з мережами, вказаними на рис. 4.2(а-с).



(a)

(b)



(c)

Рис. 4.2. Згенеровані для експерименту структури комп'ютерних мереж

Таблиця 4.1. Результати серії експериментів для визначення того, як різна фрактальна розмірність трафіку при його інтенсивності 0,7 впливає на кількість втрачених пакетів

№	Фрактальна розмірність трафіку	Максимальна кількість пакетів на відправку з одного пристрою в одиницю часу	Середнє значення втрачених пакетів	Середня кількість пристроїв з втраченими пакетами
1	1.99	55	0.00000	0
2	1.99	60	0.00000	0
3	1.99	65	54.7981	11
4	1.99	70	54.8461	11
5	1.99	75	54.8521	11
6	1.99	80	54.8568	11
7	1.99	85	54.8718	11
8	1.99	90	54.8866	11
9	1.87	55	0.00000	0
10	1.87	60	0.00000	0
11	1.87	65	54.7981	11
12	1.87	70	54.8461	11
13	1.87	75	54.8521	11

Продовження табл. 4.1

№	Фрактальна розмірність трафіку	Максимальна кількість пакетів на відправку з одного пристрою в одиницю часу	Середнє значення втрачених пакетів	Середня кількість пристроїв з втраченими пакетами
14	1.87	80	54.8568	11
15	1.87	85	54.8718	11
16	1.87	90	54.8866	11
17	1.75	55	0.00000	0
18	1.75	60	0.00000	0
19	1.75	65	0.00000	0
20	1.75	70	0.00000	0
21	1.75	75	0.00000	0
22	1.75	80	0.00000	0
23	1.75	85	31.2903	7.3
24	1.75	90	98.8170	20
25	1.5	55	0.00000	0
26	1.5	60	0.00000	0
27	1.5	65	0.00000	0
28	1.5	70	0.00000	0
29	1.5	75	0.00000	0
30	1.5	80	0.00000	0
31	1.5	85	52.6565	12
32	1.5	90	98.8946	20
33	1.37	55	0.00000	0
34	1.37	60	0.00000	0
35	1.37	65	0.00000	0
36	1.37	70	0.00000	0
37	1.37	75	15.7478	3.6
38	1.37	80	54.0190	12
39	1.37	85	96.0120	19.6
40	1.37	90	99.3858	20
41	1.25	55	0.00000	0
42	1.25	60	0.00000	0
43	1.25	65	0.00000	0
44	1.25	70	0.00000	0
45	1.25	75	35.7258	8.3
46	1.25	80	92.6598	19.6
47	1.25	85	98.5400	20
48	1.25	90	99.3523	20
49	1.01	55	0.00000	0
50	1.01	60	0.00000	0
51	1.01	65	94.3441	19
52	1.01	70	94.4190	19
53	1.01	75	92.8931	18.6
54	1.01	80	97.8610	19.6
55	1.01	85	94.6751	19
56	1.01	90	96.3461	19.3

Фрактальна розмірність змінюється в діапазоні (1, 2), а її значення можна інтерпретувати наступним чином:

– значення менші 1.5 – процес персистентний, тобто зберігає свій тренд; чим менша фрактальна розмірність, тим сильніше зберігається тренд; чим ближче до 1.5 – тим більш випадковий процес;

– значення 1.5 – процес повністю випадковий;

– значення більші 1.5 – процес антиперсистентний – будь-яка тенденція прагне змінитись протилежною.

Аналізуючи результати експерименту, можна зробити такі висновки:

– найменше втрачених пакетів, коли процес випадковий або має слабо виражені тренди. Найменше втрачених пакетів було при фрактальній розмірності 1.5, також мало втрачених пакетів було при фрактальних розмірностях 1.37 та 1.75;

– персистентні та антиперсистентні процеси (такі, що мають пам'ять), викликають більші втрати пакетів при тій же інтенсивності трафіку та максимальних кількостях пакетів на відправку з одного пристрою в одиницю часу. Причому, антиперсистентні процеси викликають значно більші втрати, ніж персистентні.

Таким чином, при виконанні маршрутизації трафіку та пошуку оптимальних шляхів для відправки IP-пакетів може бути корисним визначати та враховувати фрактальну розмірність трафіку на вході кожного маршрутизатора та використовувати її при розрахунку метрик для визначення найкращих маршрутів [10].

4.3. Розробка методу прогнозування ймовірності втрати мережевих пакетів на маршрутизаторах при відомій інтенсивності та фрактальній розмірності трафіку

Було проведено дослідження на основі математичного моделювання, яким чином фрактальна розмірність трафіку впливає на ймовірність переповнення черги у маршрутизаторі та втрати мережевих пакетів.

Для генерації фрактального бінарного трафіку використано запропоновану математичну модель з розділу 3.2.

Для генератора фрактального бінарного трафіку фрактальна розмірність за введеною метрикою M виражається через ймовірності p_{01} та p_{10} зміни поточного стану на протилежний наступним виразом [8, 9]:

$$D(p_{01}, p_{10}) = 2 + \frac{p_{10}(1-p_{01})\ln(1-p_{01}) + p_{01}(1-p_{10})\ln(1-p_{10})}{2p_{01}p_{10}}. \quad (4.1)$$

Потік одиничних значень, що приймає значення в діапазоні $[0; 1]$, можна знайти як:

$$\tau = \frac{p_{01}}{p_{01} + p_{10}}. \quad (4.2)$$

Метод підбору ймовірностей переходів між станами ланцюга Маркова p_{01} та p_{10} для моделювання трафіку з заданою фрактальною розмірністю та інтенсивністю

Для імітування реальної бінарної послідовності достатньо оцінити ймовірності p_{01} та p_{10} . Для імітування трафіку через значення потоку τ та фрактальну розмірність D потрібно відшукати ймовірності p_{01} та p_{10} , які є невідомими. Тому сформовано наступну задачу:

Дано фрактальну розмірність D та середній потік одиничних значень τ .
На входні величини накладено обмеження $D \in (1..2), \tau \in (0..1)$.

Шукаються ймовірності p_{01} та $p_{10} \in (0..1)$.

Розв'яжемо сформульовану задачу.

З формули (4.2) визначимо ймовірність переходу від одиничного до нульового стану p_{10} через іншу ймовірність p_{01} :

$$p_{10} = p_{01} \frac{1-\tau}{\tau}. \quad (4.3)$$

Завдяки цьому рівняння (4.1) можна звести підстановкою (4.3) до рівняння з однією змінною:

$$D = 2 + (1-p_{01}) \frac{\ln(1-p_{01})}{2p_{01}} + (1-p_{01}(1-\tau)/\tau) \frac{\ln(1-p_{01}(1-\tau)/\tau)}{2p_{01}(1-\tau)/\tau}.$$

Для спрощення подальших записів приймемо, що $p=p_{01}$:

$$D = 2 + (1 - p) \frac{\ln(1 - p)}{2p} + (1 - p(1 - \tau)/\tau) \frac{\ln(1 - p(1 - \tau)/\tau)}{2p(1 - \tau)/\tau}. \quad (4.4)$$

Рівняння (4.4) є нелінійним відносно p і не має аналітичних розв'язків. Тому для розв'язання відносно p потрібно перетворити його для пошуку нулів:

$$f(p) = 2 - D + (1 - p) \frac{\ln(1 - p)}{2p} + (1 - p(1 - \tau)/\tau) \frac{\ln(1 - p(1 - \tau)/\tau)}{2p(1 - \tau)/\tau}$$

та використати один із чисельних методів поступового наближення. Пропонується використати метод дотичних прямих. Далі наведено алгоритм, де верхнім індексом показано результат теперішньої ітерації:

$$1) p^0 = 0.00001.$$

2) $p^{i+1} := p^i - k f(p^i)/f'(p^i)$, де $k \in (0;1]$ – коефіцієнт для покращення збіжності методу (чим він менший, тим стійкіший метод, але потребує в $1/k$ більше ітерацій).

До досягнення заданої точності повторити п. 2, після чого розраховують шукані величини:

$$3) p_{01} = p, p_{10} = p(1 - \tau)/\tau.$$

Також є можливим використання інших чисельних методів.

Мале початкове значення ймовірності відповідає зоні стійких рішень, при яких метод дотичних частіше приводить до розв'язку рівняння.

Похідна для виразу з п. 2 розраховується за наступним виразом:

$$f'(p) = -\frac{p + \ln(1 - p)}{2p^2} - \frac{p(1 - \tau)/\tau + \ln(1 - p(1 - \tau)/\tau)}{2p^2(1 - \tau)/\tau}.$$

Отриманий ітераційний процес дає змогу з фрактальної розмірності D та інтенсивності потоку генерації одиниць τ отримати параметри для генерування трафіку p_{01} та p_{10} .

В результаті чисельного імітаційного моделювання, при різних значеннях фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку, було

отримано середні значення довжини черги в вузловому пристрої та ймовірність переповнення черги у 10 пакетів:

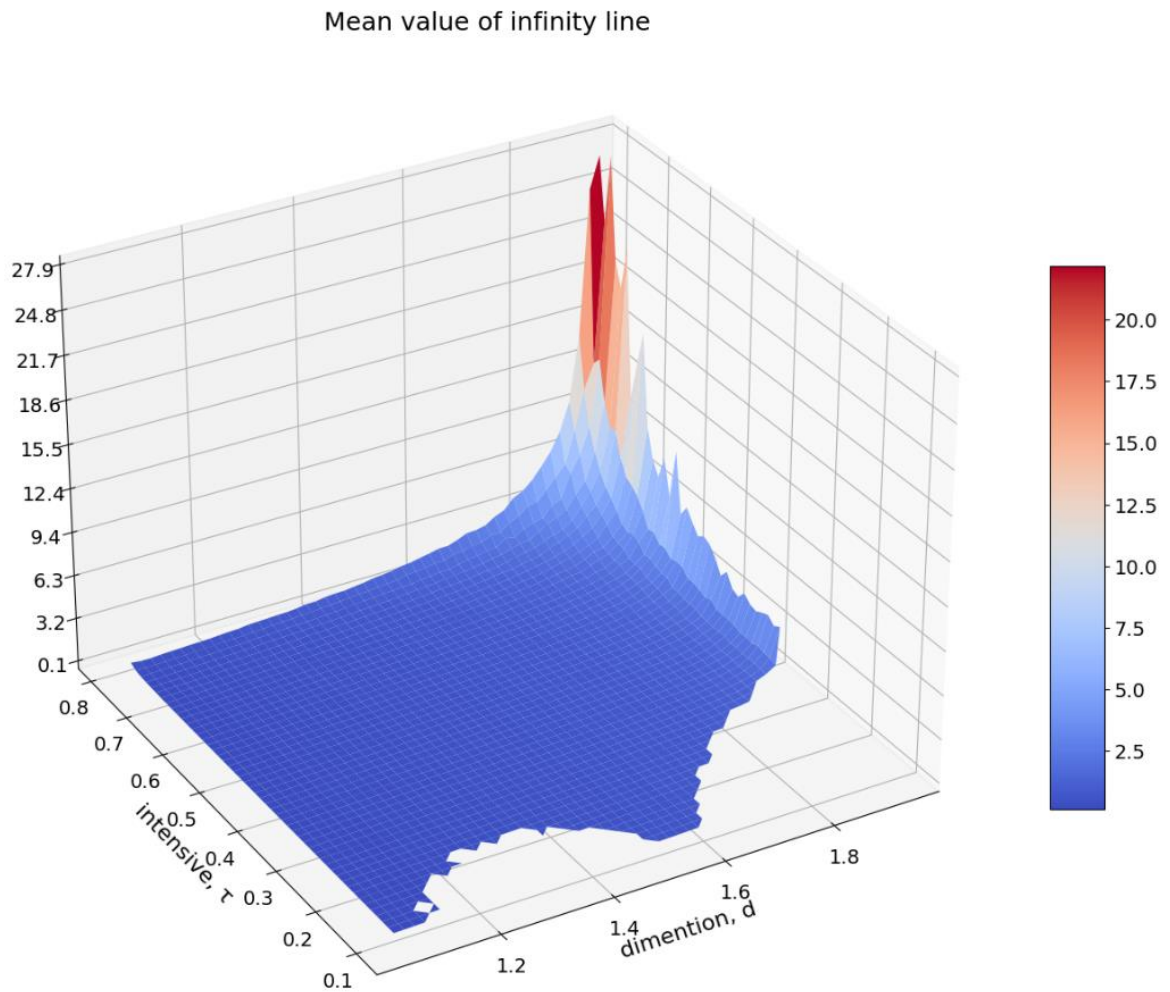


Рис. 4.3. Середні значення довжини черги в вузловому пристрої при різних значеннях фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку, отримані в результаті чисельного імітаційного моделювання

Пусті ділянки відповідають недопустимим розв'язкам при пошуку ймовірностей зміни стану генератора p_{01} та p_{10} . Відповідно, при заданих D та τ , генератор неспроможний видавати послідовність із заданими характеристиками, що візуалізується областю допустимих аргументів (з математики «область визначення»), рис. 4.5:

Probability of lost package

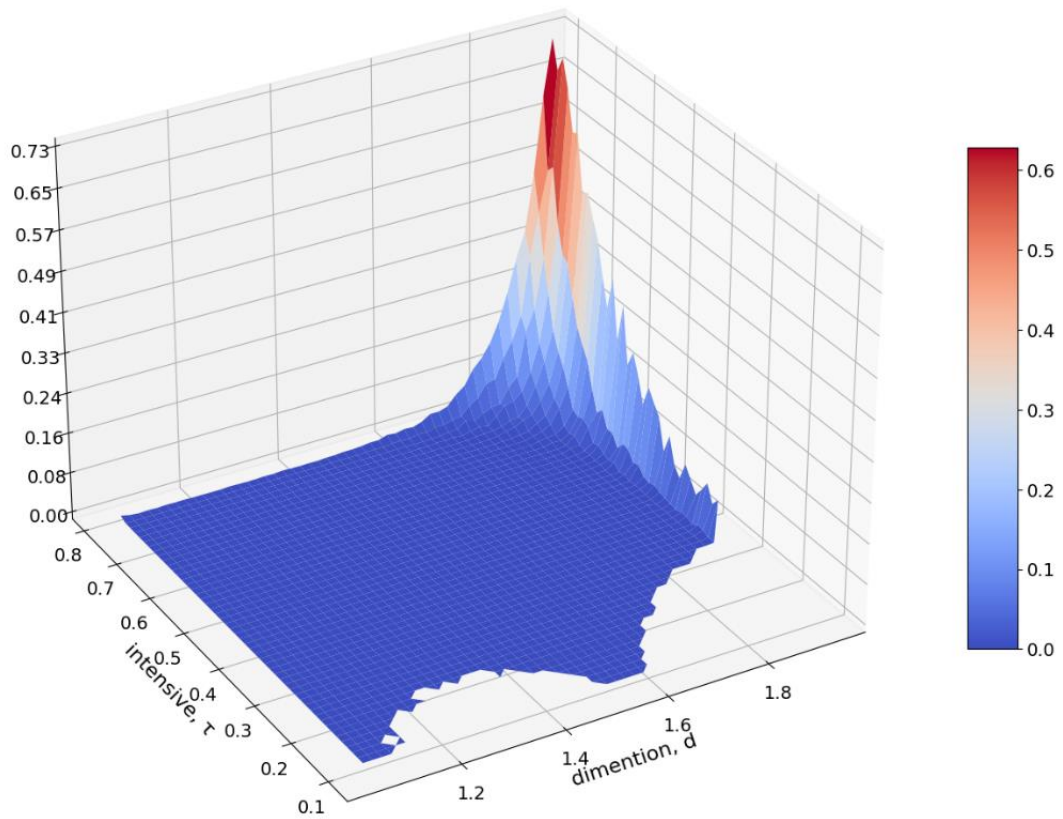


Рис. 4.4. Ймовірність переповнення черги у 10 пакетів при різних значеннях фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку, отримані в результаті чисельного імітаційного моделювання

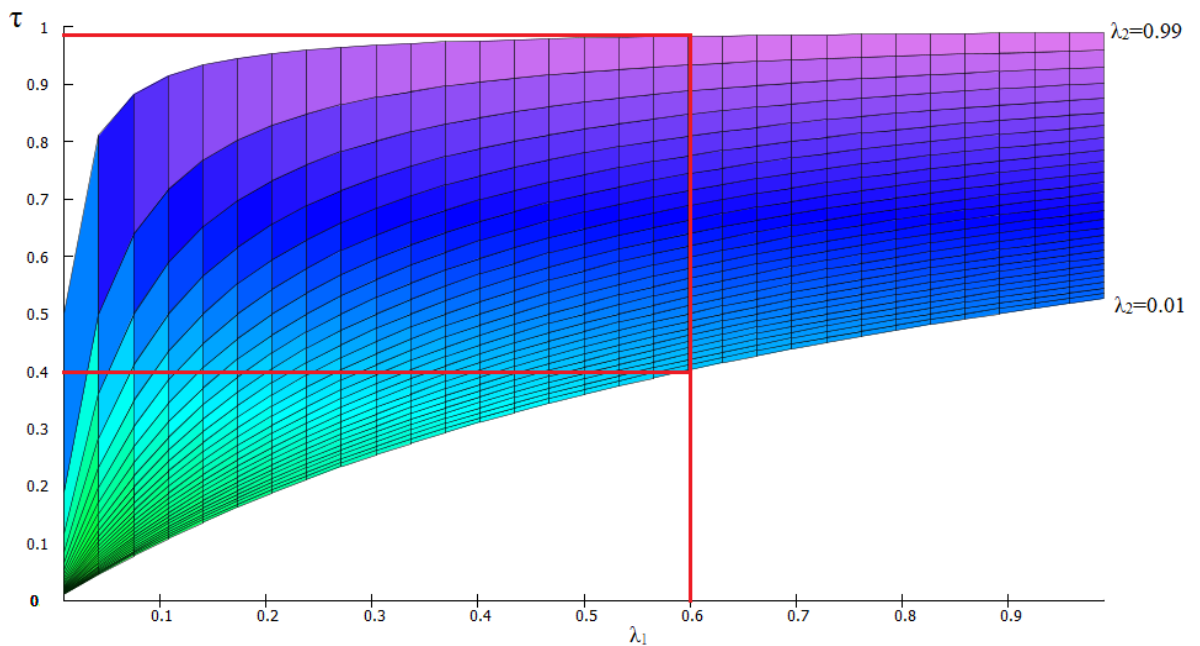


Рис. 4.5. Можливі значення інтенсивності потоку трафіку

Можливі значення інтенсивності потоку трафіку (рис. 4.5) залежать від фіксованого значення однієї з ймовірностей, тобто не всі трійки $p_{01}, p_{10} \in (0..1)$ є можливими. Нехай існує ймовірність втрати пакета за рахунок переповнення черги $p=f(\tau, D)$. Знайдемо її наближення за отриманими табличними даними (див. рис. 4.4). Шукаємо наближення у вигляді:

$$p_i \approx e^{-a(2-D_i)^n - b(1-\tau_i)^n},$$

де a, b шукані коефіцієнти, n – задане. Але в такому вигляді метод найменших квадратів не застосовний. Тому потрібно логарифмувати ліву та праву частини рівняння:

$$\ln(p_i) \approx -a(2-D_i)^n - b(1-\tau_i)^n.$$

Похибкою наближення вважатимемо різницю

$$\Delta_i^2 = (\ln(p_i) + a(2-D_i)^n + b(1-\tau_i)^n)^2,$$

або:

$$\Delta_i^2 = \ln(p_i)^2 + 2a \ln(p_i)(2-D_i)^n + 2b \ln(p_i)(1-\tau_i)^n + a^2(2-D_i)^{2n} + 2ab(2-D_i)^n(1-\tau_i)^n + b^2(1-\tau_i)^{2n},$$

де степінь 2 використано для підсилення чутливості до сильних відхилень та виключення ситуації взаємної компенсації додатних та від'ємних відхилень. Тоді за якість наближення можна вважати суму всіх квадратів відхилень, де менше значення відповідає кращому наближенню:

$$\sum_i \Delta_i^2 = \sum_i \ln(p_i)^2 + 2a \sum_i \ln(p_i)(2-D_i)^n + 2b \sum_i \ln(p_i)(1-\tau_i)^n + a^2 \sum_i (2-D_i)^{2n} + 2ab \sum_i (2-D_i)^n(1-\tau_i)^n + b^2 \sum_i (1-\tau_i)^{2n},$$

Для отримання наближення потрібно розв'язати задачу пошуку a, b таких, щоб:

$$\sum_i \Delta_i^2 \xrightarrow{a,b} \min.$$

Функція похибки наближення відносно змінних a та b має похідні, рівні нулю. Відносно n система буде нелінійною і не матиме аналітичного або єдиного розв'язку. Це дає можливість побудувати наступну систему:

$$\begin{cases} \left(\sum_i \Delta_i^2 \right)'_a = 0, \\ \left(\sum_i \Delta_i^2 \right)'_b = 0. \end{cases}$$

Знайдемо часткові похідні:

$$\left(\sum_i \Delta_i^2 \right)'_a = 2 \sum_i \ln(p_i)(2 - D_i)^n + 2a \sum_i (2 - D_i)^{2n} + 2b \sum_i (2 - D_i)^n (1 - \tau_i)^n, .$$

$$\left(\sum_i \Delta_i^2 \right)'_b = 2 \sum_i \ln(p_i)(1 - \tau_i)^n + 2a \sum_i (2 - D_i)^n (1 - \tau_i)^n + 2b \sum_i (1 - \tau_i)^{2n} ..$$

Тоді система рівнянь матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} 2 \sum_i \ln(p_i)(2 - D_i)^n + 2a \sum_i (2 - D_i)^{2n} + 2b \sum_i (2 - D_i)^n (1 - \tau_i)^n = 0, \\ 2 \sum_i \ln(p_i)(1 - \tau_i)^n + 2a \sum_i (2 - D_i)^n (1 - \tau_i)^n + 2b \sum_i (1 - \tau_i)^{2n} = 0. \end{cases}$$

Розв'язання системи дає наступний результат:

$$a = \frac{- \sum_i (\ln(p_i)(2 - D_i)^n) \sum_i (1 - \tau_i)^{2n} + \sum_i (\ln(p_i)(1 - \tau_i)^n) \sum_i (2 - D_i)^n (1 - \tau_i)^n}{\sum_i (2 - D_i)^{2n} \sum_i (1 - \tau_i)^{2n} + \left(\sum_i (2 - D_i)^n \sum_i (1 - \tau_i)^n \right)^2},$$

$$b = \frac{- \sum_i (\ln(p_i)(2 - \tau_i)^n) \sum_i (1 - D_i)^{2n} + \sum_i (\ln(p_i)(1 - D_i)^n) \sum_i (2 - D_i)^n (1 - \tau_i)^n}{\sum_i (2 - D_i)^{2n} \sum_i (1 - \tau_i)^{2n} + \left(\sum_i (2 - D_i)^n \sum_i (1 - \tau_i)^n \right)^2}.$$

На рис. 4.6 наведено залежність суми відхилень $\sum_i \Delta_i^2$ від показника степеня n .

З причини нелінійності отриманих рівнянь відносно n було проведено низку експериментів з різними значеннями показника степеня n . За результатами було обрано результат з наступними параметрами:

$$n=0.99, a=6.6297, b=11.1654, \sum_i \Delta_i^2 = 1645.5.$$

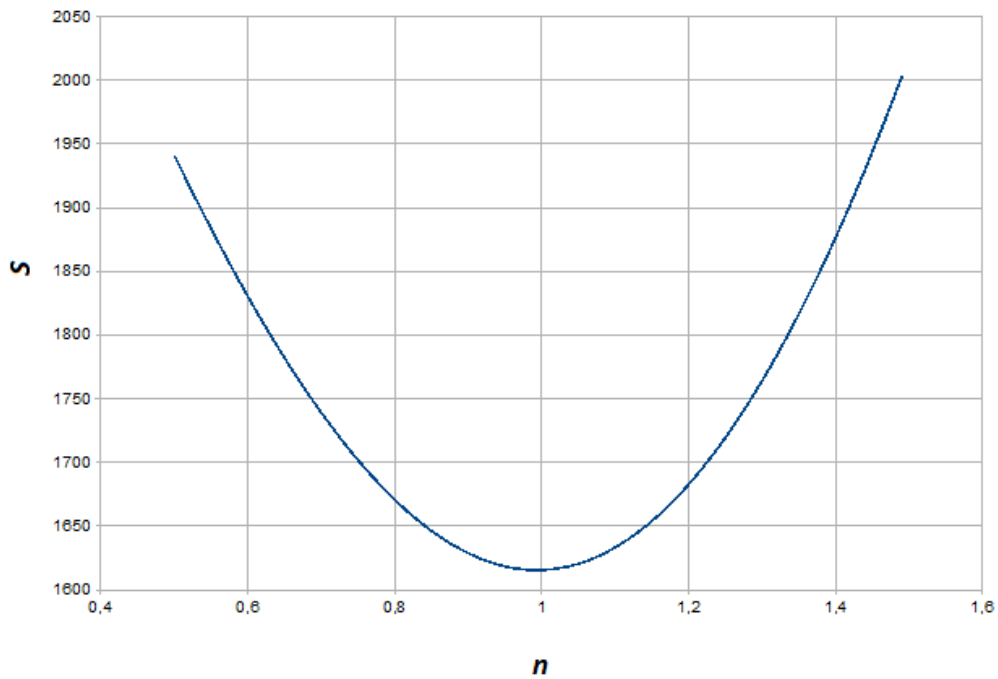


Рис. 4.6. Залежність суми відхилень $\sum_i \Delta_i^2$ від показника степеня n

Остаточно, можна користуватися наступним наближенням для прогнозу ймовірності втрати пакетів при відомій фрактальній розмірності:

$$p(D, \tau) \approx e^{-6.6297(2-D)^{0.99} - 11.1654(1-\tau)^{0.99}}, \quad (4.5)$$

де τ – інтенсивність трафіку, D – фрактальна розмірність трафіку.

Тож, метод прогнозування ймовірності втрати IP-пакетів складається з таких етапів: *Етап 1* – збір статистичних даних; *Етап 2* – визначення інтенсивності та фрактальної розмірності трафіку; *Етап 3* – прогнозування ймовірності втрати IP-пакетів за запропонованою формулою (4.5).

4.4. Розробка методу адаптивної маршрутизації фракталоподібного трафіку з прогнозуванням та врахуванням ймовірності втрати пакетів на маршрутизаторах при виборі оптимальних маршрутів

Було розроблено адаптивний метод маршрутизації трафіку на основі алгоритму OSPF, шляхом додавання додаткової метрики до визначення найкоротших маршрутів, що визначається за запропонованою формулою (4.5).

Етапи роботи запропонованого методу маршрутизації фракталоподібного трафіку з прогнозуванням завантаженості маршрутизаторів для зменшення ймовірності втрати мережових пакетів:

Етап 1. Запускається протокол маршрутизації OSPF. Спочатку він працює у звичайному режимі, але на кожному маршрутизаторі відбувається накопичення статистики трафіку за певний проміжок часу T_n .

Етап 2. На підставі одержаної статистики трафіку за час T_n обчислюється фрактальна розмірність трафіку, а на основі неї здійснюється прогноз ймовірності втрати пакетів $p(d, \tau)$ у майбутньому на кожному маршрутизаторі. Маршрутизатори обмінюються своєю ймовірністю втрати пакетів $p(d, \tau)$ з іншими через повідомлення HELLO.

Етап 3. Прогнозована ймовірність втрати пакетів робиться додатковою метрикою в алгоритмі маршрутизації SPF протоколу OSPF (алгоритм SPF використовує для пошуку найкоротшого шляху передачі пакету алгоритм Дейкстри). До стандартної метрики довжини шляху додаємо прогнозовану кількість втрачених пакетів: $k_1 \cdot m_1 + k_2 \cdot m_2$, де m_1 – стандартна метрика, m_2 – прогнозована ймовірність втрати пакетів, k_1 та k_2 – вагові коефіцієнти, що у цій роботі були прийняті рівними 1, інші їх значення можуть збільшити важливість однієї з метрик. Метрика m_2 – прогнозована ймовірність втрати пакетів, що визначається на основі визначених фрактальної розмірності та інтенсивності трафіку за формулою (4.5).

На розробленій моделі було проведено серію експериментів для визначення того, як різна фрактальна розмірність трафіку при високих значеннях його інтенсивності впливає на кількість втрачених пакетів, а отже – і на якість обслуговування. Було згенеровано 3 комп'ютерні мережі, зображені на рис. 4.7(а-с). В кожній із мереж по 30 маршрутизаторів. Довжина черги в кожному маршрутизаторі 128 пакетів. Інтенсивність трафіку становила 0.8. Значення фрактальної розмірності бралися наступні: 1.25, 1.50, 1.75. Використовувався перший режим роботи моделі – на кожній ітерації генерується випадкова кількість пакетів трафіку з випадковими

пристроями відправниками та одержувачами та здійснюється їх маршрутизація. Підраховувалася кількість втрачених пакетів трафіку по проходженню 1000 ітерацій часу моделі. Результати експериментів наведені у таблиці 4.2, там вказані середні значення на основі експериментів із мережами, вказаними на рис. 4.7(а-с).

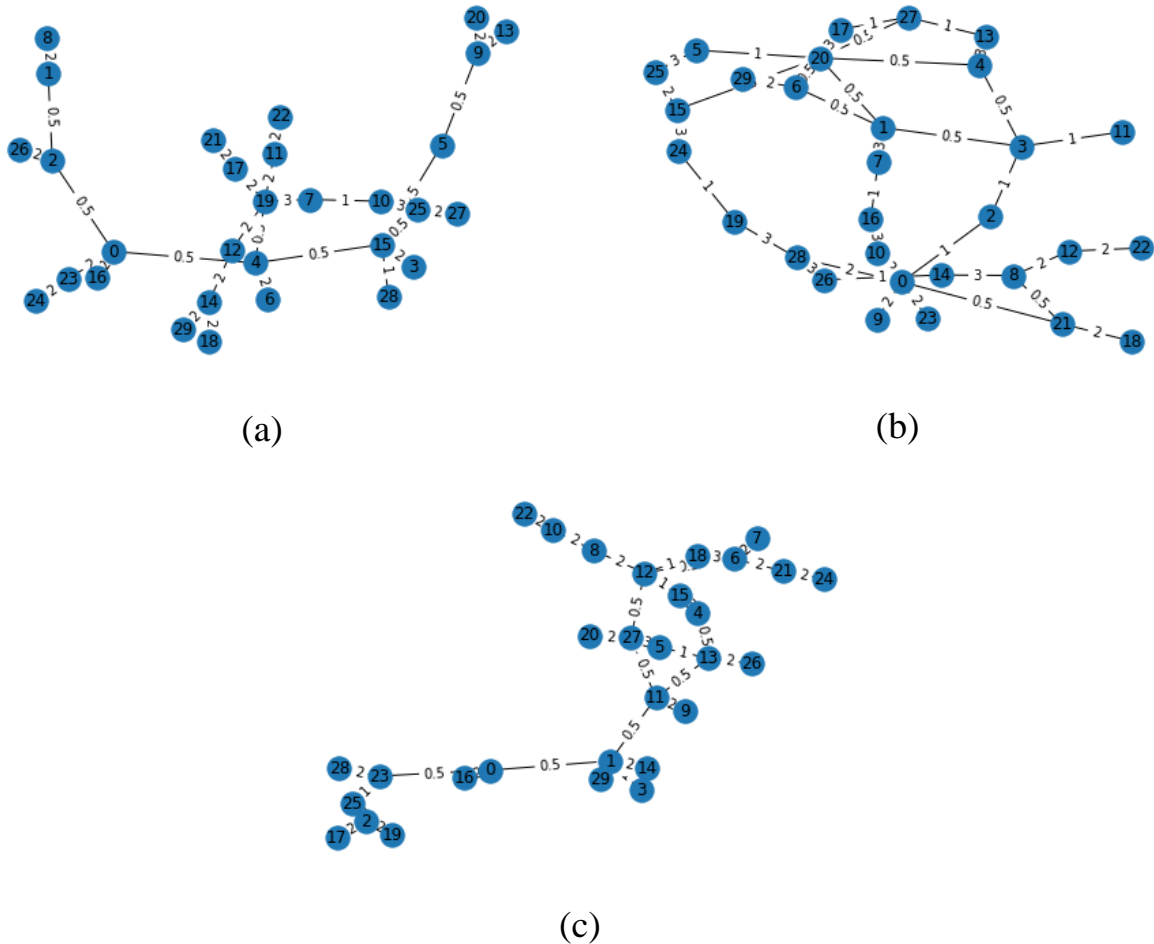


Рис. 4.7. Згенеровані для експерименту структури комп'ютерних мереж

Результати експериментів наведені у таблиці 4.2. В експерименті моделювалися комп'ютерні мережі з 30 маршрутизаторами, здійснювалося пересилання пакетів між маршрутизаторами протягом 1000 одиниць часу моделі. В таблиці було використано такі скорочення:

– VM1 – відомий метод маршрутизації OSPF, без прогнозування завантаженості маршрутизаторів.

– ВМ2 – відомий метод маршрутизації OSPF, з використанням прогнозування завантаженості маршрутизаторів трафіку на основі методу ковзного середнього.

– ЗМ – запропонований удосконалений метод маршрутизації, з використанням прогнозування ймовірності втрати мережевих пакетів через завантаженість маршрутизаторів на основі фрактального аналізу трафіку.

– П1 – оцінка покращення, якщо застосовувати запропонований метод у порівнянні з відомим методом ВМ1.

– П2 – оцінка покращення, якщо застосовувати запропонований метод у порівнянні з відомим методом ВМ2.

Таблиця 4.2. Результати серії експериментів для визначення якості розробленого методу маршрутизації фракталоподібного трафіку та в порівнянні його з існуючими методами при інтенсивності трафіку 0,8

№	Фрак- тальна розмір- ність, d	Максимальна кількість пакетів, що надсилалася на маршрутизатор з його підмережі в одиницю часу	Середні значення втрачених пакетів на одному маршрутизаторі мережі у серії експериментів, %				
			ВМ1	ВМ2	ЗМ	П1	П2
1	1,75	55	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
2	1,75	60	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
3	1,75	65	66,50100	66,50100	65,33100	1,76%	1,76%
4	1,75	70	66,55133	66,51100	65,41733	1,70%	1,64%
5	1,75	75	66,56100	66,52800	65,49633	1,60%	1,55%
6	1,75	80	66,56533	66,55000	65,57067	1,49%	1,47%
7	1,75	85	66,57800	66,56167	65,64267	1,40%	1,38%
8	1,75	90	66,57867	66,56133	65,69200	1,33%	1,31%
			Середні значення:			1,55%	1,52%
9	1,50	55	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
10	1,50	60	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
11	1,50	65	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
12	1,50	70	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
13	1,50	75	89,19267	87,13133	33,78667	62,12%	61,22%
14	1,50	80	99,52600	99,44533	94,94133	4,61%	4,53%
15	1,50	85	99,81133	99,78200	98,20633	1,61%	1,58%
16	1,50	90	99,84533	99,82200	98,60000	1,25%	1,22%
			Середні значення:			17,40%	17,14%
17	1,25	55	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
18	1,25	60	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
19	1,25	65	00,00000	00,00000	00,00000	–	–
20	1,25	70	40,09400	36,29100	03,67200	90,84%	89,88%
21	1,25	75	97,75567	97,31167	77,17200	21,06%	20,70%
22	1,25	80	99,56233	99,49433	95,70900	3,87%	3,80%
23	1,25	85	99,78700	99,75400	97,95233	1,84%	1,81%
24	1,25	90	99,83700	99,81233	98,49200	1,35%	1,32%
			Середні значення:			23,79%	23,50%

Фрактальна розмірність змінюється в діапазоні (1, 2), а її значення можна інтерпретувати наступним чином:

– значення більші за 1.5 – процес антиперсистентний – будь-яка тенденція прагне змінитись протилежною, чим більша фрактальна розмірність, тим сильніше проявлена антиперсистентність, чим ближче до 1,5 – тим більш випадковий процес.

– значення 1.5 – процес повністю випадковий.

– значення менші за 1.5 – процес персистентний, тобто зберігає свій тренд; чим менша фрактальна розмірність, тим сильніше зберігається тренд, чим ближче до 1,5 – тим більш випадковий процес.

Аналізуючи результати експерименту, можна зробити наступні висновки:

– при великих завантаженнях мережі найменше втрачених пакетів, коли трафік антиперсистентний, найбільше – коли трафік випадковий або персистентний.

– при великих завантаженнях мережі запропонований метод маршрутизації значно зменшує втрату пакетів, причому значне покращення відбувається при випадковому та персистентному трафіках, а при антиперсистентному трафіку покращення також є, але незначне.

Аналізуючи таблицю 4.2, можна зробити наступні висновки. Розроблений метод маршрутизації у проведеному експерименті з заданими параметрами мережі дає змогу зменшити втрату мережевих пакетів у порівнянні зі звичайним методом маршрутизації OSPF без прогнозування завантаженості маршрутизаторів:

– при антиперсистентному трафіку – в середньому на 1,55%;

– при випадковому трафіку – в середньому на 17,40%;

– при персистентному трафіку – в середньому на 23,79%.

І в порівнянні з методом, що також використовував прогнозування завантаженості, але методом ковзного середнього, запропонований метод також показує кращі результати, а саме: втрачених пакетів менше:

- при антиперсистентному трафіку – в середньому на 1,52%;
- при випадковому трафіку – в середньому на 17,14%;
- при персистентному трафіку – в середньому на 23,50%.

Погані результати відомого методу прогнозування завантаженості на основі ковзного середнього можуть бути пов'язані з тим, що він не враховує фрактальні властивості трафіку та його фрактальну розмірність.

Таким чином, при виконанні маршрутизації трафіку та пошуку оптимальних шляхів для відправки IP-пакетів є корисним визначати та враховувати фрактальну розмірність трафіку на вході кожного маршрутизатора та використовувати її для прогнозування ймовірності втрати пакетів та при розрахунку метрик для визначення найкращих маршрутів. Тож запропонований метод маршрутизації значно покращує якість обслуговування у комп'ютерній мережі за рахунок зменшення ймовірності втрати мережевих пакетів.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було розроблено метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, який відрізняється від відомих використанням запропонованого методу генерації мережевого фрактального трафіку та параметризацією характеристик моделі, зокрема таких як кількість маршрутизаторів, густина зв'язків між ними, довжина їх черг, пропускна здатність, інтенсивність та фрактальна розмірність трафіку, максимальна кількість вихідних пакетів з одного пристрою в одиницю часу, що дозволило моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації.

Досліджено, яким чином фрактальна розмірність трафіку впливає на ймовірність переповнення черг у маршрутизаторах та втрати мережевих пакетів.

Запроновано новий метод прогнозування ймовірності втрати мережевого пакета маршрутизатором на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку.

Також було розроблено метод адаптивної маршрутизації трафіку, який відрізняється від відомих використанням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів, представленої прогнозованою ймовірністю втрати мережевих пакетів маршрутизатором, яка визначається запропонованим новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку. Це дало змогу підвищити якість обслуговування у комп'ютерній мережі під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених IP-пакетів.

Запропонований удосконалений метод адаптивної маршрутизації дозволяє зменшувати кількість втрачених мережевих пакетів під час високої інтенсивності трафіку, зокрема при інтенсивності 0,8 в середньому на 23% при персистентному трафіку, на 17% – при випадковому трафіку та на 1,5% – при антиперсистентному трафіку; конкретні значення покращень залежать від параметрів мережі. При надвеликих навантаженнях на комп'ютерну мережу ефект покращення зникає, тому що коли усі маршрутизатори перевантажені, вичерпується ресурс для адаптивної маршрутизації, адже немає куди перенаправляти IP-пакети, усі черги зайняті.

Також, аналізуючи результати експериментів, можна зробити наступні висновки: при великих завантаженнях мережі найменше втрачених пакетів, коли трафік антиперсистентний, а найбільше – коли трафік випадковий або персистентний. Тож при здійсненні маршрутизації трафіку та пошуку оптимальних шляхів для відправки IP-пакетів може бути корисним визначати та враховувати фрактальну розмірність трафіку на вході кожного маршрутизатора та використовувати її при виборі й розрахунку метрик для визначення найкращих маршрутів.

Таким чином, запропонований метод адаптивної маршрутизації фракталоподібного трафіку з використанням метрики прогнозованої

ймовірності втрати IP-пакетів дає змогу зменшити кількість втрачених мережових пакетів, що підвищує якість обслуговування у комп'ютерній мережі.

Список літератури до розділу 4

1. Barabási A.-L. *Network Science*. Cambridge University Press, 2018. 475 p. URL: <http://networksciencebook.com/>.
2. Пасічник В. В., Іванущак Н. М. Дослідження та моделювання складних мереж. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. Вип. 2, № 3 (44). С. 43–48.
3. Traag V. A. Algorithms and dynamical models for communities and reputation in social networks. *Springer International Publishing*. 2014. P. 229. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06391-1>.
4. Watts D. J., Strogatz S. H. Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature*. 1998. Vol. 393, no. 6684. P. 440–442. URL: <https://www.nature.com/articles/30918>.
5. Robert S., Le Boudec J. Y. New models for pseudo self-similar traffic. *Performance Evaluation*. 1997. Vol. 30, no. 1–2. P. 57–68.
6. An empirical comparison of generators for self similar simulated traffic / G. Horn, A. Kvalbein, J. Blomskøld, E. Nilsen. *Performance Evaluation*. 2007. Vol. 64, no. 2. P. 162–190.
7. Sobh T., Elleithy K., Mahmood A. *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking*. Springer, 2010. P. 41–46.
8. A fractal analysis of a Markov chain based self-similar traffic generator / Н. М. Дриеєва, О. А. Smirnov, О. М. Дриеєв, Т. В. Smirnova. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Engineering sciences*. 2019. Vol. 2, no 33. P. 161–172.
9. A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method /

H. Drieieva, O. Drieiev, Ye. Meleshko et al. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*: CEUR-WS, Gliwice, Poland / Vasyl Lytvyn (Ed.). 2022. Vol. 3154, P. 1694–1707 (ISSN 1613-0073). DOI: 10.5281/zenodo.7892006. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>.

10. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Міхав В. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Кропивницький, 10–11 листоп. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральнoукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2022. С. 44–45.

11. Barabási A.-L., Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*. 1999. Vol. 286, no. 5439 P. 509–512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509.

12. Millána G., Lefranc G. A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks. *Information Technology and Quantitative Management (ITQM2013) Procedia Computer Science*. 2013. Vol. 17. P. 420–425.

13. Areström E., Carlsson N. Early online classification of encrypted traffic streams using multi-fractal features. *IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. 2019. P. 84–89. DOI: 10.1109/INFCOMW.2019.8845127.

14. Ribeiro V. J., Zhang Z.-L Christophe Diot Small-time scaling behavior of Internet backbone traffic. *Computer Networks*. 2005. Vol. 48, no. 3. P. 315–334. DOI: 10.1016/j.comnet.2004.11.012.

15. Characterisation of wireless network traffic: Fractality and stationarity / S. Mukherjee, R. Ray, M. H. Khondekar et al. *Third Int. Conf. on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*. Kolkata, India, 2017. P. 79–83. DOI: 10.1109/ICRCICN.2017.8234485.

16. Vassiliou P.-C. G., Georgiou A. C. Markov and semi-Markov chains, processes, systems and emerging related fields. *Mathematics*. 2021. Vol. 9, no. 19. 294 p. DOI: 10.3390/math9192490.
17. Farahani A., Shoja A., Tohidi H. Markov and semi-Markov models in system reliability. *Engineering Reliability and Risk Assessment*. Elsevier, 2023. P. 91–130. DOI: 10.1016/B978-0-323-91943-2.00010-1.
18. Analysis of the queueing-inventory system with impatient customers and mixed sales / Y. Zhang, D. Yue, L. Sun, J. Zuo. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. Vol. 2022. DOI: 10.1155/2022/2333965.
19. Developing a model of the dynamics of states of a recommendation system under conditions of profile injection attacks / Ye. Meleshko, O. Drieiev, M. Yakymenko, D. Lysytsia. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, no. 2 (106). P. 14–24. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096707995&origin=resultslist>.
20. Dimitrakos T. D., Kyriakidis E. G. A semi-Markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous repair times. *International Journal of Production Economics*. 2008. Vol. 111, no. 2. P. 752–762. DOI: 10.1016/j.ijpe.2007.03.010.
21. Li Q.-L., Lui J. C. S. Block-structured supermarket models. *Discrete Event Dynamic Systems*. 2014. Vol. 26, no. 2. P. 147–182. DOI: 10.1007/s10626-014-0199-1.
22. Ma C., Dai G., Zhou J. Short-term traffic flow prediction for urban road sections based on time series analysis and LSTM_BILSTM method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 23, no. 6. P. 5615–5624. DOI: 10.1109/TITS.2021.3055258. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9364926>.
23. Dymora P., Mazurek M. Influence of model and traffic pattern on determining the self-similarity in IP networks. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 1. 190 p. DOI: 10.3390/app11010190. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/190>.

24. Phinyomark A., Larracy R., Scheme E. Fractal analysis of human gait variability via stride interval time series. *Front Physiol.* 2020. Vol. 11. DOI: 10.3389/fphys.2020.00333. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32351405/>.
25. Millán G. Traffic flows analysis in high-speed computer networks using time series. *arXiv preprint arXiv:2103.03984.* 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.03984. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.03984>.
26. Feldmann A., Gilbert A. C., Willinger W. Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic. *Proc. of the ACM SIGCOMM '98 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM '98).* Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1998. P. 42–55. DOI: 10.1145/285237.285256.
27. Bassingthwaite J. B., Raymond G. M. Evaluating rescaled range analysis for time series. *Annals of Biomedical Engineering.* 1994. Vol. 22. P. 432–444. DOI: 10.1007/BF02368250. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02368250#citeas>.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача, що полягає у підвищенні якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та при пікових навантаженнях на маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережевих пакетів.

Проведено дослідження та порівняльний аналіз моделей та методів роботи комп'ютерних мереж, а також методів аналізу, моделювання, прогнозування та маршрутизації мережевого трафіку.

Показано, що прогнозування завантаженості мережевих пристроїв з метою перенаправлення трафіку на менш завантажені за прогнозами пристрої є перспективним способом вирішення поставленої задачі. Також показано, що є важливою розробка імітаційних моделей комп'ютерних мереж для тестування методів маршрутизації трафіку, оскільки не завжди є можливим та доцільним усі експерименти проводити на реальних комп'ютерних мережах. Проведене дослідження показало, що найбільш перспективними та доцільними методами моделювання мережевого трафіку є ті, що враховують його фрактальні властивості.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи:

1. Удосконалено математичну модель мережевого фракталоподібного трафіку, яка відрізняється від відомих представлень трафіку на рівні "пакет є" – "пакету немає" на вході маршрутизатора та запропонованими ланцюгами Маркова, які описують ймовірності станів генератора трафіку як стохастичного скінченного автомата, що дало змогу одержати рівняння для імітаційного моделювання фрактального та мультифрактального трафіків. На основі запропонованої математичної моделі розроблено метод генерації мережевого фрактального трафіку, який відрізняється від відомих можливістю налаштовувати фрактальну розмірність та інтенсивність трафіку перед його генерацією, а отже – моделювати різні типи трафіку.

2. Вперше розроблено метод аналізу мережевого фракталоподібного трафіку, який відрізняється від відомих використанням нової міри визначення фрактальної розмірності бінарного трафіку, що дозволило зв'язати аналітично його статистичні та фрактальні властивості, підвищити точність визначення фрактальної розмірності та зменшити кількість арифметичних операцій при фрактальному аналізі. Запропонований метод має більшу точність та однозначність результатів незалежно від довжини досліджуваного ряду, зокрема, має менший відсоток відхилення від середнього значення показника Херста, на відміну від R/S-аналізу, а саме 1,8% проти 2,5%.

3. Набув подальшого розвитку метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, який відрізняється від відомих використанням запропонованого методу генерації мережевого фрактального трафіку та параметризацією характеристик моделі, зокрема таких: кількість маршрутизаторів, густина зв'язків між ними, довжина їх черг, пропускна здатність, інтенсивність та фрактальна розмірність трафіку, максимальна кількість вихідних пакетів із одного пристрою в одиницю часу, що дало змогу моделювати комп'ютерні мережі різної архітектури для тестування якості роботи алгоритмів маршрутизації. Розроблено відповідні алгоритми для моделювання структури комп'ютерної мережі та генерації фрактального мережевого трафіку, на яких проводилося тестування відомих та запропонованих алгоритмів маршрутизації.

4. Удосконалено метод адаптивної маршрутизації трафіку, який відрізняється від відомих використанням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів, представленої прогнозованою ймовірністю втрати мережевих пакетів маршрутизатором, яка визначається запропонованим новим методом на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку, що дозволило підвищити якість обслуговування у комп'ютерній мережі під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених IP-пакетів. Зокрема,

запропонований метод зменшує втрати IP-пакетів при інтенсивності трафіку 0,8 в середньому на 23% при персистентному трафіку, на 17% при випадковому трафіку та на 1,5% при антиперсистентному трафіку.

Проведена оцінка якості та ефективності запропонованих методів і моделей шляхом проведення експериментів на програмній імітаційній моделі.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено відповідними актами впровадження. Результати дисертаційних досліджень впроваджені і використовуються у діяльності Інтернет сервіс провайдера ТОВ «Імперіал-Нет», а також використано у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету.

Таким чином, сукупність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів і одержана в ході проведення експериментальних досліджень оцінка їх ефективності дозволяють вважати сформульовану науково-практичну задачу підвищення якості обслуговування у комп'ютерних мережах під час високої інтенсивності мережевого трафіку та пікових навантажень на маршрутизатори шляхом зменшення кількості втрачених мережевих пакетів – вирішеною, а поставлену мету зі зменшення ймовірності втрати IP-пакетів при високій інтенсивності трафіку за рахунок розробки і застосування моделей та методів фрактального аналізу і адаптивної маршрутизації трафіку – досягнутою.

ДОДАТКИ

Додаток А. Акти впровадження дисертаційних досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи
Центральноукраїнського національного
технічного університету

О.М. Левченко



02 _____ 2023р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Дреєвої Ганни Миколаївни
"МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА МАРШРУТИЗАЦІЇ
ФРАКТАЛОПОДІБНОГО ТРАФІКУ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ"
на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Комісія у складі: голови – завідуючого кафедрою кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету доктора технічних наук, професора Смірнова О.А. та членів комісії – доцента кібербезпеки та програмного забезпечення, кандидата технічних наук, доцента Минайленка Р.М., доцента кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, кандидата технічних наук, доцента Боська В.В., склала цей акт про те, що при розробці лекційних, практичних та лабораторних занять з навчальної дисципліни «Проектування комп'ютерних систем та мереж» та «Проектування та моделювання складних систем» у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету були використані наступні результати наукових досліджень Дреєвої Ганни Миколаївни:

1. Вперше розроблено метод аналізу мережевого фрактального трафіку та визначення його фрактальної розмірності, який відрізняється від відомих тим, що запропоновано нову міру визначення фрактальної розмірності бінарного трафіку, це дозволило зв'язати аналітично статистичні та фрактальні властивості трафіку, підвищити точність визначення фрактальної розмірності та зменшити кількість арифметичних операцій при аналізі трафіку.

Застосування результатів дисертаційних досліджень Дреєвої Ганни Миколаївни дозволило підвищити рівень засвоєння навчального матеріалу з

дисциплін «Проектування комп'ютерних систем та мереж» та «Проектування та моделювання складних систем» за рахунок більш поглибленого вивчення сучасних та перспективних методів аналізу трафіку.

Голова комісії

завідувач кафедри кібербезпеки
та програмного забезпечення
Центральноукраїнського національного
технічного університету
доктор технічних наук, професор



О.А. Смірнов

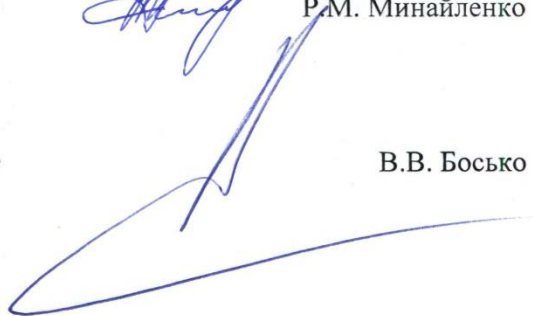
Члени комісії:

доцент кафедри кібербезпеки
та програмного забезпечення
кандидат технічних наук, доцент



Р.М. Минайленко

доцент кафедри кібербезпеки
та програмного забезпечення
кандидат технічних наук, доцент



В.В. Босько

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТОВ «Імперіал-Нет»

Бур'янов К.В.



(Підпис)

«22» лютого 2023 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
аспірантки кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського
національного технічного університету

Дресвої Ганни Миколаївни

на тему "МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА МАРШРУТИЗАЦІЇ
ФРАКТАЛОПОДІБНОГО ТРАФІКУ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ"

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Комісія у складі голови – директора ТОВ «Імперіал-Нет» Бур'янов К.В. та членів комісії – провідного розробника ТОВ «Імперіал-Нет» Король К.В. і провідного розробника ТОВ «Імперіал-Нет» Дуб О.М., склала цей акт про те, що у діяльності ТОВ «Імперіал-Нет» реалізовано результати наукових досліджень Дресвої Ганни Миколаївни. А саме, впроваджено розроблений здобувачкою метод маршрутизації трафіку, який відрізняється від відомих використанням додаткової метрики для визначення найкоротших шляхів передачі мережевих пакетів – прогнозованої ймовірності втрати мережевого пакету маршрутизатором, що визначається на основі вимірюваних значень фрактальної розмірності та інтенсивності вхідного трафіку. Отриманий корисний ефект від впровадження удосконаленого методу маршрутизації полягає у підвищенні якості обслуговування у комп'ютерній мережі під час пікових навантажень за рахунок зменшення кількості втрачених ІР-пакетів.

Директор ТОВ «Імперіал-Нет»



Костянтин БУР'ЯНОВ



ТОВ «ІМПЕРІАЛ-НЕТ»
вул. Олексія Сторожа 8
м. Кропивницький,
Україна, 29006



ПАТ КБ «ПриватБанк»
PIF : ua21305299000026008005103112
єДРПОУ : 39758019



тел : +38 (0522) 27-60-06
бухгалтерія : +38 (0522) 21-60-91
office@imperial.net.ua
isp@imperial.net.ua
http://www.imperial.net.ua

**Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації
та відомості про апробацію результатів дисертації**

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Drieieva H., Drieiev O., Meleshko Ye., Yakymenko M., Mikhav V. A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*: CEUR-WS, Gliwice, Poland / Vasyl Lytvyn (Ed.). 2022. Vol. 3154. P. 1694–1707. (ISSN **1613-0073**). DOI: 10.5281/zenodo.7892006. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>. (SCOPUS)
2. Drieieva H., Smirnov O., Drieiev O., Polishchuk Y., Brzhanov R., Aleksander M. Method of fractal traffic generation by a model of generator on the graph. *Control, Optimisation and Analytical Processing of Social Networks*: CEUR-WS, Lviv, Ukraine / Solomiia Fedushko, Thierry Oscar Edoh (Eds). 2020. Vol. 2616. P. 3–379. (ISSN **1613-0073**). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2616/paper31.pdf>. (SCOPUS)
3. Drieieva H., Smirnov O., Drieiev O., Simakhin V., Bondar S., Odarchenko R. Managing multifractal properties of the binary sequence generated with the Markov chains. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*: CEUR-WS, Zaporizhzhia, Ukraine / Sergey Subbotin (Ed.). 2020. Vol. 2608. P. 633–645. (ISSN **1613-0073**). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper49.pdf>. (SCOPUS)
4. Simakhin V., Bondar S., Drieieva H., Kovalenko O., Drieiev O., Zhumadilova M. Multifractal properties of traffic generator based on Markov chains. *Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*: CEUR-WS, Lviv, Ukraine / Solomiia Fedushko (Ed.). 2019. Vol. 2588. P. 567–579. (ISSN **1613-0073**). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2588/paper48.pdf>. (SCOPUS)

5. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Мелешко Є. В., Миронець І. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. Вип. 4. С. 58–66. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2022.269137. URL: <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/269137>. **(фахове видання категорії Б)**

6. Дреєва Г. М. Метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, 2022. Т. 4, № 70. С. 75–78. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.075. URL: <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2757>. **(фахове видання категорії Б)**

7. Drieieva H., Meleshko Ye., Drieiev O., Mikhav V. Computer simulation model of a computer network with fractal traffic for testing routing algorithms. *Advanced Information Systems*. 2022. No. 6 (4). P. 11–18. DOI: 10.20998/2522-9052.2022.4.02. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/268306>. **(фахове видання категорії Б)**

8. Meleshko Ye., Drieiev O., Drieieva H. Method of identification bot profiles based on neural networks in recommendation systems. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 24–28. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/2522-9052.2020.2.05>. **(фахове видання категорії Б)**

9. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Метод генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 1 (32). С. 173–183. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).173-183. URL: http://mariea.kntu.kr.ua/archive/32/32_Hanna.html. **(фахове видання)**

10. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М., Смірнова Т. В. Фрактальний аналіз генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 2

(33). С. 161–172. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.2(33).161-172. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/33/33_Drieieva.html. **(фахове видання)**

11. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Денисенко О. О. Визначення фрактальної розмірності числової послідовності за розподілом ймовірності значень її елементів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2018. Вип. 31. С. 119–128. DOI: 10.32515/2409-9392.2018.31.119-128. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/eng/archive/31/31_Dreyeva.html. **(фахове видання)**

12. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Метод генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2019. С. 123–139.

13. Дреєва Г. М., Смірнов С. А. Дослідження мультифрактальних властивостей генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова. *Кібербезпека та інформаційні технології*: монографія. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 93–105.

Відомості про апробацію результатів дисертації

1. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Миронець І. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією фракталоподібного трафіку. *Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій (ПШРІТ-2022)*: зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., (Черкаси, 9 груд. 2022 р.) / упоряд.: Т. О. Прокопенко, Я. В. Тарасенко. М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ, 2022. С. 53–54.

2. Дреєва Г. М., Мелешко Є. В., Міхав В. В. Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., (Кропивницький, 10–11 листоп. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2022. С. 44–45.

3. Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Мелешко Є. В., Якименко М. С., Міхав В. В. Дослідження якості роботи методу визначення фрактальної розмірності мережевого трафіку за його ймовірнісними властивостями. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: тези доп. 12-ї Міжнар. наук.-техн. конф., (Баку–Харків–Жиліна, 27–28 квіт. 2022 р.) / уклад. В. В. Косенко. Харків: ФОП Петров В.В., 2022. Т. 1. С. 126.

4. Дреєва Г. М., Смірнов С. А., Коноплицька-Слободенюк О. К. Дослідження генератора самоподібного трафіку на основі ланцюга Маркова та його мультифрактальних властивостей. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.) / М-во освіти і науки України,

Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 35.

5. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М., Гермак В. С., Резніченко В. А., Шевченко О. О. Методи визначення ботів серед користувачів соціальних мереж. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 2–3 квіт. 2020 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т, Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 44.

6. Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Розробка методу імітаційного моделювання мережевого трафіку з фрактальними властивостями. *Цифрова трансформація суспільства*: зб. тез доп. I Міжнар. наук.-практ. конф., (Кропивницький, 21–22 квіт. 2022 р.) / М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 100.

7. Мелешко Є., Дреєв О., Якименко М., Дреєва Г. Дослідження вразливостей рекомендаційних систем соціальних мереж. *Інформація, комунікація, суспільство ICS-2021*: матеріали X Міжнар. наук. конф., (Львів, 20–22 трав. 2021 р.) / уклад. О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2021. С. 41–42.

8. Мелешко Є. В., Дреєв О. М., Дреєва Г. М. Розробка методу ідентифікації ботів у рекомендаційних системах. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., (Чернігів, 29–30 квіт. 2020 р.): у 2 т. / уклад. А. М. Єрошенко, Чернігів: ЧНТУ, 2020. Т. 2. С. 165–166.

9. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М., Дреєв О. М. Метод кластеризації користувачів соціальної мережі на основі нейронних мереж. *Комбінаторні конфігурації та їх застосування*: зб. тез XXII Міжнар. наук.-практ. семінару імені А. Я. Петренюка, (Запоріжжя–Кропивницький, 15–16 трав. 2020 р.) / за ред. Г. П. Донця. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2020. С. 87–90.

10. Мелешко Є., Дреєва Г., Якименко М., Хох В. Методи моделювання складних мереж. *Інформація. Комунікація. Суспільство*:

матеріали ІХ Міжнар. наук. конф., (Львів, 21–23 трав. 2020 р.) / уклад. А. М. Пелешин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2020. С. 29–30.

11. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дезінформаційні атаки на рекомендаційні системи. *Безпека в сучасному світі: зб. тез Міжнар. наук. конф.*, (Дніпро, 27–28 верес. 2019 р.) / ред. О. Ю. Висоцький. Дніпро: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2019. С. 51–53.

12. Дреєва Г. М., Смірнов О. А., Дреєв О. М. Реалізація генератора фрактального трафіку в системах імітаційного моделювання. *Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2019: матеріали ХХVII Міжнар. наук.-практ. конф.: у 4 ч.*, (Харків, 15–17 трав. 2019 р.) / ред. Є. І. Сокол. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Ч. 4. С. 146.

13. Дреєва Г. М., Смірнов О. А. Генерування фрактального трафіку за допомогою моделі генератора на графі. *Інформаційна безпека та інформаційні технології: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.*, (Харків, 24–25 квіт. 2019 р.) / ред. С. П. Євсєєв. Харків: ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2019. С. 27.

14. Drieieva H., Smyrnov O., Drieiev O. Method of generating fractal traffic for conducting numerical experiments on simulating load in a computer network. *Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives (MIMCS 2019): Materials of the 1st Int. Sci.-Pract. Conf.*, (Baku, Azerbaijan, 01–02 July 2019) / Azerbaijan State Oil and Industry University (ASOIU). Baku: ASOIU, 2019. P. 32–33.

15. Мелешко Є. В., Дреєва Г. М. Дослідження проблем сучасних рекомендаційних систем. *Інформація, комунікація, суспільство 2018: зб. тез 7-ї Міжнар. наук. конф. ІКС-2018*, (Чинадієво, Україна, 17–19 трав. 2018 р.) / уклад. А. М. Пелешин, О. В. Марковець. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. С. 31–32.