

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БУЛАХ ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 004.9; 519.2

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ВПОРЯДКОВАНИХ**  
**МАСИВІВ ДАНИХ ІЗ ФРАКТАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**  
**МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

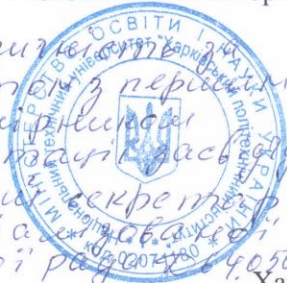
Галузь знань 12 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

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

*Згідно з першою  
примірною  
дисертацією засвідчує.  
Вчений секретар  
спеціалізованої  
вченої ради*



\_\_\_\_\_ В.А. Булах

Науковий керівник

Кіріченко Людмила Олегівна

доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

*Юрій ДОРОФЕЕВ*

10.02.2021.

## АНОТАЦІЯ

*Булах В.А.* Інформаційна технологія класифікації впорядкованих масивів даних із фрактальними властивостями методами машинного навчання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – «Інформаційні технології». – Міністерство освіти і науки України національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню задачі класифікації фрактальних упорядкованих масивів даних (УМД) в різноманітних сферах людської діяльності, наприклад в медицині при діагностиці захворювань по енцефалограмам, кардіограмам; при виявленні кризових ситуацій по біржовим індексам; виявлення вторгнень в комп'ютерну мережу та інше.

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності класифікації упорядкованих масивів даних із фрактальними властивостями шляхом створення інформаційної технології класифікації методами машинного навчання.

*Об'єкт дослідження* – процес класифікації об'єктів методами машинного навчання.

*Предмет дослідження* – методи та моделі класифікації фрактальних упорядкованих масивів даних.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач у роботі використовувався математичний апарат методів машинного навчання; методи математичної статистики – для статистичного аналізу упорядкованих масивів даних, аналізу точності класифікації методами машинного навчання; методи теорії хаоса та фрактального аналізу – для обчислення фрактальних та рекурентних характеристик.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше встановлено наступне:

– розроблено інформаційну технологію класифікації фрактальних упорядкованих масивів даних, яка заснована на поєднанні методів дерев рішень та нейронних мереж, враховує самоподібні та мультифрактальні властивості упорядкованих даних, що дозволяє збільшити точність класифікації;

– запропоновано метод оцінювання показника Херста за значеннями часового ряду, який засновано на застосуванні класифікаційних методів машинного навчання, що дозволяє суттєво зменшити довірчий інтервал оцінки;

– застосовані рекурентні характеристики часових рядів, як ознаки для класифікації часових рядів на основі їхніх фрактальних властивостей методами машинного навчання, дозволили збільшити точність класифікації.

Подальший розвиток отримали:

– метод генерації фрактальних реалізацій на основі стохастичного мультиплікативного біноміального каскаду, який на відміну від існуючих використовує аналітичне визначення параметрів несиметричного бета-розподілу, що дозволяє генерувати упорядковані масиви даних із заданими мультифрактальними властивостями;

– методи бінарної класифікації часових рядів з фрактальними властивостями, що засновані на використанні дерев прийняття рішень та нейронних мереж, які на відміну від існуючих використовують як ознаки фрактальні та рекурентні характеристики, що дозволяє збільшити точність класифікації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що в результаті виконаного дисертаційного дослідження створено комплекс методів, алгоритмів і програм, які дозволяють вирішити завдання класифікації фрактальних упорядкованих масивів даних. Усі теоретичні розробки дисертації доведені автором до конкретних методів і покладені в основу функціонування інформаційної технології класифікації впорядкованих масивів даних із фрактальними властивостями методами машинного навчання.

Запропонований метод оцінювання показника Херста, який програмно реалізований, дозволяє покращити точність його оцінювання за упорядкованими даними, а саме: зменшує довірчий інтервал оцінки в декілька разів.

Проведений у роботі аналіз існуючих методів класифікації упорядкованих масивів даних показав: незважаючи на те, що застосування машинного навчання в задачах аналізу фрактальних даних постійно зростає, на сьогоднішній, день не розроблено інформаційної технології, яка призначена для задач класифікації фрактальних масивів даних, зокрема часових рядів.

У роботі виконано огляд існуючих методів генерування фрактальних та мультифрактальних упорядкованих масивів даних. Доведена необхідність удосконалення таких методів, та запропоновано підхід до генерації стохастичного мультиплікативного біноміального каскаду на основі вирішення задачі нелінійної оптимізації. Розв'язання цієї задачі дозволяє використовувати несиметричний бета-розподіл для генерації стохастичного мультиплікативного біноміального каскаду, що дозволило охопити широкий спектр мультифрактальних властивостей. Використання удосконаленого методу генерації стохастичного мультиплікативного біноміального каскаду дає змогу генерувати більш складні у фрактальному сенсі реалізації мультифрактального броунівського руху.

Проведено чисельні експерименти класифікації різних типів упорядкованих масивів даних, які були розбиті на класи за їхніми фрактальними властивостями. Були застосовані наступні методи класифікації: дерева прийняття рішень, bagging, випадковий ліс, багатосаровий перцептрон, мережі довгої короткострокової пам'яті. Дослідження показали, що діапазон мультифрактальних і самоподібних властивостей відіграє важливу роль для вибору класифікатора, і відповідно на точність класифікації. Було доведено що використання статистичних та фрактальних характеристик мультифрактальних упорядкованих масивів даних дозволяє покращити точність класифікації УМД порівняно з використанням значень УМД як ознак при класифікації.

Розглянуто рекурентні діаграми та запропоновано використання їх характеристик в якості ознак при навчанні моделей класифікації. Дослідження показали що характеристики рекурентних діаграм дають суттєвий внесок в точність класифікації, та дозволяють класифікувати УМД з монофрактальними властивостями.

Розроблена інформаційна технологія класифікації УМД, котра дозволяє підібрати оптимальний метод машинного навчання для класифікації досліджуваного упорядкованого масиву даних.

Запропоновано використання розробленої інформаційної технології для визначення показника Херста УМД. Експериментально доведено ефективність використання методів машинного навчання для визначення показника Херста та його довірчого інтервалу, та дозволило скоротити довірчий інтервал показника Херста для фрактальних та мультифрактальних УМД більше ніж у 2 рази.

Приведено результати застосування запропонованої інформаційної технології для виявлення DDoS-атак в комп'ютерній мережі. IT збільшує кількість виявлених атак, що дозволяє використовувати запропоновану IT як додатковий фільтр при виявленні DDoS-атак.

Запропоновані у роботі моделі, методи та інформаційна технологія класифікації фрактальних даних були впроваджені у діяльність підприємств різних галузей економіки:

- для підприємства ПрАт «Фарлеп-Інвест» (м. Харків) впроваджено розроблену інформаційну технологію для зменшення негативного впливу кібер-атак на інформаційні системи підприємства;

- для підприємства КБ «ПриватБанк» (м. Харків) впроваджено розроблену інформаційну технологію для виявлення вторгнень в інформаційні системи підприємства.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені у навчальному процесі Харківському національному університеті радіоелектроніки на кафедрі інфокомунікаційної інженерії при викладанні навчальної дисципліни «Artificial Intelligence (Штучний інтелект)».

**Ключові слова:** класифікація, інформаційна технологія, машинне навчання, рекурентна діаграма, мультифрактальний процес, випадковий ліс, нейронна мережа, мультифрактальний аналіз.

## Список публікацій здобувача

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

1. Булах В.А. Моделирование мультипликативных стохастических каскадов на основе случайной величины с бета распределением. *International journal information content & processing*. Bulgaria, 2017. Vol. 4, No 2. P. 159–170.
2. Кириченко Л.О., Булах В.А., Радивилова Т.А. Классификация мультифрактальных стохастических временных рядов с использованием мета-алгоритмов на основе деревьев решений. *Системні технології*. Дніпро, 2018. № 3(116). С. 22–27.
3. Кириченко Л., Булах В., Радивилова Т., Черняк В. Анализ взаимозависимости временных рядов биткоина и активности сообществ в социальных сетях. *International journal information technologies & knowledge*. Bulgaria, 2018. Vol. 12, No 1. P. 43–55.
4. Kirichenko L., Radivilova T., Bulakh V. Generalized approach to Hurst exponent estimating by time series. *Informatyka automatyka pomiary w gospodarce i ochronie srodowiska*. Poland, 2018. Vol. 8, No 1. P. 28–31.
5. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T. Machine learning in classification time series with fractal properties. *Data*. 2019. Vol. 4, No 5. P. 1–13.
6. Радивилова Т., Кириченко Л., Булах В. Обнаружение DDoS-атак методами машинного обучения на основе фрактальных свойств. *Security in cyberspace, the social internet space in context values and hazards*. Slupsk-Charkow, Poland, 2019. P. 299–315.
7. Kirichenko L., Radivilova T., Bulakh V. Binary classification of fractal time series by machine learning methods. *Lecture notes in computational intelligence and decision making. Intellectual systems of decision making and problems of computational intelligence: proceedings of the XV international scientific conference*. May 21–25, 2019. Springer, Cham, 2020. P. 701–711.

8. Кіріченко Л.О., Булах В.А., Тавалбех М.Ф., Зінченко П.П. Інформаційна технологія класифікації фрактальних часових рядів. *Системні технології*. 2020. № 3 (128). С. 115–126.

9. Булах В.А. Інформаційна технологія класифікації упорядкованих масивів даних з фрактальними властивостями. *Радіоелектроніка та інформатика*. Харків, 2020. № 2 (89). С. 66–72.

10. Кіріченко Л.О., Булах В.А., Радівілова Т.А., Тавалбех М.Ф., Зінченко П.П. Балансування самоподібного трафіку в мережних системах виявлення вторгнень. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. Київ, 2020. №3 (7). С. 17–32. URL: <https://csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/130>.

11. Radivilova T, Bulakh V., Ageiev D., Kirichenko L. The methods to improve quality of service by accounting secure parameters. *Advances in computer science for engineering and education*, Springer. Cham, 2020. Vol. 938, P. 346–355.

*Матеріали та праці наукових конференцій:*

12. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T. Fractal time series analysis of social network activities. *Problems of infocommunications. Science and technology: proceedings of the 4th international scientific-practical conference*. October 10–13, 2017. Kharkiv, Ukraine, 2017. P. 456–459.

13. Кіріченко Л.О., Радівілова Т.А., Булах В.А. Мультифрактальний аналіз часових рядів в соціальних мережах. *Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях: матеріали 6 міжнародної науково-практичної конференції (1 міжнародний симпозиум)*. Чернівці, 2017. С. 19–20.

14. Radivilova T., Kirichenko L., Bulakh V., Ageyev D., Tawalbeh M. Decrypting SSL/TLS traffic for hidden threats detection. *Dependable systems, services and technologies: proceedings of the IEEE 9th international conference*. May 24–27, 2018. Kyiv, Ukraine, 2018. P. 143–146.

15. Bulakh V. Kirichenko L., Radivilova T. Classification of multifractal time series by decision tree methods. *ICT in education, research and industrial applications. Integration, harmonization and knowledge transfer: proceedings of the 14th*

international conference. May 14–17, 2018. Kyiv, Ukraine, 2018. Vol. I (2105). P. 457–460.

16. Bulakh V., Kirichenko L., Radivilova T. Time series classification based on fractal properties. *Data stream mining & processing: proceedings of the IEEE second international conference*. August 21–25, 2018. Lviv, Ukraine, 2018. P. 198–201.

17. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T. Classification of fractal time series using recurrence plots. *Problems of infocommunications. Science and technology: international scientific-practical conference*. October 9–12, 2018. Kharkiv, Ukraine, 2018. P. 719–724.

18. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T., Kobitska Y. Fractal analysis of DDoS attack realizations. *Фізико-технічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали 7-ої міжнародної науково-практичної конференції*. 8-10 листопада 2018 р. Чернівці, 2018. С. 13.

19. Radivilova T., Bulakh V., Kirichenko L. The method to control buffering and bandwidth network by monitoring of fractal traffic and security parameters. *Фізико-технічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали 7-ої міжнародної науково-практичної конференції*. Чернівці, 2018. С.97.

20. Кириченко Л.О., Булах В.А., Радивилова Т.А. Сравнительный анализ классификации мультифрактальных временных рядов. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали міжнародної науково-технічної конференції*. 27 – 29 березня 2018 р. Дніпро, 2018. С.126.

21. Radivilova T., Kirichenko L., Ageyev D., Bulakh V. Classification methods of machine learning to detect DDoS attacks. *Intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications: proceedings of the 10th IEEE international conference*. September 18–21, 2019. Metz, France, 2019. P. 207–210.

22. Radivilova T., Kirichenko L., Bulakh V. Comparative analysis of machine learning classification of time series with fractal properties. *Advanced optoelectronics*



*and lasers: proceedings of the IEEE 8th international conference*. September 06–08, 2019. Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 557–560.

23. Кириченко Л.О., Булах В.А. Классификация временных рядов на основе фрактальных свойств. *Міжнародний науковий симпозіум Інтелектуальні рішення: матеріали V-ої міжнародної науково-практичної конференції*. 15–20 квітня 2019р. Ужгород, 2019. С. 220.

24. Radivilova T., Kirichenko L., Bulakh V. Machine learning classification of multifractional brownian motion realizations. *Computer modeling and intelligent systems: proceedings of the third international workshop*. April 27–May 1, 2020. Zaporizhzhia, Ukraine, 2020. P. 980–989.

## ABSTRACT

Bulakh V.A. Information technology of classification of ordered data sets with fractal properties by machine learning methods. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.06 – information technologies. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to the problem of classification of fractal ordered data sets (ODS) in various spheres of human activity, for example in medicine at diagnosis of diseases on encephalograms, cardiograms; when identifying crisis situations on stock exchange indices; to detect computer network intrusions and more.

The purpose of the thesis is to increase the classification accuracy of ordered data sets with fractal properties by creating information technology of classification by machine learning methods.

The object of research is the process of classifying objects by machine learning methods.

The subject of research - methods and models of classification for fractal ordered data sets.

Research methods. When solving the tasks, the following methods were used: mathematical apparatus of machine learning; methods of mathematical statistics for statistical analysis of ordered data sets and analysis of classification accuracy using machine learning; methods of chaos theory and fractal analysis for calculating fractal and recurrence characteristics..

The scientific novelty of the obtained results is that for the first time the following was established:

- developed information technology for classification of fractal ordered data sets, which is based on a combination of decision tree methods and neural networks, takes into account self-similar and multifractal properties of ordered data, which increases the accuracy of classification;

- a method of estimating the Hurst exponent according to the values of the time series is proposed, which is based on the application of classification methods of machine learning, which allows to significantly reduce the confidence interval of evaluation;

- applied recurrence characteristics of time series, as features for the classification of time series based on their fractal properties by machine learning methods, allowed to increase the accuracy of classification.

Further development was received by:

- a method of generating fractal realizations based on a stochastic multiplicative binomial cascade, which, unlike the existing ones, uses analytical determination of asymmetric beta distribution parameters, which allows to generate ordered data arrays with given multifractal properties;

- methods of binary classification of time series with fractal properties, based on the use of decision trees and neural networks, which, unlike the existing ones, use fractal and recurrence characteristics as features, which allows to increase the accuracy of classification.

The practical significance of the obtained results is that as a result of the thesis research a set of methods, algorithms and programs was created, which allow to solve the problem of classification of fractal ordered data sets. All theoretical developments of the thesis are brought by the author to concrete methods and are put in a basis of functioning of information technology of classification of the ordered data sets with fractal properties by methods of machine learning.

The proposed method of estimating the Hurst exponent, which is implemented in software, allows to improve the accuracy of its estimation according to ordered data, namely: reduces the confidence interval of the estimation several times.

The analysis of existing methods of classification of ordered data sets showed that, despite the fact that the use of machine learning in fractal data analysis is constantly growing, to date, no information technology has been developed for the classification of fractal data sets, including time series.

The thesis reviews the existing methods of generating fractal and multifractal ordered data sets. The necessity of improvement of such methods is proved, and the approach to generation of a stochastic multiplicative binomial cascade on the basis of the decision of a problem of nonlinear optimization is offered. Solving this problem allows the use of an asymmetric beta distribution to generate a stochastic multiplicative binomial cascade, which allows us to cover a wide range of multifractal properties. The use of an advanced method for generating a stochastic multiplicative binomial cascade makes it possible to generate more complex fractal realizations of multifractal Brownian motion.

Numerical experiments on the classification of different types of ordered data sets, which were divided into classes according to their fractal properties, were performed. The following classification methods were used: decision trees, bagging, random forest, multilayer perceptron, long-term short-term memory networks. Studies have shown that the range of multifractal and self-similar properties plays an important role in the choice of classifier, and accordingly on the accuracy of classification. It was proved that the use of statistical and fractal characteristics of multifractal ordered data sets improves the accuracy of ODS classification compared to the use of ODS values as features in the classification.

Recurrence plots are considered and the use of their characteristics as features in the training of classification models is proposed. Studies have shown that the characteristics of recurrence plots make a significant contribution to the accuracy of classification, and allow to classify ODS with monofractal properties.

The information technology of ODS classification is developed, which allows to choose the optimal method of machine learning for the classification of the studied ordered data set.

The use of the developed information technology for determination of the Hurst exponent of ODS is offered. The effectiveness of using machine learning methods to determine the Hurst exponent and its confidence interval has been experimentally proven, and it has allowed to reduce the confidence interval of the Hurst exponent for fractal and multifractal ODS more than 2 times.

The results of the application of the proposed information technology to detect DDoS attacks in a computer network are presented. IT increases the number of detected attacks, which allows you to use the proposed IT as an additional filter in detecting DDoS attacks.

The models, methods and information technology of fractal data classification proposed in the thesis were introduced into the activity of enterprises of different branches of economy:

– for the enterprise PrJSC "Farlep-Invest" (Kharkiv) the developed information technology for reduction of negative influence of cyber-attacks on information systems of the enterprise is introduced;

– for the enterprise CB "PrivatBank" (Kharkiv) the developed information technology for detection of intrusions into information systems of the enterprise is introduced.

The results of the dissertation research were introduced in the educational process of Kharkiv National University of Radio Electronics at the Department of Infocommunication Engineering in the teaching of the discipline "Artificial Intelligence (Artificial Intelligence)".

**Keywords:** classification, information technology, machine learning, recurrent diagrams, multifractal processes, random forest, neural networks, multifractal analysis.

#### List of applicant publications

*Scientific papers, in which the main scientific results of the thesis are published:*

1. Bulakh V.A. Modelirovaniye mul'tiplikativnykh stokhasticheskikh kaskadov na osnove sluchaynoy velichiny s beta raspredeleniyem. *International journal information content & processing*. Bulgaria, 2017. Vol. 4, No 2. P. 159–170.

2. Kirichenko L.O., Bulakh V.A., Radivilova T.A. Klassifikatsiya mul'tifraktal'nykh stokhasticheskikh vremennykh ryadov s ispol'zovaniyem meta-algoritmov na osnove derev'yev resheniy. *Sistemní tekhnologii*. Dnipro, 2018. № 3(116). S. 22–27.

3. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T., Chernyak V. Analiz vzaimozavisimosti vremennykh ryadov bitkoina i aktivnosti soobshchestv v sotsial'nykh setyakh. *International journal information technologies & knowledge*. Bulgaria, 2018. Vol. 12, No 1. P. 43–55.
4. Kirichenko L., Radivilova T., Bulakh V. Generalized approach to Hurst exponent estimating by time series. *Informatyka automatyka pomiary w gospodarce i ochronie srodowiska*. Poland, 2018. Vol. 8, No 1. P. 28–31.
5. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T. Machine learning in classification time series with fractal properties. *Data*. 2019. Vol. 4, No 5. P. 1–13.
6. Radivilova T., Kirichenko L., Bulakh V. Obnaruzheniye DDoS-atak metodami mashinnogo obucheniya na osnove fraktal'nykh svoystv. *Security in cyberspace, the social internet space in context values and hazards*. Slupsk-Charkow, Poland, 2019. P. 299–315.
7. Kirichenko L., Radivilova T., Bulakh V. Binary classification of fractal time series by machine learning methods. *Lecture notes in computational intelligence and decision making. Intellectual systems of decision making and problems of computational intelligence: proceedings of the XV international scientific conference*. May 21–25, 2019. Springer, Cham, 2020. P. 701–711.
8. Kirichenko L.O., Bulakh V.A., Tavalbekh M.F., Zinchenko P.P. Informatsiyana tekhnolohiya klasyfikatsiyi fraktal'nykh chasovykh ryadiv. *Systemni tekhnolohii*. 2020. № 3 (128). S. 115–126.
9. Bulakh V.A. Informatsiyana tekhnolohiya klasyfikatsiyi uporyadkovanykh masyviv danykh z fraktal'nymy vlastyvostyamy. *Radioelektronika ta informatyka*. Kharkiv, 2020. № 2 (89). S. 66–72.
10. Kirichenko L.O., Bulakh V.A., Radivilova T.A., Tavalbekh M.F., Zinchenko P.P. Balansuvannya samopodibnoho trafiku v merezhnykh systemakh vyyavlennya vtorhnen'. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*. Kyyiv, 2020. №3 (7). S. 17–32. URL: <https://csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/130>.

11. Radivilova T., Bulakh V., Ageiev D., Kirichenko L. The methods to improve quality of service by accounting secure parameters. *Advances in computer science for engineering and education*, Springer. Cham, 2020. Vol. 938, P. 346–355.

*Materials and works of scientific conferences:*

12. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T. Fractal time series analysis of social network activities. *Problems of infocommunications. Science and technology: proceedings of the 4th international scientific-practical conference*. October 10–13, 2017. Kharkiv, Ukraine, 2017. P. 456–459.

13. Kirichenko L.O., Radivilova T.A., Bulakh V.A. Mul'tyfraktal'nyy analiz chasovykh ryadiv v sotsial'nykh merezhakh. *Praktychne zastosuvannya neliniynykh dynamichnykh system v infokomunikatsiyakh: materialy 6 mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (1 mizhnarodnyy sympozium)*. Chernivtsi, 2017. S. 19–20.

14. Radivilova T., Kirichenko L., Bulakh V., Ageyev D., Tawalbeh M. Decrypting SSL/TLS traffic for hidden threats detection. *Dependable systems, services and technologies: proceedings of the IEEE 9th international conference*. May 24–27, 2018. Kyiv, Ukraine, 2018. P. 143–146.

15. Bulakh V., Kirichenko L., Radivilova T. Classification of multifractal time series by decision tree methods. *ICT in education, research and industrial applications. Integration, harmonization and knowledge transfer: proceedings of the 14th international conference*. May 14–17, 2018. Kyiv, Ukraine, 2018. Vol. I (2105). P. 457–460.

16. Bulakh V., Kirichenko L., Radivilova T. Time series classification based on fractal properties. *Data stream mining & processing: proceedings of the IEEE second international conference*. August 21–25, 2018. Lviv, Ukraine, 2018. P. 198–201.

17. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T. Classification of fractal time series using recurrence plots. *Problems of infocommunications. Science and technology: international scientific-practical conference*. October 9–12, 2018. Kharkiv, Ukraine, 2018. P. 719–724.

18. Kirichenko L., Bulakh V., Radivilova T., Kobitska Y. Fractal analysis of DDoS attack realizations. *Fizyko-tekhnichni problemy peredavannya, obrobky ta zberihannya informatsiyi v infokomunikatsiynykh systemakh: Materialy 7-oyi mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi*. 8-10 lystopada 2018 r. Chernivtsi, 2018. S. 13.

19. Radivilova T., Bulakh V., Kirichenko L. The method to control buffering and bandwidth network by monitoring of fractal traffic and security parameters. *Fizyko-tekhnichni problemy peredavannya, obrobky ta zberihannya informatsiyi v infokomunikatsiynykh systemakh: materialy 7-oyi mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi*. Chernivtsi, 2018. S.97.

20. Kyrychenko L.O., Bulakh V.A., Radyvylova T.A. Sravnytel'nyy analiz klasyfykatsyy mul'tyfraktal'nykh vremennykh ryadov. *Informatsiyi tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni: materialy mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi*. 27 – 29 bereznya 2018 r. Dnipro, 2018. S.126.

21. Radivilova T., Kirichenko L., Ageyev D., Bulakh V. Classification methods of machine learning to detect DDoS attacks. *Intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications: proceedings of the 10th IEEE international conference*. September 18–21, 2019. Metz, France, 2019. P. 207–210.

22. Radivilova T., Kirichenko L., Bulakh V. Comparative analysis of machine learning classification of time series with fractal properties. *Advanced optoelectronics and lasers: proceedings of the IEEE 8th international conference*. September 06–08, 2019. Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 557–560.

23. Kyrychenko L.O., Bulakh V.A. Klasyfykatsyya vremennykh ryadov na osnove fraktal'nykh svoystv. *Mizhnarodnyy naukovyy sympozium Intelektual'ni rishennya: materialy V-oyi mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi*. 15–20 kvitnya 2019r. Uzhhorod, 2019. S. 220.

24. Radivilova T., Kirichenko L., Bulakh V. Machine learning classification of multifractional brownian motion realizations. *Computer modeling and intelligent systems: proceedings of the third international workshop*. April 27–May 1, 2020. Zaporizhzhia, Ukraine, 2020. P. 980–989.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
Розділ 1. Фрактальні та мультифрактальні процеси як потік вхідної інформації для інформаційної технології класифікації упорядкованих масивів даних.....	12
1.1    Фрактальні часові ряди та упорядковані масиви даних .....	12
1.1.1    Самоподібний стохастичний процес з неперервним часом.....	12
1.1.2    Самоподібний стохастичний процес з дискретним часом.....	14
1.1.3    Довгострокова залежність та важкі хвости розподілів .....	15
1.2    Параметр Херста та методи його обчислення по експериментальним даним .....	17
1.3    Мультифрактальні процеси .....	18
1.4    Методи мультифрактального аналізу.....	25
1.5    Методи машинного навчання.....	28
1.6    Вимоги до інформаційної технології.....	37
1.7    Постановка задачі дослідження .....	39
ВИСНОВКИ ПО ПЕРШОМУ РОЗДІЛУ .....	40
Розділ 2. Використання моделювання фрактальних упорядкованих масивів даних як метод доповнення даних для інформаційної технології в умовах недостатньої інформації.....	42
2.1    Біноміальний стохастичний мультиплікативний каскад.....	43
2.2    Моделювання біноміальних стохастичних мультиплікативних каскадів, на основі оцінок мультифрактальних характеристик часових рядів.....	48
2.3    Експоненціальне перетворення фрактального гаусівського шуму .....	51
2.4    Мультифрактальний броунівський рух. Побудова реалізацій фрактального броунівського руху в мультифрактальному часі на основі каскадної моделі .....	56
ВИСНОВКИ ПО ДРУГОМУ РОЗДІЛУ .....	58
Розділ 3. Методи машинного навчання як інструмент для функціонування інформаційної технології класифікації упорядкованих масивів даних.....	60
3.1.    Розбиття на класи .....	61
3.2.    Класифікатори.....	62
3.3.    Характеристики якості класифікації для порівняння .....	64

3.4. Ознаки .....	65
3.4.1. Ознаки – значення часового ряду .....	65
3.4.2. Ознаки – статистичні та мультифрактальні характеристики .....	71
3.4.3. Ознаки – фрактальні та рекурентні характеристики .....	74
3.5 Оцінювання показника Херста методами машинного навчання .....	85
ВИСНОВКИ ПО ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛУ .....	87
Розділ 4. Інформаційна технологія класифікації фрактальних упорядкованих масивів даних .....	89
4.1. Розробка інформаційної технології класифікації фрактальних упорядкованих масивів даних .....	89
4.2. Застосування запропонованої ІТ на прикладі детектування DDoS-атак ....	94
ВИСНОВКИ ПО ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛУ .....	101
ВИСНОВКИ .....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	104
Додаток А. Документи впровадження основних результатів дисертаційної роботи .....	119
Додаток Б. Список публікацій здобувача .....	123