

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кіріченко Людмила Олегівна

УДК 519.2: 004.9

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
САМОПОДІБНИХ І МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИХ
СТОХАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор

Удовенко Сергій Григорович, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Михальов Олександр Ілліч, Національна металургійна академія України, завідувач кафедри інформаційних технологій;

доктор технічних наук, професор

Саваневич Вадим Євгенович, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин;

доктор технічних наук, професор

Пащенко Руслан Едуардович, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, старший науковий співробітник відділу дистанційного зондування Землі.

Захист відбудеться «___» _____ 2013 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «___» _____ 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.052.02

В.В. Безкоровайний

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вже стало загальновизнаним, що чимало інформаційних, біологічних, фізичних, технологічних процесів мають складну фрактальну структуру. Останнім часом фрактальний аналіз використовується для моделювання, аналізу та контролю складних систем у різних галузях науки і техніки: в телекомунікаціях – для попередження перевантажень комунікаційних комп'ютерних мереж зв'язку; в геології – для прогнозування сейсмічної активності, небезпеки виникнення цунамі та інших руйнівних явищ; у біології та медицині – для діагностики захворювань і фізіологічного стану за даними електрокардіограм та електроенцефалограм; в економіці – для прогнозування кризових ситуацій та оцінювання ризику за фінансовими рядами; у фізиці – для дослідження турбулентності та термодинамічних процесів тощо.

Методи оцінювання параметрів самоподібних і мультифрактальних процесів за часовими рядами були запропоновані і досліджені Г. Херстом, Б. Мандельбротом, В. Віллінджером, М.С. Такку, Р. Рієді, І. Кандельхардом, Е. Петерсом, О.І. Шелухиним, А.Н. Павловим, В.М. Соловйовим та іншими науковцями. Особливе значення серед методів дослідження фрактальних нестационарних процесів мають методи, засновані на вейвлет-перетвореннях, основні ідеї яких були сформульовані в роботах С. Малла, П. Абрі, П. Фландріна, Д. Вейтча.

Незважаючи на велику кількість публікацій, пов'язаних із практичним застосуванням фрактального аналізу, сьогодні не існує універсального підходу щодо оцінювання фрактальних характеристик, заснованого на попередньому дослідженні кореляційної структури процесу. Крім того, залишається невирішеним ряд завдань, пов'язаних з оцінюванням параметрів самоподібності та мультифрактальності для нестационарних часових рядів малої довжини.

У зв'язку із цим актуальною науково-технічною проблемою слід вважати розробку сукупності ефективних взаємопов'язаних методів комплексного оцінювання параметрів фрактальних стохастичних процесів для дослідження часових рядів за вибірковими даними невеликих обсягів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках договорів на замовлення Міністерства освіти і науки України: № Ф25/713 «Аналіз і поведінка систем з великою нелінійністю: синергетичний підхід» № ДР 0107U010621, № Ф25/253 «Розробка математичних моделей інформаційних систем з великою нелінійністю» № ДР 0108U009112, № 245 «Еволюційні гібридні системи обчислювального інтелекту із змінною структурою для інтелектуального аналізу даних» № ДР 0110U000458. Авторкою, як одним із виконавців робіт, досліджено кореляційні та фрактальні властивості інформаційних потоків даних і розроблено відповідні математичні моделі та методи.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка комплексного підходу щодо оцінювання параметрів самоподібних і мультифрактальних випадкових процесів за часовими рядами малої довжини,

заснованого на використанні сукупності ефективних взаємопов'язаних методів аналізу фрактальної та кореляційної структур процесу.

Досягнення цієї мети вимагає розв'язання таких задач:

- побудова самоподібних і мультифрактальних моделей для проведення досліджень на основі аналізу властивостей і характеристик математичних моделей фрактальних стохастичних процесів;

- розробка методу незміщеного оцінювання параметра самоподібності (показника Херста) для стаціонарних часових рядів малої довжини, який дозволяє істотно зменшити середньоквадратичне відхилення оцінок;

- розробка методів оцінювання параметра самоподібності для нестаціонарних часових рядів малої довжини, які дозволяють усунути вплив трендових і циклічних складових;

- розробка комплексного методу оцінювання параметра самоподібності для стаціонарних і нестаціонарних коротких часових рядів, заснованого на попередньому дослідженні структури часового ряду, що дозволить вибрати найбільш перспективну процедуру оцінювання;

- розробка комплексного методу оцінювання мультифрактальних характеристик для коротких часових рядів, у тому числі для реалізацій хаотичних процесів, що дозволяє отримати незміщені та спроможні оцінки;

- розробка методу визначення властивостей монофрактальності та мультифрактальності стохастичних процесів за вибірковими фрактальними характеристиками, що дозволяє із заданою ймовірністю визначати характер самоподібності досліджуваних процесів;

- удосконалення віконних методів аналізу кореляційної, спектральної і фрактальної структури часових рядів, у тому числі методів, заснованих на дискретному вейвлет-перетворенні, які дозволяють ефективно відстежувати зміну властивостей ряду;

- експериментальна верифікація і практична реалізація розроблених методів і моделей з метою підтвердження їх ефективності та працездатності.

Об'єкт дослідження – самоподібні та мультифрактальні стохастичні процеси в технічних, економічних і біологічних системах.

Предмет дослідження – моделі самоподібних і мультифрактальних стохастичних процесів та методи оцінювання їх параметрів.

Методи дослідження. Під час розв'язання поставлених задач у роботі використовувалися методи фрактального, мультифрактального і статистичного аналізу даних для оцінювання фрактальних властивостей часових рядів; методи теорії ймовірностей та випадкових процесів для побудови математичних моделей самоподібних і мультифрактальних процесів; методи нелінійної динаміки для дослідження властивостей реалізацій хаотичних процесів; методи вейвлет-аналізу для розробки методів досліджень автокореляційної залежності та фрактальної структури часових рядів; імітаційне моделювання для апробації запропонованих методів і моделей та розробки практичних рекомендацій.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає в розвитку теорії фрактального аналізу стохастичних процесів і вирішення на цій основі науково-технічної проблеми – підвищення ефективності оцінювання параметрів

самоподібних і мультифрактальних випадкових процесів за часовими рядами малої довжини на основі розробки сукупності взаємопов'язаних методів аналізу фрактальної та кореляційної структур процесу.

Основні результати, що визначають новизну дисертаційної роботи, полягають у тому, що:

– вперше запропоновано комплексний підхід щодо оцінювання параметрів самоподібних і мультифрактальних випадкових процесів за короткими часовими рядами, який на відміну від існуючих підходів: передбачає попереднє дослідження структури часових рядів, зокрема, рядів з наявністю циклічних складових та короткострокової залежності; забезпечує незміщене інтервальне оцінювання параметра самоподібності та спільне використання декількох методів фрактального аналізу, що дозволяє підвищити достовірність отриманих оцінок;

– вперше запропоновано метод оцінювання показника Херста із застосуванням дискретного вейвлет-перетворення, заснований на аналізі кореляційної залежності оцінок, отриманих за допомогою різних вейвлет-функцій, що дозволяє зменшити середньоквадратичне відхилення шуканих оцінок у середньому на 10-15 %;

– вперше запропоновано метод вейвлет-оцінювання показника Херста, який заснований на попередньому аналізі спектра вейвлет-енергії та застосуванні пакетного вейвлет-перетворення, що дозволяє оцінювати показник Херста для рядів малої довжини зі значними трендовими та циклічними компонентами;

– вперше запропоновано метод визначення властивостей монофрактальності та мультифрактальності за вибірковою функцією узагальненого показника Херста, що дозволяє розрізняти монофрактальні та мультифрактальні процеси за короткими часовими рядами;

– вперше запропоновано модель стохастичного процесу, який, на відміну від існуючих, є експоненціальним перетворенням фрактального гаусівського шуму, що дозволяє отримати самоподібний у широкому значенні процес із заданими параметром самоподібності та характеристикою хвоста розподілу;

– удосконалено модель мультифрактального процесу на основі біноміального мультиплікативного стохастичного каскаду; на відміну від існуючих моделей вагові коефіцієнти каскадного процесу мають несиметричний бета-розподіл ймовірностей, що дозволяє отримати мультифрактальний процес із заданими параметром самоподібності та функцією мультифрактального спектра;

– набули подальшого розвитку методи мультифрактального аналізу для часових рядів малої довжини з істотними трендовими та періодичними компонентами в області побудови незміщених інтервальних оцінок; на відміну від існуючих методів, одержано залежності статистичних характеристик оцінок від довжини часового ряду;

– набули подальшого розвитку віконні методи аналізу зміни кореляційної та фрактальної структури часових рядів, які, на відміну від існуючих, ґрунтуються на виявленні розладнання властивостей ряду за кількома критеріями: зміни числової характеристики закону розподілу, відносної вейвлет-ентропії та узагальненого показника Херста;

– набули подальшого розвитку методи аналізу фрактальної структури реалізацій хаотичних процесів, які, на відміну від існуючих, враховують статистичну залежність між показником Ляпунова та мультифрактальними характеристиками.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені методи дослідження і математичні моделі самоподібних й мультифрактальних процесів доцільно використовувати для моделювання і аналізу технічних, економічних та інших систем, які мають фрактальні властивості. Запропоновані в роботі віконні методи аналізу фрактальної структури доцільно застосувати для моніторингу, діагностики та прогнозування критичних явищ для часових рядів різної природи.

Розроблені моделі та методи аналізу самоподібних і мультифрактальних телекомунікаційних потоків та прогнозування перевантаження мережі впроваджено у Державному підприємстві «Завод ім. В. О. Малишева». Результати роботи використовуються для розробки алгоритмів функціонування та програмного забезпечення вузлів телекомунікаційного обладнання з метою підвищення якості обслуговування і ефективності обробки трафіка, який має самоподібні властивості. Запропоновані віконні методи аналізу зміни мультифрактальної структури часових рядів впроваджено в ТОО «Маркет-репорт». Результати роботи використовуються під час моніторингу фрактальної структури часових рядів цінних паперів і фінансових індексів та виявлення індикаторів кризових явищ валютних рядів. Результати досліджень мультифрактальних властивостей біомедичних сигналів впроваджено у Харківському обласному клінічному онкологічному центрі. Запропоновані методи аналізу мультифрактальних характеристик кардіосигналів використовуються для обробки статистичних даних, пов'язаних з аналізом характерних особливостей онкопатології. Розроблені методи дослідження випадкових процесів впроваджено у навчальний процес на кафедрі прикладної математики у Харківському національному університеті радіоелектроніки. Розроблені методи дослідження фрактальної структури хаотичних процесів впроваджено у навчальний процес в Фізико-технічному інституті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Всі результати впровадження підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримано здобувачем особисто та опубліковано в роботах [1–77]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать наступні результати. У роботі [1] проведено порівняльний аналіз імовірнісних властивостей реалізацій хаотичного й випадкового блукання, [2, 39] – запропоновано чисельну характеристику закону розподілу неперервної випадкової величини, [3] – проведено аналіз статистичних характеристик оцінок показника Херста, отриманих методами R/S-аналізу та змінювання дисперсії, [4, 40] – проведено попереднє дослідження фрактальної структури часового ряду методом R/S-аналізу, [5, 41] – досліджено вплив параметрів самоподібності трафіка на утворення черг у мережі, [6, 42, 43] – запропоновано метод прогнозування довжини черги на основі параметрів самоподібного трафіка, [7, 44, 45] – проведено чисельне моделювання самоподібного навантаження комп'ютерної мережі, [8] –

виконано огляд основних властивостей і методів аналізу самоподібних процесів, [9] – досліджено властивості запропонованої характеристики закону розподілу випадкової величини, [10, 35, 37, 38] – запропоновано метод генерації псевдовипадкових чисел за допомогою хаотичного відображення і досліджено їх статистичні властивості, [11, 48] – виконано аналіз реалізацій енцефалограм методами нелінійної динаміки, [12, 51] – проведено кореляційний та порівняльний аналіз статистичних характеристик вейвлет-оцінок показника Херста, отриманих за допомогою різних вейвлетів, [13] – виконано аналіз фінансових рядів методами нелінійної динаміки, [14, 46, 53] – запропоновано модель самоподібного стохастичного процесу, який враховує ступінь самоподібності та вагу хвоста розподілу реалізацій процесу, [16, 47, 52] – проведено моделювання самоподібного трафіка для імітаційного моделювання роботи комп'ютерної мережі; [17] – методами нелінійної динаміки виконано аналіз значень вікна перевантажень, [18] – проаналізовано вплив параметрів самоподібності трафіка на виникнення перевантаження мережі, [19, 54] – застосовано метод R/S-аналізу до кумулятивних рядів з декількома циклічними складовими та наявністю короткострокової залежності, [20, 49, 53, 58, 66, 66] – запропоновано віконні методи аналізу зміни фрактальної структури часових рядів, [21] – проведено прогнозування ринкового ризику за допомогою методики VaR, [22, 57] – виконано порівняльний аналіз якості обслуговування мережі при пуассонівському і самоподібному потоках, [23, 59, 61, 62] – здійснено розробку та реалізацію методу вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів, які мають значні трендові та циклічні компоненти, [24, 63, 67] – проведено моделювання фрактального трафіка для імітаційного моделювання роботи мережі MPLS, [25, 64, 68] – розроблено віконні методи аналізу зміни кореляційної структури часових рядів на основі вейвлет-ентропії, [26, 70, 71] – виконано мультифрактальний аналіз часових рядів за допомогою дискретного вейвлет-перетворення, [27, 74] – запропоновано метод аналізу кореляційної та спектральної структури часових рядів на основі пакетного вейвлет-перетворення, [31, 69, 75, 76] – запропоновано модель мультифрактального процесу на основі біноміального мультиплікативного стохастичного каскаду, [32, 65, 73] – досліджено фрактальну структуру реалізацій хаотичних процесів, [33] – досліджено вплив збурень на поведінку хаотичних систем, [34, 36, 50] – проведено порівняльний аналіз статистичних характеристик оцінок показника Херста, отриманих різними методами, [55, 56] – проведено аналіз статистичних характеристик оцінок показника Херста, [72, 77] – проведено оцінювання параметрів та моделювання процесів фрактального руху Леві.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені, доповідалися і обговорювалися на таких наукових конференціях: 2-му Міжнародному Форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2005 р.), 1-й та 2-й Міжнародних конференціях «Сучасна стохастика: Теорія і застосування» (Київ, 2006, 2010 рр.), 8–12-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, 2007–2011 рр.), 1–4-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» (Львів, 2006–2009 рр.), 2-й Міжнародній науковій конференції «Сучасні

інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку» (Харків-Туапсе, 2007 р.), IV Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості та освіті» (Болгарія, Варна, 2008 р.), 1-й Міжнародній науково-технічній конференції «Компьютерные науки и технологии» (Росія, Белгород, 2009 р.), V Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми та досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2010 р.), 17-й Міжнародній конференції з автоматизації та управління «Автоматика – 2010» (Харків, 2010 р.), 1-й Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (Черкаси, 2011 р.), V Міжнародній школі-семінарі «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2010 р.), Міжнародній конференції «Сучасні проблеми математики та її застосування в природничих науках та інформаційних технологіях» (Харків, 2011 р.), XVI та XVII Міжнародних конференціях «KDS : Knowledge–Dialogue–Solution» (Київ, 2010, 2011 рр.), 5-й Міжнародній конференції «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (Львів, 2011 р.), II Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (Київ–Харків, 2011 р.), Міжнародній конференції «Проблемы и потенциал академической мобильности: пути к международной и междисциплинарной кооперации» (Казахстан, Алмати, 2011 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (Черкаси, 2012 р.), III Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та моделювання в економіці» (Черкаси, 2012 р.), науково-технічній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання в наукомістких технологіях» (Харків, 2010 р.), науково-практичних конференціях «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (Євпаторія, 2010, 2011 рр.), науково-практичних конференціях «Системний аналіз і управління» (Запоріжжя, 2005, 2006, 2010–2012 рр.), науково-технічних конференціях «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (Дніпропетровськ, 2011, 2012 рр.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Комп'ютерне моделювання та інформаційні системи в економіці, науці і освіті» (Одеса–Черкаси, 2011 р.), 10-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології» (Одеса, 2011 р.), III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформатика та системні науки» (Полтава, 2012 р.), 10-й Ювілейній науковій конференції «Теоретичні та прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» (Київ, 2012 р.).

Публікації. Основні результати за темою дисертації викладено у 77 опублікованих роботах: 36 статтях, із них 32 у наукових фахових виданнях України, 3 статті у міжнародних виданнях, 41 публікація у збірниках матеріалів і тез доповідей науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел зі 348 найменувань (37 стор.) та п'яти додатків (23 стор.), містить 38 таблиць (14 стор.), 156 рисунків (58 стор.) та має загальний обсяг 410 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дослідження, формулюються мета і задачі дослідження, висвітлюється наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз публікацій, присвячених дослідженням самоподібних і мультифрактальних часових рядів, заснованих на методах фрактального аналізу. Розглянуто основні поняття та властивості самоподібних і мультифрактальних стохастичних процесів.

Самоподібність випадкових процесів полягає у збереженні ймовірнісних характеристик при зміні масштабу часу. Стохастичний процес $X(t)$ є самоподібним з параметром H , $0 < H < 1$, якщо процес $a^{-H}X(at)$ описується тими ж скінченновимірними законами розподілів (Law), що і $X(t)$:

$$\text{Law}\{a^{-H}X(at)\} = \text{Law}\{X(t)\}, \quad \forall a > 0, t > 0. \quad (1)$$

Параметр H (показник Херста) є ступенем самоподібності процесу. Поряд з цією властивістю, показник $H > 0.5$ характеризує міру довгострокової залежності стохастичного процесу, тобто спадання автокореляційної функції $r(k)$ за степеневим законом: $r(k) \sim k^{-\beta}$, $k \rightarrow \infty$, $0 < \beta < 1$, $H = 1 - (\beta/2)$. Більшість процесів з довгостроковою залежністю мають важкі хвости одновимірної функції розподілу ймовірностей: $P[X > x] \sim x^{-\alpha}$, $x \rightarrow \infty$, $0 < \alpha < 2$.

Моменти q -го порядку самоподібного випадкового процесу можна виразити таким чином:

$$\mathbb{M}\left[|X(t)|^q\right] = C(q) \cdot t^{qH}, \quad (2)$$

де величина $C(q) = \mathbb{M}\left[|X(1)|^q\right]$.

Для мультифрактальних випадкових процесів виконується більш загальне співвідношення:

$$\text{Law}\{X(at)\} = \text{Law}\{M(a) \cdot X(t)\}, \quad (3)$$

де $M(a)$ – незалежна від $X(t)$ випадкова функція. У разі самоподібного процесу $M(a) = a^H$. Мультифрактальні процеси виявляють більш гнучкі скейлінгові закономірності для моментних характеристик:

$$\mathbb{M}\left[|X(t)|^q\right] = c(q) \cdot t^{qh(q)}, \quad (4)$$

де $c(q)$ – певна детермінована функція; $h(q)$ – узагальнений показник

Херста, який у загальному випадку є нелінійною функцією.

Значення $h(q)$ при $q = 2$ збігається із значенням ступеня самоподібності H . Для монофрактальних процесів узагальнений показник Херста не залежить від параметра q : $h(q) = H$.

У загальному випадку мультифрактальна множина характеризується скейлінговою експонентою $\tau(q)$, де параметр q приймає дійсні значення. Функція $\tau(q)$ показує, наскільки неоднорідною є досліджувана множина. Узагальнений показник Херста пов'язаний з функцією $\tau(q)$ співвідношенням $\tau(q) = qh(q) - 1$. Для самоподібного процесу функція $\tau(q)$ є лінійною.

Характеристикою локальних мультифрактальних властивостей реалізацій процесу є функція мультифрактального спектра $f(\alpha)$. Величина α_i є показником сингулярності в точці x_i . Для самоподібного процесу всі α_i однакові й дорівнюють параметру самоподібності H . Функція мультифрактального спектра $f(\alpha)$ характеризує розподіл ймовірностей різних значень α_i . Формально перехід від змінних $\{q, \tau(q)\}$ до змінних $\{\alpha, f(\alpha)\}$ може бути здійснений за допомогою перетворень Лежандра.

Найбільш адекватним математичним апаратом для дослідження динаміки та структури процесів, які мають фрактальні властивості, є вейвлет-аналіз. Неперервне вейвлет-перетворення функції $X(t)$ має вигляд:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi_{ab}(t) dt, \quad (5)$$

де $\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – система базисних функцій, отриманих з материнського вейвлета $\psi(t)$ за рахунок операцій зсуву в часі b і зміни часового масштабу a .

В результаті дискретного вейвлет-перетворення (ДВП), заснованого на кратномасштабному аналізі, функція $X(t)$ може бути подана сумою компонент апроксимації та деталізації:

$$X(t) = \sum_{k=1}^{N_a} \text{apr}(N, k) \phi_{Nk}(t) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{N_j} \text{det}(j, k) \psi_{jk}(t), \quad (6)$$

де $\text{apr}(N, k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \phi_{Nk}(t) dt$ – вейвлет-коефіцієнти апроксимації на рівні N ; $\text{det}(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi_{jk}(t) dt$ – вейвлет-коефіцієнти деталізації на рівні j ; N – максимальний рівень розкладу; N_j – кількість коефіцієнтів деталізації на рівні j ;

N_a – кількість коефіцієнтів на рівні N ; $\psi(t)$ – материнська вейвлет-функція; $\varphi(t)$ – відповідна скейлінг-функція.

Спектр вейвлет-енергії розраховується за формулою:

$$E_j = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} |\det(j, k)|^2, \quad j=1, \dots, N, \quad (7)$$

де N – максимальний рівень розкладу; N_j – кількість коефіцієнтів деталізації на рівні j ; $\det(j, k)$ – вейвлет-коефіцієнти деталізації на рівні j .

Існує багато методів оцінювання параметрів самоподібних і мультифрактальних процесів за часовими рядами. При оцінюванні показника Херста на практиці найчастіше використовуються методи нормованого розмаху, зміни дисперсії агрегованого ряду, флуктуаційного аналізу та вейвлет-оцінювання на основі ДВП. При оцінюванні мультифрактальних характеристик найбільш затребуваними є методи мультифрактального детрендованого флуктуаційного аналізу та максимумів модулів неперервного вейвлет-перетворення. Сьогодні основними перешкодами для ефективного застосування методів фрактального аналізу є: відсутність попереднього дослідження кореляційної структури процесу, застосування лише одного методу аналізу, відсутність досліджень щодо статистичних властивостей оцінок фрактальних характеристик, отриманих за часовими рядами малої довжини. Результати аналізу стану досліджуваної проблеми, наведені у першому розділі, обумовили зміст подальших розділів дисертаційної роботи.

У **другому розділі** запропоновано підхід щодо оцінювання параметра самоподібності за стаціонарними часовими рядами, який забезпечує незміщене інтервальне оцінювання. У цьому випадку оцінку показника Херста можна подати виразом:

$$\hat{H}_{meth} = f(method, parameters, N),$$

де *method* – метод оцінювання показника Херста; *parameters* – параметри даного методу; N – довжина часового ряду.

Фактично всі методи оцінювання параметра самоподібності за часовим рядом $x(t)$, $t=1, \dots, N$, базуються на виконанні співвідношення (2) при значенні $q=2$. Метод нормованого розмаху заснований на скейлінговому співвідношенні $M[R(\tau)/S(\tau)] \propto \tau^H$, де $R(\tau)$ – розмах кумулятивного ряду $x^{cum}(t, \tau)$, $S(\tau)$ – середнє квадратичне відхилення вихідного ряду. Дисперсія агрегованих часових серій

$$x_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{t=km-m+1}^{km} x(t), \quad k=1, \dots, N/m,$$

підпорядковується залежності

$Var(x^{(m)}) \propto \frac{Var(x)}{m^\beta}$. У методі детрендованого флуктуаційного аналізу (ДФА)

обчислюється функція $F^2(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (y(t) - Y_m(t))^2$, де $Y_m(t)$ – локальний m -поліноміальний тренд. Функція $F(\tau)$, яка усереднена по всьому ряду $y(t)$, має скейлінгову залежність $F(\tau) \propto \tau^H$. Метод вейвлет-оцінювання показника Херста базується на аналізі вейвлет-коефіцієнтів деталізації, які на кожному рівні розкладу мають самоподібні властивості. У цьому методі береться до уваги те, що зміна значень вейвлет-енергії (7) підпорядковується скейлінговому відношенню $E_j \propto 2^{(2H+1)j}$.

У роботі виконано порівняльний аналіз статистичних характеристик оцінок, отриманих вищезгаданими методами, для стаціонарних рядів малої довжини. Як модельні ряди використовувалися дискретні реалізації фрактального броунівського руху із заданим показником Херста H . Значення H змінювалися у всьому діапазоні $0 < H < 1$. Довжина реалізацій дорівнювала від 256 до 4096 відліків. Для кожного згенерованого часового ряду розраховувалися оцінки H методом R/S -аналізу ($\hat{H}_{R/S}$), зміни дисперсії (\hat{H}_d), ДФА (\hat{H}_{fa}) і вейвлет-оцінюванням (\hat{H}_w). Для кожного теоретичного значення H було досліджено статистичні характеристики оцінок, отримані за багатьма різними реалізаціями: середнє значення, середнє квадратичне відхилення, вибірковий закон розподілу, коефіцієнт кореляції між оцінками, отриманими різними методами.

Чисельні дослідження показали, що середні значення оцінок, отриманих всіма досліджуваними методами, мають систематичне зміщення, яке залежить від теоретичного значення показника Херста та довжини реалізацій (див. рис. 1 (а), де по осі абсцис відкладено теоретичні значення показника Херста H , а по осі ординат – середні значення оцінок).

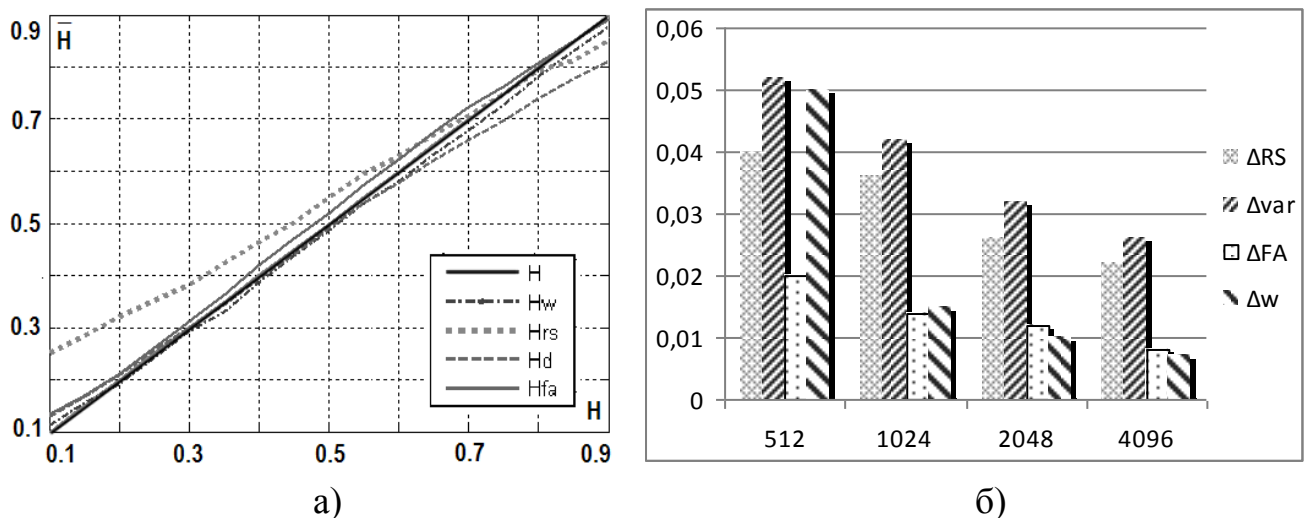


Рисунок 1 – Залежності середніх значень оцінок H від теоретичних значень для довжини ряду 1024 відліків (а); середні зміщення оцінок (б)

Для кількісного оцінювання зміщення оцінки \hat{H}_{meth} , отриманої за допомогою певного методу, було розраховано величину середнього зміщення Δ^{meth} :

$$\Delta^{meth} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \bar{H}_i^{meth} - H_i \right|, \quad (8)$$

де \bar{H}_i^{meth} – середнє значення оцінки \hat{H}_{meth} , отриманої для реалізацій з теоретичним показником H_i за допомогою заданого методу розрахунку показника Херста. Оскільки переважна більшість фрактальних процесів мають довгострокову залежність, на рис.1 (б) наведено залежність середніх зміщень оцінок від довжини реалізації лише для діапазону $0.5 < H < 1$. Найменше зміщення мають вейвлет-оцінки та оцінки, отримані за методом ДФА.

У роботі досліджено, як зменшуються середні квадратичні відхилення оцінок показника Херста при збільшенні довжини модельного фрактального ряду для кожного методу (див. рис. 2). Найменші середні квадратичні відхилення мають оцінки, отримані за допомогою вейвлет-аналізу.

У роботі також досліджено вибіркові закони розподілу оцінок для кожного методу та різних значень параметра Херста. Практично для усіх даних було прийнято гіпотезу про нормальний розподіл вибіркових значень оцінок з параметрами $N(\bar{H}, S_{\hat{H}})$. У цьому випадку оцінка показника Херста може бути подана інтервалом значень, всередині якого із заданою ймовірністю знаходиться істинне значення H :

$$\hat{H} + \Delta - t_{\alpha} S < H < \hat{H} + \Delta + t_{\alpha} S, \quad (9)$$

де N – довжина досліджуваного ряду; $method$ – обраний метод оцінювання; $\hat{H} = \hat{H}(N, method)$ – отримане значення оцінки показника Херста за часовим рядом довжини N ; $\Delta = \Delta(N, method)$ – величина систематичного зміщення оцінки, розрахована за реалізаціями довжини N ; $S = S(N, method)$ – середнє квадратичне відхилення, розраховане за реалізаціями довжини N ; α – потрібний рівень значущості; t_{α} – квантиль стандартного нормального розподілу.

Аналіз кореляційної залежності між оцінками параметра Херста, отриманими різними методами, показав, що вибіркові коефіцієнти кореляції знаходяться у діапазоні від 0 до 0.6. Кореляція вейвлет-оцінок з оцінками, отриманими іншими методами, є незначущою. Тому для збільшення точності

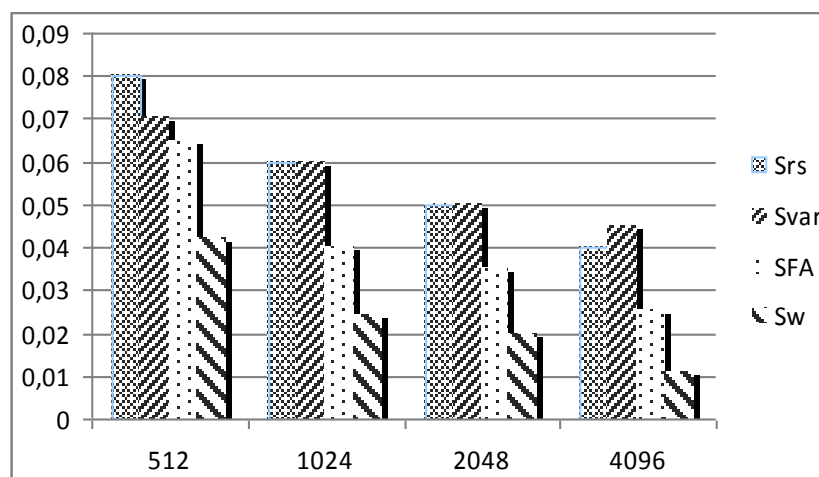


Рисунок 2 – Середні квадратичні відхилення оцінок, теоретичний показник Херста $H = 0.8$

оцінювання можна використовувати середнє арифметичне оцінок, отриманих за допомогою декількох методів оцінювання.

Порівняльний аналіз показав значну перевагу вейвлет-оцінювання. Основним параметром у цьому методі є обрана материнська вейвлет-функція. Для удосконалення методу вейвлет-оцінювання і підвищення точності шуканих оцінок проведено порівняльний аналіз статистичних характеристик оцінок \hat{H}_w , отриманих за допомогою різних вейвлет-функцій. Для оцінювання використовувалися ортогональні вейвлети з компактним носієм: Хаара (haar), Добеші різних порядків (db2-db10), Мейера (dmey), сімлети (sym1-sym10).

Чисельні дослідження показали, що при невеликій довжині часового ряду оцінки \hat{H}_w є систематично заниженими (див. рис. 3, де наведено залежності для різних вейвлет-функцій). Середні квадратичні відхилення вейвлет-оцінок не залежать від значення показника Херста і визначаються довжиною досліджуваного ряду і материнською вейвлет-функцією. Найменші зміщення і середнє квадратичне відхилення мають оцінки, обчислені за допомогою вейвлета Добеші четвертого порядку (див. рис. 4).

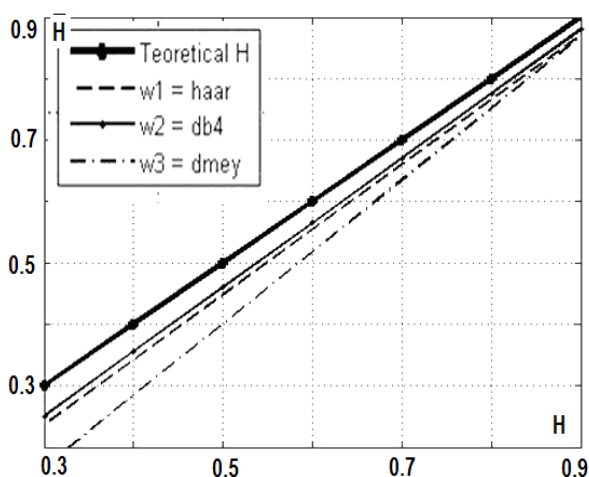


Рисунок 3 – Залежності середніх значень вейвлет-оцінок від теоретичних для довжини ряду 1024 відліків

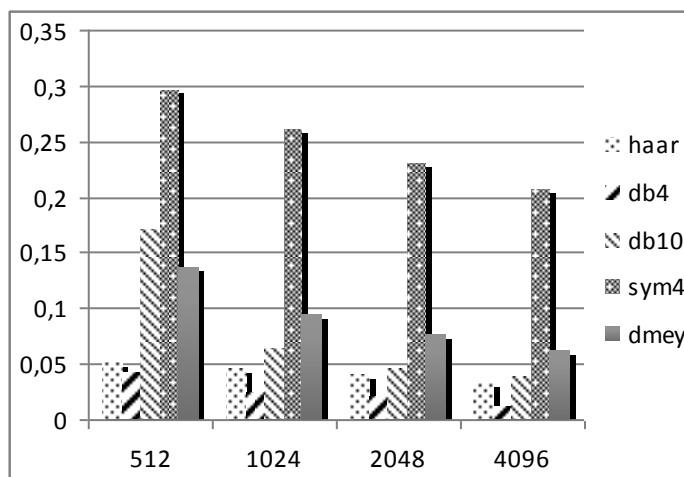


Рисунок 4 – Середні квадратичні відхилення вейвлет-оцінок для рядів різної довжини при різних вейвлетах

Кореляційний аналіз вейвлет-оцінок показника Херста \hat{H}_1 і \hat{H}_2 , отриманих за допомогою різних вейвлетів, показав їх слабку лінійну залежність: абсолютні значення вибірових коефіцієнтів кореляції $r[\hat{H}_1, \hat{H}_2]$ не перевищують 0.5. Дослідження показали, що більш ефективною оцінкою показника Херста є середнє арифметичне оцінок, отриманих за допомогою декількох різних материнських вейвлет-функцій, оскільки у цьому випадку $S\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \hat{H}_i\right] \leq S[\hat{H}_i]$.

Такий підхід дозволяє зменшити середнє квадратичне відхилення шуканих оцінок у середньому на 10-15%. У табл. 1 наведено вибірові значення коефіцієнтів

кореляції та середньоквадратичних відхилень вейвлет-оцінок та їх середніх арифметичних, обчислених з використанням різних вейвлетів при довжині часового ряду 256 значень.

Таблиця 1 – Коефіцієнти кореляції та середні квадратичні відхилення

Вейвлети	$r[\hat{H}_1, \hat{H}_2]$	$S[\hat{H}_1]$	$S[\hat{H}_2]$	$S\left[\frac{1}{2}(\hat{H}_1 + \hat{H}_2)\right]$
$w_1 = \text{haar}$	0.39	0.0498	0.0680	0.0451
$w_2 = \text{db5}$				
$w_1 = \text{db4}$	0.42	0,0420	0.0498	0.0393
$w_2 = \text{haar}$				
$w_1 = \text{db10}$	0.32	0.1703	0.1372	0.1251
$w_2 = \text{dmeu}$				

У третьому розділі запропоновано та досліджено методи оцінювання показника Херста для часових рядів зі значними трендовими і циклічними складовими виду:

$$X(t) = T(t) + C(t) + \varepsilon_H(t),$$

де $X(t)$ – досліджуваний ряд; $T(t)$ – трендова компонента; $C(t)$ – циклічна компонента; $\varepsilon_H(t)$ – випадкова компонента (фрактальний шум з параметром H).

Більшість методів оцінювання параметра Херста стосуються лише стаціонарних часових рядів і в разі наявності трендової компоненти призводять до некоректних результатів. Для дослідження нестационарних рядів використовуються методи ДФА і ДВП. У цьому випадку оцінки показника Херста можна подати виразами:

$$\begin{aligned}\hat{H}_{FA} &= f_{FA}(T, \text{Ratio}, N, m), \\ \hat{H}_w &= f_w(T, \text{Ratio}, N, \text{wave}(p)),\end{aligned}$$

де $T(t)$ – компонента ряду, яка включає трендову та циклічну частини; Ratio – відношення $T(t)$ і фрактального шуму: $\text{Ratio} = S_{trend} / S_{noise}$, де S_{trend} – середнє квадратичне відхилення тренду; S_{noise} – середнє квадратичне відхилення шуму; N – довжина ряду; m – степінь локального m -поліноміального тренда (метод ДФА); $\text{wave}(p)$ – материнський вейвлет (метод на основі ДВП); p – число

нульових моментів вейвлет-функції $\psi(t)$: $\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0, k = 0, \dots, p-1$.

У розділі показано, що для отримання коректної оцінки показника Херста методом ДФА необхідно спочатку провести оцінювання наметуванням, використовуючи локальні поліноми зростаючого степеня і визначити найменший степінь полінома, починаючи з якого оцінка показника Херста перестає

змінюватися. Для оцінювання самоподібності часового ряду необхідно видаляти локальний поліноміальний тренд знайденого степеня. Показано, що отримана оцінка \hat{H}_{FA} не залежить від значення *Ratio*. Інтервальну оцінку показника Херста для часового ряду довжиною N можна визначити за формулою (9).

При використанні методу ДВП оцінка \hat{H}_w обчислюється коректно в залежності від відношення *Ratio*. При зростанні значення *Ratio* оцінка починає лінійно зростати і стає завищеною для будь-якого материнського вейвлета $\psi(t)$.

Діапазон значень $Ratio < Ratio^*$, при якому параметр Херста оцінюється коректно, залежить від виду компоненти $T(t)$ і вейвлет-функції $\psi(t)$. У роботі розраховано значення $Ratio^*$ для різних трендових складових при оцінюванні з використанням вейвлет-функції Добеші четвертого порядку, яка дає найменшу похибку оцінювання.

Запропоновано метод вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів зі значними трендовими та циклічними складовими, який складається з таких етапів:

Етап 1. Попереднє дослідження часового ряду. Аналіз часових рядів шляхом вейвлет-розкладу на складові компоненти, виділення трендових і циклічних компонент.

Етап 2. Аналіз трендових і циклічних компонент, оцінювання порядку поліноміального тренда з метою вибору ефективної материнської вейвлет-функції.

Етап 3. Визначення значення *Ratio*. Якщо значення лежить всередині діапазону коректного оцінювання ($Ratio < Ratio^*$), то показник Херста оцінюється для часового ряду за допомогою обраного материнського вейвлета з числом нульових моментів $p > m$.

Етап 4. Якщо значення $Ratio > Ratio^*$, необхідно здійснити наступне перетворення спектра вейвлет-енергії: виявити рівні розкладання, що відповідають трендовим компонентам, та вилучити їх при оцінюванні нахилу графіка функції $\log_2(E_j)$ від j .

Етап 5. Якщо вилучення декількох значень вейвлет-спектра E_k є небажаним і може призвести до неправильного оцінювання показника Херста, то в цьому випадку необхідно деталізувати ці рівні, застосовуючи пакетне вейвлет-перетворення.

На рис. 5 (а-в) наведено модельний сигнал з показником $H = 0.8$, спектр вейвлет-енергії та залежність $\log_2(E_j)$ від j . На рис. 5 (в) показано апроксимуючу пряму, отриману за всіма значеннями спектра (лінія 1), відповідну оцінку $\hat{H} = 0.94$, і пряму, отриману без урахування значень спектра, які відповідають трендовим складовим (лінія 2), оцінку $\hat{H} = 0.802$.

У розділі запропоновано комплексний підхід щодо оцінювання параметрів самоподібних випадкових процесів за часовими рядами малої довжини, який об'єднує такі складові:

– узагальнені та модифіковані методи попереднього дослідження структури самоподібних часових рядів, що дозволяють визначити інтервали різних скейлінгів; виявлення і видалення короткострокової авторегресійної залежності; перевірку гіпотези про наявність самоподібності;

– методи незміщеного та інтервального оцінювання показника Херста для стаціонарних рядів;

– методи незміщеного та інтервального оцінювання показника Херста за рядами з трендовими та циклічними складовими;

– методи уточнення отриманої оцінки показника Херста з використанням декількох методів оцінювання.

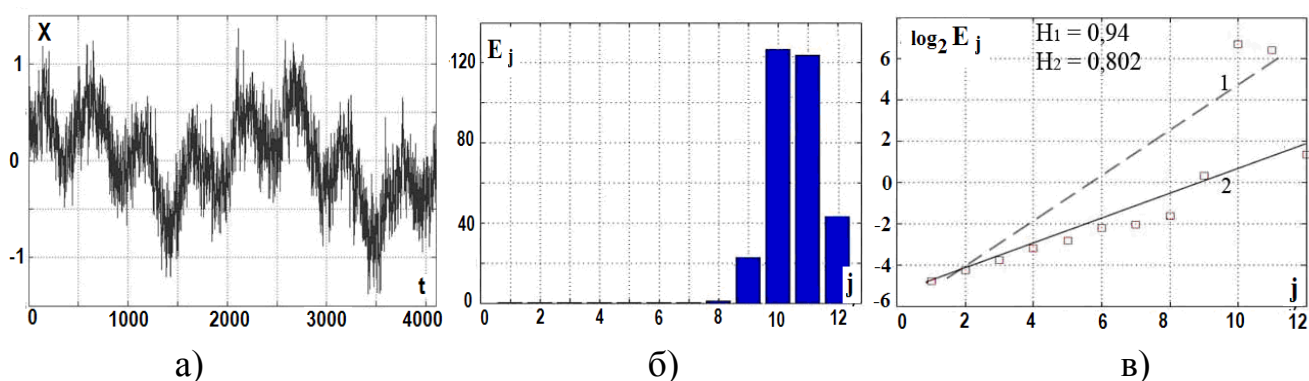


Рисунок 5 – Сигнал (а); спектр вейвлет-енергії (б); залежність $\log_2(E_j)$ від j (в)

У четвертому розділі отримано залежності статистичних властивостей мультифрактальних характеристик (узагальненого показника Херста $h(q)$, скейлінгової експоненти $\tau(q)$ та функції мультифрактального спектра $f(\alpha)$) від довжини досліджуваного часового ряду.

Методи мультифрактального аналізу засновані на аналізі скейлінгових закономірностей для моментних характеристик (4). Зокрема, проведення мультифрактального детрендованого флуктуаційного аналізу (МФДФА) дозволяє дослідити залежність флуктуаційної функції $F_q(s)$ від параметра q :

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F^2(s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}$$
. У цьому випадку виконується скейлінгова залежність

$F_q(s) \propto s^{h(q)}$. Метод максимумів модулів неперервного вейвлет-перетворення (ММВП) дозволяє чисельно отримати статистичну суму:

$$Z(q, a) = \sum_{l \in L(a)} \left(\sup_{a' \leq a} |W(a', x_l(a'))| \right)^q$$
, де $W(a, b)$ – спектр неперервного вейвлет-

перетворення (5), $L(a)$ – множина всіх ліній l максимумів модулів вейвлет-коефіцієнтів на масштабі a ; $x_l(a)$ – розміщення максимуму на цьому масштабі. У

цьому випадку виконується залежність $Z(q, a) \propto a^{\tau(q)}$. Метод мультифрактального аналізу на основі дискретного вейвлет-перетворення (МФДВП) заснований на тому, що узагальнене значення вейвлет-енергії

$E^{(q)} = M |\det(j, k)|^q$ на масштабному рівні j підпорядковується скейлінговому відношенню $E^{(q)} \propto 2^{-j(\xi(q)+q/2)}$, де $\xi(q)$ – нелінійна функція параметра q , пов'язана з узагальненим показником Херста виразом $h(q) = \xi(q) / q - 1/2$.

Для аналізу точності оцінювання даних методів використано тестові модельні реалізації різних типів фрактальних процесів: фрактального броунівського руху (монофрактальний процес), α -стійких процесів (біфрактальний процес) та мультифрактальних детермінованих і стохастичних каскадних процесів. Для кожної згенерованої реалізації методами МФДФА, ММВП і МФДВП розраховувались характеристики $h(q)$, $\tau(q)$ і $f(\alpha)$, які потім усереднювалися за багатьма реалізаціями. Значення параметра q змінювалися в діапазоні $-5 \leq q \leq 5$, що дозволило уникнути надмірних похибок.

На рис. 6 наведено усереднені вибіркові функції $h(q)$, отримані методами МФДФА, ММВП і МФДВП для реалізацій фрактального броунівського руху (а) і мультифрактального каскаду (б) довжиною 1024 відліків.

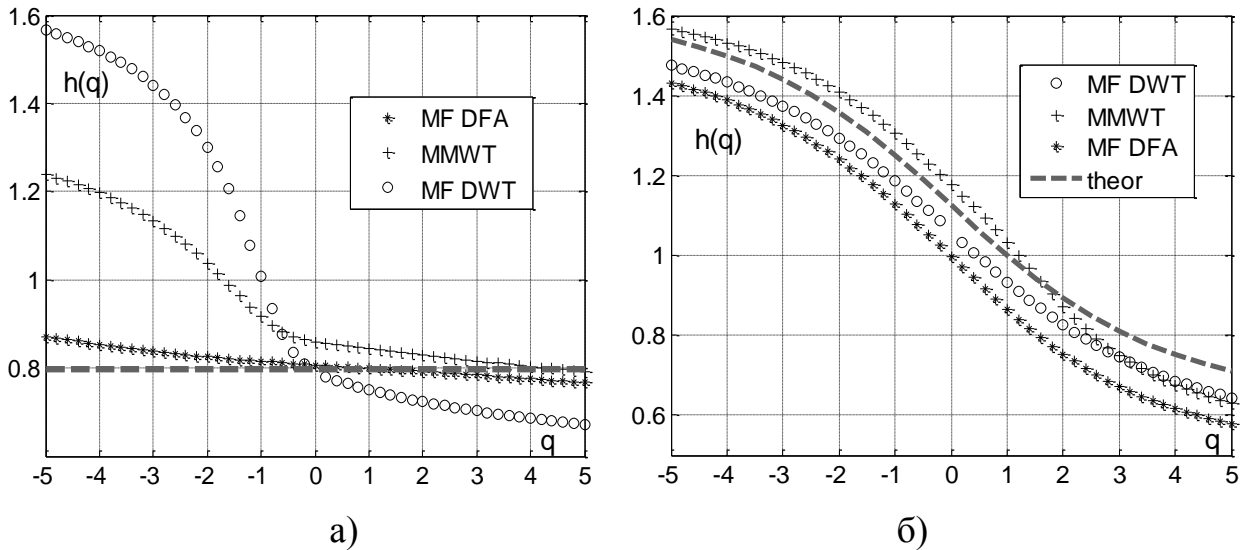


Рисунок 6 – Вибіркові функції $h(q)$ для фрактального броунівського руху, $H = 0.8$ (а); мультифрактального каскаду (б)

Для кількісного оцінювання ступеня близькості оцінних і теоретичних характеристик обчислювалось середнє відхилення функції узагальненого показника Херста:

$$\Delta h_{meth} = \frac{1}{n_q} \sum_q \left| \hat{h}_{meth}(q) - h_T(q) \right|, \quad (10)$$

де $h_T(q)$ – теоретичне значення функції узагальненого показника Херста; $\hat{h}_{meth}(q)$ – вибіркове значення функції, отримане за допомогою заданого методу оцінювання; n_q – число значень параметра q .

Оскільки методи можуть мати різні похибки для додатних і від'ємних

значень параметра q , то розглядалися окремо значення $\Delta h_{meth}(q < 0)$ і $\Delta h_{meth}(q > 0)$. Відхилення в особливій точці $q = 0$, яка вимагає спеціальних способів оцінювання, не враховувались. Окремо було виділено похибку оцінювання показника Херста у такому вигляді:

$$\Delta H_{meth} = \left| \hat{h}_{meth}(2) - h_T(2) \right|. \quad (11)$$

У розділі показано, що зміщення мультифрактальних характеристик, отриманих за короткими часовими рядами, зменшується зі збільшенням довжини ряду. Метод МФДФА має значні переваги в точності при оцінюванні характеристик процесів з дискретним мультифрактальним спектром. На рис. 7 наведено значення відхилень Δh_{meth} , розраховані відповідно до формул (10) і (11) для випадків монофрактальних (а) і мультифрактальних реалізацій (б).

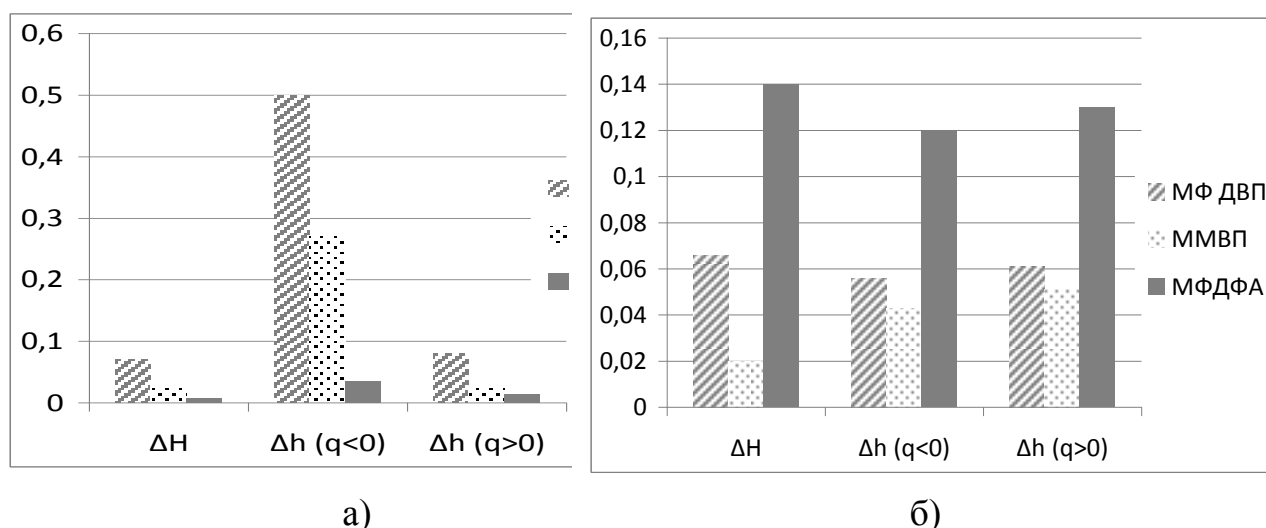


Рисунок 7 – Відхилення Δh_{meth} для монофрактальних (а) і мультифрактальних реалізацій (б)

З урахуванням результатів проведеного аналізу запропоновано метод, що дозволяє приймати або відкидати гіпотезу про наявність монофрактальних властивостей ряду. Цей метод заснований на аналізі статистичних властивостей вибірових значень узагальненого показника Херста, отриманого за допомогою МФДФА. Показано, що випадкова величина $\Delta h = h(q_1) - h(q_2)$ при $q > 0$ має нормальний розподіл $N(m_h, s_h)$, параметри якого залежать від довжини реалізації та вибраних значень величини q . Оскільки при $q = 0$ потрібні спеціальні способи оцінювання, то запропонований у роботі критерій розглядає величину $\Delta h = h(0.1) - h(5)$. Значення випадкової величини Δh можна використовувати як статистичний критерій для прийняття нульової гіпотези про монофрактальність ряду. Отримання оцінки функції $h(q)$ дозволяє обчислити спостережувану величину Δh . Гіпотеза приймається з рівнем значущості α , якщо отримане значення потрапляє в область припустимих значень $m_h(N) \pm t_\alpha s_h(N)$, де N – довжина реалізації; m_h і s_h – відповідні значення, розраховані для

монофрактального процесу; t_α – квантиль стандартного нормального розподілу.

У розділі запропоновано комплексний метод оцінювання мультифрактальних властивостей, який об'єднує процедури попереднього дослідження структури часового ряду, незміщеного оцінювання мультифрактальних характеристик та перевірку гіпотези про наявність монофрактальних властивостей часових рядів.

У п'ятому розділі розглянуто підходи щодо дослідження ймовірнісних властивостей реалізацій детермінованих хаотичних систем, які засновані на фрактальних методах обробки стохастичних даних. Проведений мультифрактальний аналіз ітерованих одновимірних дисипативних відображень виду $x_{n+1} = f(C, x_n)$, де C – біфуркаційний параметр. Для широкого класу нелінійних функцій f послідовність значень $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ є хаотичною і наближається до деякого атрактора, що має фрактальну структуру.

Дослідження показали, що для більшості хаотичних послідовностей атрактор системи має явно виражені мультифрактальні властивості, які залежать від ступеня хаотичності, що визначається значенням показника Ляпунова. Значення мультифрактального спектра для більш розвиненого хаотичного режиму зміщені вправо і мають більший діапазон, що свідчить про більш неоднорідну структуру хаотичного атрактора. Проаналізовано статистичну залежність показника Ляпунова та показника Херста для реалізацій відображень у хаотичному режимі. Результати проведеного аналізу свідчать, що оцінки цих параметрів знаходяться у сильній додатній кореляційній залежності. Дана залежність може бути виражена лінійною регресією.

Найбільш відомим із хаотичних відображень є логістичне, де $x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n)$, біфуркаційний параметр $A \in (0, 4]$, а значення $x_n \in [0, 1]$. У даному випадку вибірковий коефіцієнт кореляції між оцінками показника Херста та показника Ляпунова дорівнює $r[\hat{H}, \hat{\lambda}] \approx 0.84$, а функція лінійної регресії має вигляд $M[\hat{H} / \hat{\lambda}] = 0.57\hat{\lambda} + 0.096$. У табл. 2 наведено деякі значення біфуркаційного параметра, показника Ляпунова та відповідні значення показника Херста і мультифрактального спектра.

Таблиця 2 – Параметри хаотичного відображення

Біфуркаційний параметр A	Показник Ляпунова λ	Показник Херста H	Інтервал $(\alpha_{\min}, \alpha_{\max})$
3.57	0.009	0.101	(0; 0.05)
3.67	0.305	0.270	(0.1; 0.4)
3.70	0.371	0.307	(0.2; 0.9)
3.80	0.409	0.329	(0.2; 1.3)
3.90	0.503	0.383	(0.3; 1.5)

У шостому розділі розроблено математичні моделі випадкових процесів, які генерують реалізації з фрактальними властивостями, отриманими на основі досліджуваних часових рядів. В загальному випадку модельна реалізація $Y(t)$ може бути представлена наступним чином:

$$Y(t) = f(\text{process}, \text{parameters}, N), \text{ parameters} = g(\text{estimates}(X, N_X)),$$

де $Y(t)$, $t = 1, \dots, N$, – реалізація довжини N ; *process* – базовий фрактальний процес із дискретним часом; *parameters* – параметри цього процесу; $X(t)$ – досліджуваний часовий ряд, $t = 1, \dots, N_X$; *estimates* – статистичні характеристики, отримані за рядом $X(t)$; f , g – задані перетворення.

Запропонована в дисертації математична модель самоподібного стохастичного процесу дозволяє отримувати реалізації із заданими показником Херста та характеристикою хвоста розподілу. Ця модель здійснює експоненціальне перетворення фрактального гаусівського шуму (ФГШ):

$$Y(\tau) = b \cdot \text{Exp}[k \cdot X(\tau)], \quad (12)$$

де $X(\tau)$ – ряд значень ФГШ із заданим параметром H на інтервалі часу τ ; b , k – параметри, що регулюють вагу хвостів розподілу.

У роботі показано, що якщо $X(\tau)$ – ФГШ із параметром самоподібності H , визначений на інтервалі часу τ , то $Y(\tau) = \text{Exp}[X(\tau)]$ є самоподібним в широкому значенні процесом з тим же параметром Херста H . Оскільки $X(\tau)$ має нормальний розподіл з нульовим математичним сподіванням і дисперсією $\sigma^2(\tau)$, то процес $Y(\tau) = b \cdot \text{Exp}[k \cdot X(\tau)]$ має логарифмічно нормальний розподіл з характеристиками:

$$\begin{aligned} M[Y(\tau)] &= b \cdot \text{Exp}\left[\frac{1}{2} k^2 \sigma^2(\tau)\right], \\ D[Y(\tau)] &= b^2 \cdot \text{Exp}[k^2 \sigma^2(\tau)] \left(\text{Exp}[k^2 \sigma^2(\tau)] - 1 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Кількісною характеристикою ваги хвоста логарифмічно нормального розподілу є індекс дисперсії $F[Y] = D[Y] / M[Y]$. Виходячи з (13), параметри b і k визначаються так:

$$\begin{aligned} b &= M[Y(\tau)]^{\frac{3}{2}} (F[Y(\tau)] + M[Y(\tau)])^{-\frac{1}{2}}, \\ k &= \sigma(\tau)^{-1} \ln^{\frac{1}{2}} \left(1 + F[Y(\tau)] / M[Y(\tau)] \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Алгоритм моделювання реалізацій може бути зведений до такої процедури:

– за часовим рядом $Y(t)$ $t=1, \dots, \tau$, який має властивості самоподібності, знаходимо оцінки його характеристик: математичного сподівання \bar{Y} , індексу дисперсії \hat{F} і параметра самоподібності \hat{H} ;

– генеруємо реалізацію ФГШ $X(t)$ $t=1, \dots, \tau$ із заданим показником $H = \hat{H}$ і дисперсією $\sigma^2(\tau)$;

– за формулами (14) знаходимо значення параметрів b і k ;

– перетворенням (12) отримуємо необхідну модельну реалізацію.

У розділі удосконалено модель мультифрактального процесу на основі біноміального мультиплікативного стохастичного каскаду. Побудова стохастичного консервативного каскаду полягає в рекурсивному перерозподілі міри інтервалу на два двійчастих підінтервала пропорційно заданим ваговим коефіцієнтам, сума яких дорівнює одиниці. Як випадкову величину, що породжує вагові коефіцієнти, запропоновано використовувати величину з несиметричним

бета-розподілом $p_x(a,b) = \frac{1}{B(a,b)}(1-x)^{b-1}$, $x \in [0,1]$, де $B(a,b) = \int_0^1 x^{a-1}(1-x)^{b-1} dx$,

з параметрами $a \neq b$, що дозволяє отримати процес із заданими параметром самоподібності та мультифрактальними характеристиками (рис. 8).

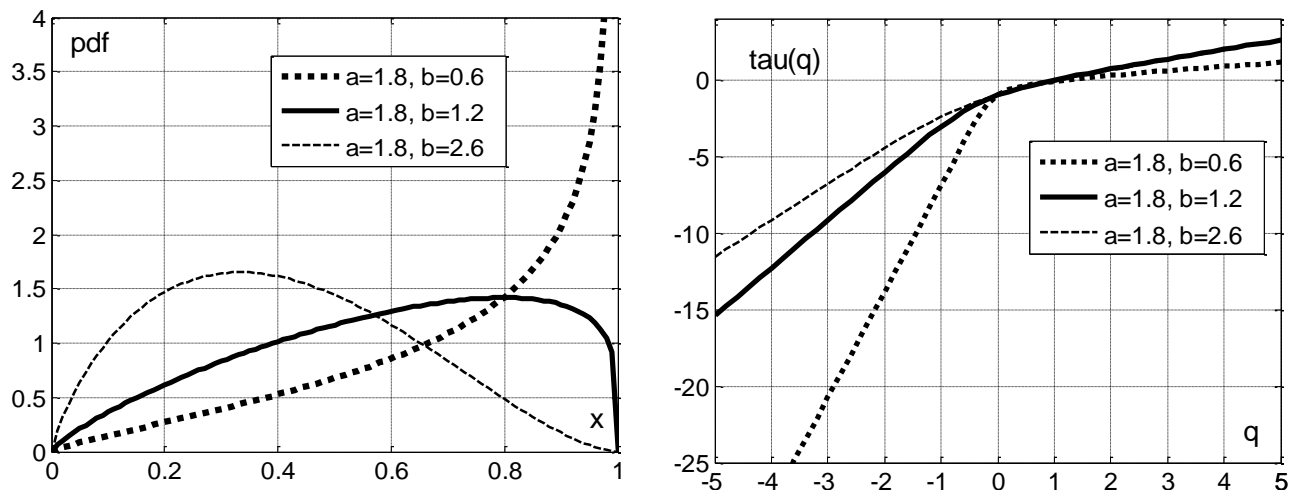


Рисунок 8 – Щільності бета-розподілів та відповідні скейлінгові експоненти

Оскільки визначення аналітичного вигляду мультифрактальних характеристик у випадку несиметричного бета-розподілу викликає значні труднощі, було проведено чисельні дослідження мультифрактальних властивостей каскадів, породжуваних бета-розподілами з різними значеннями параметрів a і b . Отримано чисельні залежності, які значенням параметра Херста H ставлять у відповідність різні функції скейлінгових експонент $\tau(q)$ і функції мультифрактального спектру $f(\alpha)$. Ці залежності дозволяють отримувати біноміальні каскади, засновані на бета-розподілі, з показником Херста $0.6 \leq H < 1$ і шириною мультифрактального спектра $1 < \Delta\alpha < 8$. Такий діапазон параметрів дозволяє моделювати досить широкий клас мультифрактальних процесів.

Алгоритм моделювання реалізацій може бути зведений до такої процедури:

– за часовим рядом $Y(t)$ $t=1, \dots, \tau$, який має мультифрактальні властивості, знаходимо оцінки його характеристик: математичного сподівання \bar{Y} , функції мультифрактального спектру $\hat{f}(\alpha)$ і параметра самоподібності \hat{H} ;

– за результатами досліджень вибираємо параметри a і b , які визначають закон бета-розподілу $p_x(a, b)$, що генерує вагові коефіцієнти мультифрактального каскаду з характеристиками $f(\alpha)$ і H ;

– за допомогою ітераційної процедури будемо реалізацію біноміального мультиплікативного каскаду $X(t)$, $i=1, 2, \dots, 2^n$, з ваговими коефіцієнтами на основі $p_x(a, b)$ необхідної довжини 2^n , де n – число ітерацій;

– отриманий ряд $X(t)$ множимо на величину $2^n \cdot \bar{Y}$.

У сьомому розділі набули подальшого розвитку віконні методи аналізу зміни кореляційної та фрактальної структури часових рядів. Для дослідження зміни фрактальної структури пропонується відстежувати послідовну зміну діапазону значень узагальненого показника Херста. Водночас необхідно зазначити, що в разі зміни фрактальних властивостей процесу не може залишатися незмінною решта статистичних характеристик. Тому, одночасно з дослідженням порушень фрактальної структури ряду доцільно аналізувати зміни спектральної структури, автокореляційної залежності та вибіркового закону розподілу.

У роботі запропоновано метод виявлення розладнання стохастичного ряду, заснований на оцінюванні відносної вейвлет-ентропії $RWE(p, q)$, яка може розраховуватися двома способами: у першому визначається частотна схожість двох послідовних ділянок сигналу, а в другому – частотна схожість ділянки сигналу й обраного базового сигналу:

$$RWE(p(i-1)|p(i)) = \sum_{j=1}^N p(i-1)_j \ln(p(i-1)_j / p(i)_j), \quad (15)$$

$$RWE(p_0|p(i)) = \sum_{j=1}^N p_0_j \ln(p_0_j / p(i)_j), \quad (16)$$

де $\{p(i)_j\}$ – спектр вейвлет-енергії i -й ділянки сигналу; $\{p_0_j\}$ – спектр вейвлет-енергії базового сигналу; N – максимальний рівень розпаду.

Показано, що оцінювання величини $RWE(p, q)$ віконним методом дозволяє відстежити появу сегментів часового ряду з різною спектральною структурою. На рис. 9 зображено модельну реалізацію, що складається з двох частин, які відповідають різним процесам авторегресії. Для визначення розладнання кореляційних властивостей реалізацію було розбито на інтервали, для кожного з яких за формулами (15) та (16) визначалася відносна вейвлет-ентропія.

У роботі запропоновано та досліджена функціональну характеристику закону розподілу неперервної випадкової величини (ВВ) з обмеженою

дисперсією. Якщо ВВ ξ подана вибіркою з генеральної сукупності, тоді характеристикою закону розподілу $F_\xi(x)$ є функція:

$$Id_\xi(n) = \frac{(M[R_\xi(n)])^2}{D[\xi]}, \quad (17)$$

де n – обсяг вибірки; $R_\xi(n)$ – ВВ, яка визначає її розмах; $M[R_\xi(n)]$ – математичне сподівання розмаху; $D[\xi]$ – дисперсія ВВ ξ .

Ця характеристика залежить лише від закону розподілу ВВ та є ідентифікатором розподілу. Оцінкою $Id_\xi(n)$ є величина

$$\hat{Id}_\xi(n) = \frac{(X_{\max}(n) - X_{\min}(n))^2}{S^2},$$

де X_{\max} і X_{\min} – максимальне та мінімальне значення вибірки; S – середнє квадратичне відхилення вибірки; n – обсяг вибірки.

Спільне використання розглянутих методів дозволяє істотно підвищити ефективність і вірогідність виявлення розладнання фрактальних властивостей досліджуваного процесу, представленого короткими часовими рядами.

У восьмому розділі дисертації наведено результати практичного застосування запропонованих моделей та методів у різних галузях досліджень. Численні дослідження процесів у телекомунікаційних мережах показали, що інформаційні потоки даних мають фрактальні властивості. Традиційний аналіз черг, в основі якого лежить припущення про пуассонівський потік, не може передбачати продуктивність системи для фрактального трафіка, тому основним інструментом дослідження і вибору оптимальних параметрів мережі стає імітаційне моделювання, для проведення якого необхідно використовувати модель вхідного навантаження.

Моделі самоподібного і мультифрактального трафіка, запропоновані в роботі, надають можливість генерувати реалізації телекомунікаційного трафіка із заданими властивостями, дослідити його вплив на завантаження мережі та розраховувати необхідні характеристики мережі (розмір буфера, пропускну

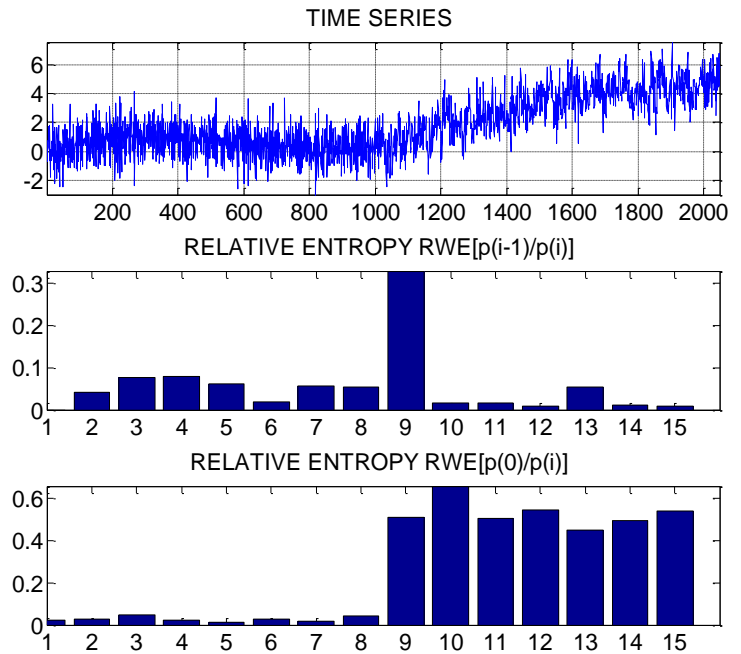


Рисунок 9 – Зверху вниз: часовий ряд;
зміна $RWE(p(i-1)|p(i))$;
зміна $RWE(p(0)|p(i))$

здатність каналів, затримки в мережі тощо). На основі проведеного аналізу черг і втрат системи розроблено алгоритм попередження перевантаження ділянки мережі. Алгоритм дозволяє для відомого значення пропускної здатності та отриманих параметрів потоку даних визначати середній розмір буферної пам'яті, необхідний для нормального проходження ділянки трафіка через комутатор, та перенаправляти потоки даних. Проведені імітаційне моделювання та реальні експерименти показали, що даний алгоритм ефективно працює при інтенсивному навантаженні в мережі.

Запропоновані моделі та методи впроваджено у Державному підприємстві «Завод ім. В. О. Малишева». У ході експерименту було виявлено найбільш критичну ділянку локальної мережі, де втрати досягають 40 – 50% від загальної кількості втрачених даних. Використання методів динамічного розподілу пропускної здатності й управління розміром буферної пам'яті, заснованих на алгоритмі попередження перевантаження, дозволило значно знизити кількість втрачених даних. При тому ж самому обсязі переданої інформації втрати під час передачі знизилися з 4.5% до 3.1%, значно зменшилися затримки і збільшилася швидкість передачі даних (табл. 3).

Таблиця 3 – Параметри локальної мережі

Параметр	Ділянка мережі	Ділянка мережі з керуванням	Вся мережа	Вся мережа з керуванням
Макс. швидкість передавання, Мбіт/с	92.46	98.65	92.2	98.71
Мін. затримка, мс	0.54	0.092	0.33	0.098
Макс. затримка, мс	1.45	0.51	1.48	0.52
Макс. значення втрат пакетів, %	4.4	3	4.5	3.1

Сучасні фінансові ринки є мультифрактальними стохастичними структурами, для яких є характерним ефект пам'яті. У роботі показано застосування розроблених методів для діагностики і прогнозування нестабільних станів (криз) ринку. Ринок залишається стабільним, доки він не прив'язаний до фіксованого масштабу часу, тобто доки він зберігає свою фрактальну структуру. Проведений в роботі фрактальний аналіз показав, що у стабільні періоди більшість рядів фінансових показників мають явно виражені мультифрактальні властивості та довгострокову залежність: узагальнений показник Херста при цьому становить $0.5 \leq h(q) \leq 3$ (при $-5 \leq q \leq 5$), а показник Херста H істотно більше 0.5. У передкризовий період ряди демонструють слабкі часові кореляції: H у цей період є близьким до 0.5, а діапазон узагальненого показника Херста значно звужується: $0.4 < h(q) < 1.6$. Результати досліджень підтверджують можливість використання мультифрактального аналізу для виявлення прихованих порушень функціонування фінансових ринків та використання зміни

мультифрактальних характеристик як індикатора кризових явищ. Запропоновані віконні методи аналізу зміни фрактальної структури фінансових показників впроваджено в ТОВ «Маркет-репорт». Результати роботи використовуються як складова частина комплексного аналізу оцінювання ризиків, моніторингу та прогнозування динаміки ринку цінних паперів і фінансових індексів.

Багато біологічних електричних сигналів мають фрактальні властивості. До них, зокрема, відносяться реалізації електроенцефалограм (ЕЕГ) і електрокардіограм (ЕКГ). У роботі досліджено ЕЕГ-сигнали лабораторних тварин, які були розбиті на фази активності та сну (повільного та швидкого). Фрактальний аналіз показав, що для фази активності є характерною довгострокова залежність ($H > 0.6$); для фази швидкого сну значення показника Херста знаходяться у діапазоні $0.5 < H < 0.55$; стан повільного сну характеризується антиперсистентністю, для якої $0.35 < H < 0.5$. Оцінювання параметра H дозволяє, з використанням ковзаючих вікон енцефалограм, визначати моменти переходу від фази сну до фази активності.

Одним з методів діагностики серцевих захворювань є аналіз рядів RR-інтервалів, які є проміжком часу між сусідніми зубцями ЕКГ. У роботі проведено фрактальний аналіз RR-інтервалів пацієнтів, що мають серцеву аритмію, до і після прийому медичного препарату. Дослідження показали, що застосування препарату викликає зміну мультифрактальних характеристик послідовності RR-інтервалів. Мультифрактальний спектр $f(\alpha)$, типовий для послідовностей RR-інтервалів здорової людини, знаходиться в межах $0.9 < \alpha < 1.7$ (рис.10 (а)). Мультифрактальний аналіз послідовностей RR-інтервалів пацієнтів, які страждають на тахікардію, показав, що в цьому випадку типовий діапазон значень $f(\alpha)$ знаходиться в межах $0.2 < \alpha < 1.5$ (рис. 10(б)). Практично для усіх тестованих пацієнтів після застосування препарату спектр $f(\alpha)$ зміщується до характеристик здорової людини.

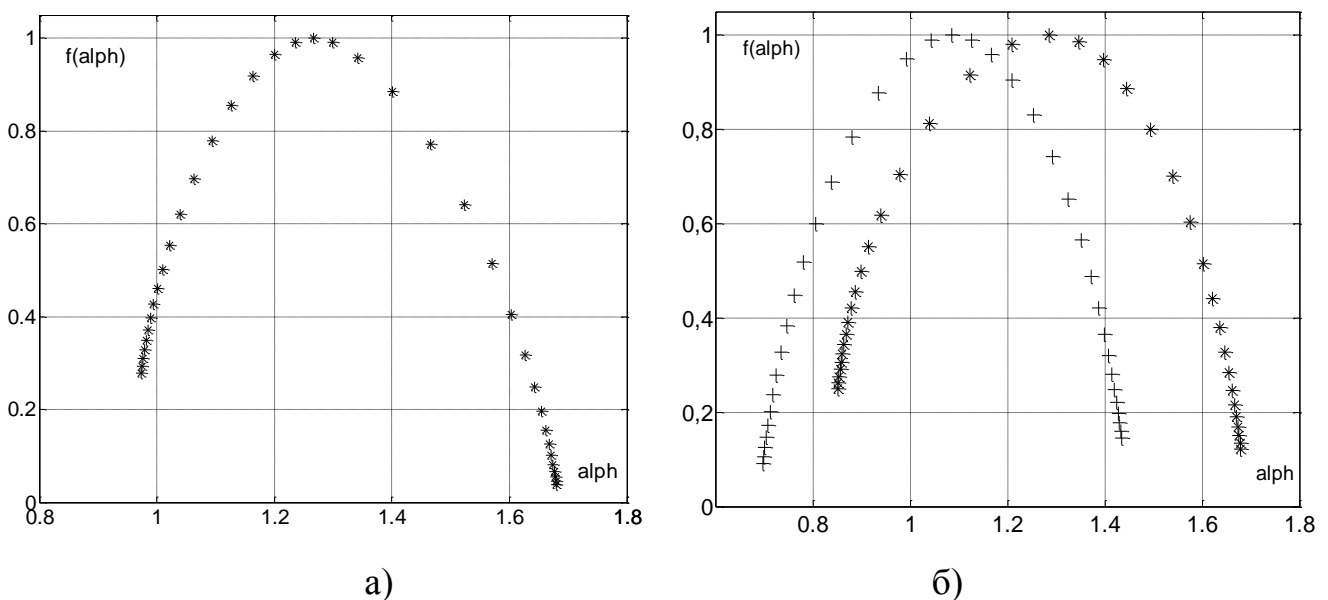


Рисунок 10 – а) спектр $f(\alpha)$ RR-інтервалів здорової людини;

б) спектр $f(\alpha)$ пацієнта до застосування препарату (+) і після застосування (*)

Ці результати показують, що мультифрактальні методи можуть бути використані для визначення функціональних змін у роботі серця. Результати досліджень мультифрактальних властивостей біомедичних сигналів впроваджено у Харківському обласному клінічному онкологічному центрі для обробки статистичних досліджень, пов'язаних з аналізом характерних особливостей онкопатології.

У роботі також проведено дослідження властивостей деяких сигналів, що відповідають природним явищам, і вперше встановлено їх фрактальну структуру. Зокрема, мультифрактальний аналіз ехограм акустичного зондування для сигналів, отриманих на різних висотах зонду, показав, що зі збільшенням висоти змінюється кореляційна структура процесів та зменшуються значення узагальненого показника Херста $h(q)$. Проведено аналіз вимірювань кутів відхилення надлегких крутильних терезів, що реагують на сонячну активність. Фрактальний аналіз виявив наявність явно виражених мультифрактальних властивостей, які змінюються в залежності від сезону. Дослідження рядів щоденної температури за 50 років показали, що на інтервалах від двох місяців до півроку вони є антиперсистентними, а від півроку до півтора років мають сильну довгострокову залежність. В обох випадках ряди мають слабо виражені мультифрактальні властивості.

Крім того в розділі було ще розглянуто деякі інші практичні застосування запропонованих методів і моделей, а саме: виконано прогнозування ринкового ризику на основі моделей з авторегресійною умовною гетероскедастичністю, які враховують важкі хвости розподілів логарифмічних доходностей фінансових рядів; виконано аналіз зміни частотної структури ЕЕГ людини після дії стимулу за допомогою методів, заснованих на дискретному вейвлет-перетворенні, і розглянуто визначення часу реакції на зовнішні впливи, засноване на застосуванні вейвлет-ентропії; запропоновано практичні рекомендації щодо ідентифікації розумових процесів, зафіксованих на певних ділянках ЕЕГ сигналу.

ВИСНОВКИ

Результатом дослідження є розвиток теорії фрактального аналізу та вирішення на цій основі важливої науково-технічної проблеми – підвищення ефективності оцінювання параметрів самоподібних і мультифрактальних стохастичних процесів за часовими рядами малої довжини шляхом розробки сукупності взаємопов'язаних методів аналізу їх фрактальних та кореляційних властивостей. Розроблені методи передбачають попереднє дослідження структури часового ряду, незміщене інтервальне оцінювання параметра самоподібності та спільне використання декількох методів фрактального аналізу, що дозволяє підвищити достовірність отримуваних оцінок. Проведені дослідження дозволяють зробити такі основні висновки.

1. Проведено порівняльний аналіз статистичних характеристик оцінок показника Херста, отриманих найбільш затребуваними на практиці методами оцінювання. Результати дослідження показали, що оцінки є зміщеними. Для кожного методу зміщення залежить від істинного значення ступеня

самоподібності процесу і довжини часового ряду. Оцінки мають нормальний розподіл і можуть бути представлені довірчим інтервалом значень, характеристики якого враховують довжину досліджуваного часового ряду і метод оцінювання. Мінімальні зміщення і середні квадратичні відхилення мають оцінки, які отримані методом, заснованому на дискретному вейвлет-перетворенні.

2. Досліджено статистичні характеристики вейвлет-оцінок показника Херста. Отримано залежності характеристик оцінок від довжини часового ряду і обраної вейвлет-функції. Найменші зміщення і середнє квадратичне відхилення мають оцінки, отримані за допомогою вейвлет-функції Добеші 4. Вейвлет-оцінки мають нормальний розподіл і можуть бути представлені довірчим інтервалом значень, характеристики якого враховують довжину досліджуваного часового ряду і тип материнської вейвлет-функції.

3. Чисельний аналіз кореляційної залежності між вейвлет-оцінками параметра Херста показав, що оцінки показника Херста, отримані за допомогою різних вейвлет-функцій, мають слабку кореляційну залежність. Таким чином, для збільшення точності оцінювання можна використовувати середнє арифметичне оцінок, отриманих за допомогою різних материнських вейвлет-функцій.

4. Набули подальшого розвитку методи досліджень часових рядів, проведення яких є доцільним перед подальшим здійсненням фрактального аналізу, що полягають у перевірці гіпотези про наявність самоподібності, визначенні інтервалів різних скейлінгів, а також у виявленні та видаленні короткострокових залежностей.

5. Досліджено вплив трендових і циклічних складових на властивості оцінок показника Херста в залежності від характеру трендової компоненти та параметрів материнських вейвлет-функцій. Визначено діапазон співвідношення трендової компоненти та фрактального шуму, для якого є коректним оцінювання показника Херста. Запропоновано метод вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів зі значними трендовими та циклічними складовими, заснований на аналізі компонент спектра вейвлет-енергії і виділенні діапазонів частот трендової та циклічної компонент ряду. Запропоновано метод оцінювання показника Херста, заснований на використанні пакетного вейвлет-перетворення. Застосування розробленого методу дозволяє визначати ступінь самоподібності для коротких рядів, що мають суттєві трендові та циклічні компоненти.

6. Проведено тестування методів мультифрактального аналізу, побудованих на основі детрендованого флуктуаційного аналізу, максимумів модулів неперервного вейвлет-перетворення та дискретного вейвлет-перетворення на реалізаціях мультифрактальних процесів різних типів. Показано, що мультифрактальні характеристики (узагальнений показник Херста, скейлінгова експонента, функція мультифрактального спектра), отримані за часовими рядами, мають зміщення, яке зменшується зі збільшенням довжини ряду.

7. Розроблено метод, що дозволяє приймати або відкидати гіпотезу про наявність монофрактальних властивостей ряду на основі дослідження вибірових значень узагальненого показника Херста, отриманих методом мультифрактального детрендованого флуктуаційного аналізу.

8. Досліджено кореляційну залежність показника Ляпунова та показника Херста для хаотичних відображень. Відповідний аналіз свідчить, що вона може бути виражена лінійною регресією. Показано, що для більшості хаотичних послідовностей атрактор системи має явно виражені мультифрактальні властивості, які залежать від ступеня хаотичності, що визначається значенням показника Ляпунова.

9. Запропоновано математичну модель самоподібного стохастичного процесу, який є експоненціальним перетворенням фрактального гаусівського шуму, що дозволяє отримати самоподібний у широкому значенні процес із заданими параметром самоподібності та характеристикою хвоста розподілу.

10. Удосконалено модель мультифрактального процесу на основі біноміального мультиплікативного стохастичного каскаду з несиметричним бета-розподілом вагових коефіцієнтів, яка дозволяє отримати мультифрактальний процес із заданими параметром самоподібності та функцією мультифрактального спектра.

11. Показано, що оцінювання вейвлет-ентропії та відносної вейвлет-ентропії дозволяє виявити розладнання кореляційних властивостей нестационарного стохастичного часового ряду, а побудова оптимального пакетного вейвлет-дерева дає можливість виявлення характерних особливостей спектральної структури нестационарних сигналів.

12. На основі розроблених методів досліджено реалізації телекомунікаційного трафіка та виявлено їх фрактальну структуру. Із застосуванням розроблених моделей запропоновано алгоритм запобігання перевантаження в телекомунікаційній мережі, який дозволяє для відомого значення пропускної здатності та отриманих параметрів потоку даних визначати середній розмір буферної пам'яті, необхідний для нормального проходження ділянки трафіка через комутатор, та перенаправляти потоки даних. Результати досліджень впроваджено у Державному підприємстві «Завод ім. В. О. Малишева», що дозволило збільшити на 5–10% швидкість передачі даних за рахунок перерозподілу критичних інформаційних потоків на менш завантажені канали та зменшити втрати даних на 15–20%.

13. Із застосуванням розроблених у роботі методів досліджено часові ряди щоденних значень фінансових показників різних типів (курсів валюти, фінансових індексів, вартості акцій компаній тощо) та доведено їх мультифрактальні властивості. Показано, що ці властивості для фінансових часових рядів у передкризовий період та період спаду кризи істотно відрізняються. Застосування віконних методів аналізу фрактальної структури дозволяє виявити зміну мультифрактальних характеристик, які є індикаторами кризового стану фінансового ринку. Запропоновані віконні методи аналізу мультифрактальної структури та комплексну методику оцінки фрактальних характеристик часових рядів впроваджено в ТОВ «Маркет-репорт».

14. На основі розроблених віконних методів оцінювання відносної вейвлет-ентропії проведено аналіз зміни частотної структури електроенцефалограм з викликаними потенціалами після впливу стимулу та запропоновано практичні рекомендації щодо визначення часу реакції на зовнішній збудник.

15. Здійснено аналіз мультифрактальних властивостей електрокардіограм, внаслідок якого виявлено суттєву відмінність мультифрактальних спектрів для здорових людей і пацієнтів, що мають серцеву аритмію. Крім того, результати дослідження кардіограм пацієнтів, отриманих після прийняття медичного препарату, свідчать про зміну функції мультифрактального спектра в сторону спектра здорової людини. Таким чином, мультифрактальний аналіз електрокардіологічних сигналів може бути використаний для визначення функціональних змін у діяльності серця. Результати досліджень впроваджено у Харківському обласному клінічному онкологічному центрі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кириченко Л. О. О детерминированном подходе к моделированию случайного блуждания / Л. О. Кириченко, Л. В. Стрижак // Радиоэлектроника и Информатика. – 2002. – №4. – С. 82–84.

2. Кириченко Л. О. Об одном методе идентификации закона распределения случайной величины / Л. О. Кириченко, А. В. Шкловец // Системи обробки інформації. – 2005. – Вип. 4(44). – С. 197–201.

3. Кириченко Л. О. Сравнительный анализ методов оценки параметра Херста самоподобных процессов / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, М.И. Синельникова // Системи обробки інформації. – 2005. – Вип. 8(48). – С.36–40.

4. Кириченко Л. О. Исследование долгосрочной зависимости сетевого трафика методом R/S-анализа / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2006. – Вып. 135. – С. 51–55.

5. Кириченко Л. О. Исследование влияния самоподобия трафика при проектировании фрагмента сети / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2007. – № 1–2. – С. 124–129.

6. Кириченко Л. О. Алгоритм предупреждения перегрузки компьютерной сети путем прогнозирования средней длины очереди / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, А. В. Стороженко // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2007. – № 3(15). – С. 94–97.

7. Kirichenko L. Analysis of network performance under selfsimilar system loading by computer simulation / L. Kirichenko, T. Radivilova // Бионика интеллекта. – 2008. – №1 (68). – С. 158–160.

8. Карпухин А. В. Самоподобие в информационных системах / А. В. Карпухин, Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7. – № 1. – С. 54–64.

9. Кириченко Л. О. Об одном методе идентификации закона выборочного распределения / Л. О. Кириченко, А. В. Шкловец, Д. А. Поляков, Е. А. Боковиков // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2008. – Вип. 2(17). – С. 88–91.

10. Кириченко Л. О. Сравнительный анализ генерации псевдослучайных чисел в современных технологиях беспроводной передачи данных /

Л. О. Кириченко, Р. И. Цехмистро, О. Я. Круг, А. В. Стороженко // Системи обробки інформації. – 2009. – Вип. 4 (78). – С.70–74.

11. Кириченко Л. О. Определение структурной близости участков ЭЭГ сигнала для распознавания умственных задач, выполняемых человеком / Л.О. Кириченко, С.С. Кротких // Бионика интеллекта. – 2009. – №2(71). – С. 111–117.

12. Кириченко Л. О. Оценивание самоподобия стохастического временного ряда методом вейвлет-анализа / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 4 (38). – С. 99–105.

13. Dabi-Prashad O. Investigation of Time Series of Original Values of Currency Rates Measured on Small Time Frames on FOREX Using Methods of Chaos Theory / O. Dabi-Prashad, L. Kirichenko // Radioelectronics & Informatics. – 2009. – №4. – P. 18–24.

14. Дейнеко Ж. В. Об одном методе моделирования самоподобного стохастического процесса / Ж. В. Дейнеко, А. А. Замула, Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Сер. Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2010. – № 890. – Вип. 13. – С. 53–63.

15. Кириченко Л. О. Сравнительный анализ статистических свойств оценок показателя Херста / Л. О. Кириченко // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: інформатика і моделювання. – 2010. – №21. – С. 88–95.

16. Кіріченко Л. О. Порівняльний аналіз алгоритмів роботи TCP-протоколу при самоподібному трафіку у вузькому місці мережі / Л. О. Кіріченко, Т. А. Радівілова, А. В. Карпухин // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2010. – №672. – С. 237–243.

17. Кириченко Л. О. Исследование нелинейной динамики изменения окна перегрузки TCP протокола / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, А. В. Карпухин, А. В. Борисов, Э. Кайали // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №5. – С. 281–286.

18. Кириченко Л. О. Исследование работы протоколов семейства TCP при критических режимах функционирования сети / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, А. В. Карпухин // Радиотехника. – 2010. – №162. – С. 123–130.

19. Дейнеко Ж. В. Дослідження фрактальних властивостей рядів виробництва та споживання електроенергії в Україні / Ж. В. Дейнеко, В. В. Кирій, Л. О. Кіріченко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – № 5 (73). – С. 41–47.

20. Кириченко Л. О. Мультифрактальный анализ нестабильных финансовых рядов / Л. О. Кириченко, О. А. Кузьмина, С. Г. Удовенко // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 6 (87). – С. 194–198.

21. Кириченко Л. О. Сравнительный анализ прогнозирования рыночного риска финансовых рядов на основе моделей с авторегрессионной условной гетероскедастичностью / Л. О. Кириченко, Н. М. Рвачёва, А. В. Стороженко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2010. – Вып. 135. – С. 51–55.

22. Кириченко Л. О. Влияние методов маршрутизации на качество обслуживания в мультисервисных сетях при самоподобной нагрузке / Л. О. Кириченко,

Т. А. Радивилова, Э. Кайали // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 1/2 (49). – С. 15–18.

23. Дейнеко Ж. В. Оценивание параметра Херста для временных рядов с трендом методом вейвлет-преобразования / Ж. В. Дейнеко, Л. О. Кириченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – Вип. 4 (16). – С. 85–89.

24. Кириченко Л. О. Анализ методов повышения QOs в сетях MPLS с учетом самоподобия трафика / Л. О. Кириченко, Э. Кайали, Т. А. Радивилова // Системні технології. – 2011. – Вип. 3. – С. 52–59.

25. Кириченко Л. О. Исследование вызванных потенциалов в ЭЭГ человека с помощью дискретного вейвлет-преобразования / Л. О. Кириченко, С. С. Кротких // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – №2. – С.86–93.

26. Кириченко Л. О. Анализ самоподобных и мультифрактальных свойств временных рядов, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Радиоелектроніка і інформатика. – 2011. – № 3. – С. 69–74.

27. Кириченко Л. О. Анализ спектральной структуры сигналов с применением пакетного вейвлет-преобразования / Л. О. Кириченко, С. С. Кротких, К. С. Крыгин, С. Г. Удовенко // Системні технології. – 2012. – Вип. 3 (80) – С. 32–39.

28. Кириченко Л. О. Исследование выборочных характеристик, полученных методом мультифрактального флуктуационного анализа / Л. О. Кириченко // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: зб. наук. пр. – 2011. – № 54. – С.101–111.

29. Кириченко Л. О. Сравнительный мультифрактальный анализ временных рядов методами детрендрованного флуктуационного анализа и максимумов модулей вейвлет-преобразования / Л. О. Кириченко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2011. – Вып. 157. – С.66–77.

30. Кириченко Л. О. Вейвлет-оценивание показателя Херста по временным рядам со значительными циклическими компонентами с применением пакетного вейвлет-преобразования / Л. О. Кириченко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Вып. 158. – С.4–8.

31. Кириченко Л. О. Моделирование телекоммуникационного трафика с использованием стохастических мультифрактальных каскадных процессов / Л. О. Кириченко, К. А. Демерчян, Э. Кайали, А. Ю. Хабачёва // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2012. – №1 (26). – С.48–53.

32. Kirichenko L.O. Analysis of multifractal properties of chaotic maps / L.O. Kirichenko, N.V. Ostroverkh, A.V. Timko // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №3/9 (57). – С. 53–58.

33. Кириченко Л. О. Исследование влияния возмущений на динамику макроэкономической модели роста / Л. О. Кириченко, О. И. Синельникова // Новое в экономической кибернетике. – 2005. – №1. – С. 9–13.

34. Kirichenko L. Comparative analysis of statistical properties of the Hurst exponent estimates obtained by different methods / L. Kirichenko, T. Radivilova // Information Models of Knowledge / ed. K. Markov, V. Velychko, O. Voloshin. – Kiev–Sofia: ITNEA. – 2010. – P. 451–459.

35. Kirichenko L. Comparative analysis of pseudorandom number generation in the up-to-date wireless data communication / L. Kirichenko, R. Tsekhmistro, O. Krug, A. Storozhenko // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2011. – № 70 (4). – P. 325-333.

36. Kirichenko L. Comparative Analysis for Estimating of the Hurst Exponent for Stationary and Nonstationary Time Series / L. Kirichenko, T. Radivilova, Zh. Deineko // *Information Technologies & Knowledge*. – 2011. – Vol.5. – № 4. – P. 371–388.

37. Кириченко Л. О. Генерация псевдослучайных чисел с помощью детерминированного хаотического отображения / Л. О. Кириченко, О. Л. Гавриш // *Второй Междунар. радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития»*: сб. научн. трудов. – 2005. –Т.3. – С. 298–300.

38. Кириченко Л. О. Исследование распределений последовательностей псевдослучайных чисел, полученных с помощью хаотических отображений. / Л. О. Кириченко, О. Л. Гавриш // *Дні науки: «Системний аналіз і управління»*: наук.-практ. конф., 27-28 жовтня 2005 р.: зб. тез доповідей. – Запоріжжя, 2005. – Т.1. – С. 298–299.

39. Kirichenko L. Identification of continuous variable distribution by means of numeric characteristic / L. Kirichenko, A. Shklovets // *«Сучасна стохастика: теорія і застосування»*: міжнар. конф. 19-23 червня 2006 р.: матеріали конф. – Київ, 2006. – С. 161.

40. Кириченко Л. О. Выявление долгосрочной и краткосрочной зависимости временных рядов путем R/S – анализа / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // *Дні науки: «Системний аналіз і управління»*: наук.-практ. конф., 5-6 жовт. 2006 р.: зб. тез доповідей. – Запоріжжя, 2006. – Т. 3. – С. 29–31.

41. Кириченко Л. О. Моделирование прохождения самоподобного сетевого трафика через канал связи / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // *Современные информационные и электронные технологии: 8-я междунар. науч.-практич. конф.*, 21-25 мая 2007 г.: труды конф. – Одесса, 2007. – С. 121.

42. Кириченко Л. О. Управление параметрами сети на основе мониторинга входной нагрузки / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // *Сучасні інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку*: 2-а міжнар. наукова конф., 2-5 жовт. 2007 р.: матеріали конф. – Харків-Туапсе, 2007. – С. 89–90.

43. Кіриченко Л. О. Управління параметрами мережі на основі моніторингу вхідного навантаження / Л. О. Кіриченко, Т. А. Радівілова, О. О. Стрілець, Є. С. Івлєв // *Комп'ютерні науки та інформаційні технології «CSIT-2007»*: міжнар. наук.-техн. конф., 27–29 верес. 2007 р.: матеріали конф. – Львів, 2007. – С. 206–209.

44. Карпухин А. В. Исследование продуктивности сети и возникновения перегрузки при самоподобной нагрузке с помощью OPNET Modeler / А. В. Карпухин, Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // *Современные информационные и электронные технологии: 9-я междунар. науч.-практич. конф.*, 19-23 мая 2008 г.: труды конф. – Одеса, 2008. – С. 102.

45. Kirichenko L. Improvement quality of network service under selfsimilar loading / L. Kirichenko, T. Radivilova, A. Karpukhin // *Стратегия качества в*

промышленности и образовании: 4-я междунар. конф., 30 мая–6 июня, 2008 г.: материалы конф. – Варна, 2008. – С. 612–615.

46. Карпукін А. В. Математичне моделювання самоподібного мережевого трафіку із заданими параметрами / А. В. Карпукін, Л. О. Кіріченко, Т. А. Радівілова, Л. Е. Чала // Комп'ютерні науки та інформаційні технології «CSIT-2008»: 3-я міжнар. наук.-техн. конф., 25–27 верес. 2008 р.: матеріали конф. – Львів, 2008. – С. 220–224.

47. Кириченко Л. О. Сравнительный анализ методов моделирования самоподобного сетевого трафика / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Современные информационные и электронные технологии: 10-я междунар. науч.-практич. конф., 18-22 мая 2009 г.: труды конф. – Одесса, 2009. – Т.1. – С. 131.

48. Кириченко Л. О. Определение участков стационарности в ЭЭГ-сигнале для распознавания умственных задач, выполняемых человеком / Л. О. Кириченко, С. С. Кротких // Современные информационные и электронные технологии: 10-я междунар. науч.-практич. конф., 18-22 мая 2009 г.: труды конф. – Одесса, 2009. – Т.2. – С. 182.

49. Кириченко Л. О. Применение фрактального анализа для обнаружения разладки временного ряда / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Компьютерные науки и технологии: первая Междунар. науч.-техн. конф., 8-10 окт. 2009 г.: сб. трудов. – Белгород, 2009. – Ч.2. – С. 160–163.

50. Кіріченко Л. О. Статистичні характеристики оцінок показника Херста, отриманих різними методами / Л. О. Кіріченко, Т. А. Радівілова, Ж. В. Дейнеко // Комп'ютерні науки та інформаційні технології (CSIT-2009): 4-а міжнар. наук.-техн. конф., 15–17 жовт. 2009 р.: матеріали конф. – Львів, 2009. – С. 85–87.

51. Дейнеко Ж. В. Использование методов корреляционного анализа при оценивании показателя Херста с помощью вейвлетов / Ж. В. Дейнеко, Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2010): всеукр. наук.-практ. конф., 4–5 берез. 2010 р.: зб. тез доповідей. – Запоріжжя, 2010. – С. 57–58.

52. Кириченко Л. О. Анализ функционирования протоколов маршрутизации при передаче самоподобного трафика / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // Современные информационные и электронные технологии: 10-я междунар. науч.-практич. конф., 24-28 мая 2010 г.: труды конф. – Одесса, 2010. – Т.1. – С.141.

53. Кириченко Л. О. Моделирование физических процессов на основе фрактального броуновского движения / Л. О. Кириченко, А. А. Замула, Т. А. Радивилова, Ж. В. Дейнеко // Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях (КМНТ-2010): науч.-техн. конф., 18–21 мая 2010 г.: труды конф. – Харьков, 2010. – С. 170–172.

54. Кириченко Л. О. Фрактальный анализ временных рядов с трендовой и периодической составляющей / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко, В. В. Кирий, А. В. Стороженко // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2010): міжнар. наук. конф., 17–21 трав. 2010 р.: матеріали конф. – Євпаторія, 2010. – Т. 2. – С. 383–386.

55. Кириченко Л. О. Фрактальный анализ электроэнцефалограмм для состояний бодрствования и сна / Л. О. Кириченко, Н. А. Гранкина, О. А. Кузьмина, М. В. Разина // Интеллектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2010): міжнар. наук. конф., 17–21 трав. 2010 р.: матеріали конф. – Євпаторія, 2010. – Т. 2. – С. 381–383.

56. Kirichenko L. O. Application of DFA Method in Fractal Analysis of Time Series of Different Nature / L. O. Kirichenko, Zh. V. Deineko, T. A. Radivilova // Modern Stochastics: Theory and Applications II: International Conference, September 7–11 2010: proc. of conf. – Kyiv, 2010. – P. 9–10.

57. Кириченко Л. О. Сравнительный анализ методов маршрутизации IGRP, EIGRP, OSPF при входном самоподобном трафике / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // Автоматика – 2010 : 17-а міжнар. конф. з автомат. упр., 27–29 вересня 2010 р.: тези доп. – Харків, 2010. – Т. 2. – С. 231–232.

58. Кириченко Л. О. Выявление разладки фрактальных временных рядов с использованием методов вейвлет-анализа / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Автоматика – 2010: 17-а міжнар. конф. з автомат. упр., 27–29 вересня 2010 р.: тези доп. – Харків, 2010. – Т. 2. – С. 235–236.

59. Кириченко Л. О. Вейвлет-оценивание показателя Херста нестационарных временных рядов / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: V-та міжнар. наук.-практ. конф., 22–24 верес. 2010 р.: тези доп. – Запоріжжя, 2010. – С. 173–174.

60. Кіріченко Л. О. Про один підхід до прогнозування кризової ситуації за допомогою мультифрактального аналізу / Л. О. Кіріченко, Т. А. Радівілова // Теорія прийняття рішень: V-та міжнар. школа-семінар, 27 верес. – 1 жовт. 2010 р.: праці. – Ужгород, 2010. – С. 111–112.

61. Дейнеко Ж. В. Сравнительный анализ вейвлет-декомпозиции нестационарных временных рядов с различной корреляционной структурой / Ж. В. Дейнеко, Л. О. Кириченко // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2011) : II-га всеукр. наук.-практ. конф., 10–11 берез. 2011 р.: тези доп. – Запоріжжя, 2011. – С. 73.

62. Кириченко Л. О. Выбор параметров вейвлет-функции для оценивания скейлинга нестационарных временных рядов / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Современные проблемы математики и ее приложения в естественных науках и информационных технологиях: междунар. конф., посвящ. 50-летию мех.-мат. фак. Харьк. ун-та, 17–22 апр. 2011 г.: тез. докл. – Харьков, 2011. – С. 175–176.

63. Кириченко Л. О. Управление самоподобным трафиком и ресурсами сети в MPLS / Л. О. Кириченко, Э. Кайали, Т. А. Радивилова, Л. Э. Чалая // Современные информационные и электронные технологии: 11-я междунар. науч.-практич. конф., 23-27 мая 2011 г.: труды конф. – Одесса, 2011. – С. 132.

64. Кириченко Л. О. Применение вейвлет анализа для исследования вызванных потенциалов в ЭЭГ человека / Л. О. Кириченко, С. С. Кротких // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): 1-а міжнар. наук.-техн. конф., 10-13 трав. 2011 р.: матеріали конф. – Черкаси, 2011. – С. 196–197.

65. Кириченко Л. О. Анализ мультифрактальных и корреляционных свойств временных реализаций одномерных хаотических отображений / Л. О. Кириченко, Н. А. Гранкина, М. В. Разина // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2011): міжнар. наук. конф., 16–20 трав. 2011 р.: матеріали конф. – Євпаторія, 2011. – Т.1. – С. 257–260.

66. Кириченко Л. О. Исследование мультифрактальных свойств финансовых рядов для прогнозирования нестабильных состояний рынка / Л. О. Кириченко, В. В. Кирий, А. В. Стороженко // Комп'ютерне моделювання та інформаційні системи в економіці, науці і освіті: VIII-та всеукр. наук.-прак. конф., 25–27 трав. 2011: зб. праць. – Одеса-Черкаси, 2011. – С. 83–84.

67. Кіріченко Л. О. Дослідження впливу мультифрактальних властивостей трафіка на якість обслуговування у мережі MPLS / Л. О. Кіріченко, Э. Кайали, Т. А. Радівілова // Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application (ACSN-2011): 5-th Internat. Conf., Septem. 29 – Octob. 1 2011: proc. of conf. – Lviv, 2011. – С. 75–76.

68. Кириченко Л. О. Использование вейвлет-энтропии для анализа информационных потоков данных / Л. О. Кириченко, С. С. Кротких // Проблемы и потенциал академической мобильности: пути к международной и междисциплинарной кооперации: междунар. конф., 28-30 ноябр. 2011 г.: тезисы докладов. – Алматы, 2011. – С. 80–82.

69. Кириченко Л. О. Моделирование мультифрактального телекоммуникационного трафика / Л. О. Кириченко, Э. Кайали, Т. А. Радивилова // Математичне моделювання та інформаційні технології (ММІТ-2011): Десята всеукр. наук.–техн. конф., 23-25 листоп. 2011 р.: зб. тез. – Одеса, 2011. – С. 94–95.

70. Кириченко Л. О. Метод мультифрактального анализа, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании / Л. О. Кириченко, Н. В. Островерх, А. В. Тимко // Математичне моделювання та інформаційні технології (ММІТ-2011): Десята всеукр. наук.–техн. конф., 23-25 листоп. 2011 р.: зб. тез. – Одеса, 2011. – С.54–55.

71. Кириченко Л. О. Применение дискретного вейвлет-преобразования для анализа мультифрактальных информационных процессов / Л. О. Кириченко, Ж. В. Дейнеко // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: II-га міжнар. наук.-техн. конф., 15–16 груд. 2011 р.: матеріали конф. – Київ – Харків, 2011. – С. 48.

72. Кириченко Л. О. Сравнительный анализ выборочного оценивания параметров устойчивых случайных величин / Л. О. Кириченко, Д. Г. Мережкин, В. И. Соболев // Інформатика та системні науки (ІСН-2012): III-тя всеукр. наук.-практ. конф., 1-3 берез. 2012 р.: матеріали конф. – Полтава, 2012. – С. 132–135.

73. Кириченко Л. О. Анализ мультифрактальных свойств хаотических отображений на основе вейвлет-анализа / Л. О. Кириченко, Н. В. Островерх, А. В. Тимко // Інформатика та системні науки (ІСН-2012): III-тя всеукр. наук.-практ. конф., 1-3 берез. 2012 р.: матеріали конф. – Полтава, 2012. – С. 136–139.

74. Кириченко Л. О. Применение модифицированного пакетного вейвлет-преобразования для анализа нестационарных сигналов / Л. О. Кириченко,

С. С. Кротких // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): III-я міжнародн. наук.-практ. конф., 14–16 берез. 2012 р.: тези доп. – Запоріжжя, 2012. – С. 167–168.

75. Хабачова А. Ю. Застосування мультиплікативних стохастичних каскадів для моделювання телекомунікаційного трафіку / А. Ю. Хабачова, А. А. Улакаєв, Э. Кайали, Л. О. Кіриченко // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: Х-та ювілейн. наук. конф., 19–20 квіт. 2012 р.: зб. тез. – Київ, 2012. – С. 65-66.

76. Кириченко Л. О. Моделирование и анализ характеристик стохастических мультифрактальных каскадных процессов / Л. О. Кириченко, К. А. Демерчян, Э. Кайали, А. Ю. Хабачёва // Інформаційні технології в освіті, науці і техніці (ІТОНТ-2012): Міжнар. наук.-практ. конф., 25–27 квіт. 2012 р.: тези доп. – Черкаси, 2012. – Т. 1. – С. 163–164.

77. Кириченко Л. О. Моделирование финансовых рядов с помощью фрактального движения Леви / Л. О. Кириченко, В. В. Кирий, А. В. Стороженко // Інформаційні технології та моделювання в економіці: III-тя міжнар. наук.-практ. конф., 23–25 квіт. 2012 р.: зб. наук. праць. – Черкаси, 2012. – С. 117–118.

АНОТАЦІЯ

Кіриченко Л.О. Моделі та методи оцінювання параметрів самоподібних і мультифрактальних стохастичних процесів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Харків, 2013.

Результатом дослідження є розвиток теорії фрактального аналізу та вирішення на цій основі важливої науково-технічної проблеми – підвищення ефективності оцінювання параметрів самоподібних і мультифрактальних стохастичних процесів за нестационарними часовими рядами малої довжини. Розроблені методи передбачають попереднє дослідження структури часового ряду, незміщене інтервальне оцінювання параметра самоподібності та спільне використання декількох методів фрактального аналізу, що дозволяє підвищити достовірність отриманих оцінок.

Запропоновано математичні моделі самоподібного та мультифрактального стохастичних процесів, які дозволяють отримати процес із заданими фрактальними властивостями. Отримали розвиток віконні методи аналізу зміни кореляційної та фрактальної структури часових рядів за кількома критеріями. Результати досліджень використані для розробки і впровадження систем аналізу, моніторингу, діагностики та попередження критичних ситуацій при обробці інформаційних даних різної природи, які мають фрактальні властивості.

Ключові слова: самоподібні та мультифрактальні стохастичні процеси, показник Херста, мультифрактальні характеристики, математична модель фрактального процесу, оцінювання параметрів за часовим рядом.

АННОТАЦИЯ

Кириченко Л.О. Модели и методы оценивания параметров самоподобных и мультифрактальных стохастических процессов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, Харьков, 2013.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы – повышению эффективности оценивания параметров самоподобных и мультифрактальных случайных процессов по временным рядам малой длины на основе разработки совокупности взаимосвязанных методов анализа их фрактальных и корреляционных свойств.

В работе проведен сравнительный анализ статистических характеристик оценок показателя Херста, полученных наиболее востребованными на практике методами оценивания (нормированного размаха, изменения дисперсии, детрендрованного флуктуационного анализа, с помощью дискретного вейвлет-преобразования), который показал, что оценки являются смещенными нормально распределенными случайными величинами и могут быть представлены доверительным интервалом значений, характеристики которого учитывают длину исследуемого временного ряда и метод оценивания.

На основе полученных результатов предложен комплексный подход к оцениванию параметров самоподобных и мультифрактальных случайных процессов по коротким нестационарным временным рядам, который предусматривает предварительное исследование структуры временных рядов, в частности, рядов с наличием трендовых составляющих и краткосрочной зависимости; обеспечивает несмещенное интервальное оценивание параметра самоподобия и совместное использование нескольких методов фрактального анализа. Предложен метод вейвлет-оценивания показателя Херста для временных рядов со значительными трендовыми и циклическими составляющими, основанный на предварительном анализе спектра вейвлет-энергии и использовании пакетного вейвлет-преобразования.

Проведено тестирование методов мультифрактального анализа, построенных на основе детрендрованного флуктуационного анализа, максимумов модулей непрерывного вейвлет-преобразования и дискретного вейвлет-преобразования на реализациях фрактальных процессов разных типов. Показано, что мультифрактальные характеристики (обобщенный показатель Херста, скейлинговая экспонента, функция мультифрактального спектра), полученные по выборочным данным, имеют смещение, которое уменьшается с увеличением длины реализации. В случае оценивания характеристик процессов с дискретным мультифрактальным спектром значительные преимущества в точности имеет метод мультифрактального флуктуационного анализа. Разработан метод, позволяющий принимать или отвергать гипотезу о наличии монофрактальных свойств ряда на основе исследования выборочных значений

обобщенного показателя Херста, полученных методом мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа.

Исследована корреляционная зависимость показателя Ляпунова и показателя Херста для хаотических отображений. Результаты анализа свидетельствуют, что она может быть выражена линейной регрессией. Показано, что для большинства хаотических последовательностей аттрактор системы обладает явно выраженными мультифрактальными свойствами, которые зависят от степени хаотичности, определяемой значением показателя Ляпунова.

Предложена математическая модель самоподобного стохастического процесса, который является экспоненциальным преобразованием фрактального гауссовского шума, что позволяет получить самоподобный в широком смысле процесс с заданными степенью самоподобия и характеристикой хвоста распределения. Усовершенствована модель мультифрактального процесса на основе биномиального мультипликационного стохастического каскада, которая позволяет получить мультифрактальный процесс с заданными параметром самоподобия и функцией мультифрактального спектра.

Дальнейшее развитие получили оконные методы анализа изменения корреляционной и фрактальной структуры временных рядов по нескольким критериям, в частности, с помощью оценивания относительной вейвлет-энтропии. Показано, что оценивание вейвлет-энтропии и относительной вейвлет-энтропии позволяет обнаружить разладку корреляционных свойств для нестационарных стохастических временных рядов.

Рассмотрены практические применения предложенных моделей и методов. Результаты использованы для разработки и внедрения систем анализа, мониторинга, диагностики и предупреждения критических ситуаций при обработке информационных данных различной природы. Предложен алгоритм предотвращения перегрузки в телекоммуникационной сети для случая самоподобного входного трафика данных. Показано, что фрактальные свойства финансовых рядов в предкризисный период и период спада кризиса существенно отличаются. Применение оконных методов анализа фрактальной структуры позволяет выявить изменение мультифрактальных характеристик, которые являются индикаторами кризисного состояния финансового рынка. Показано, что мультифрактальный анализ электрокардиологических сигналов может быть использован для определения функциональных изменений в деятельности сердца. Также были проведены исследования свойств некоторых сигналов, отвечающим природным явлениям, и впервые установлена их фрактальная структура.

Ключевые слова: самоподобные и мультифрактальные стохастические процессы, показатель Херста, мультифрактальные характеристики, математическая модель фрактального процесса, оценивание параметров по временному ряду.

ABSTRACT

Kirichenko L.O. Models and methods for estimating the parameters of self-similar and multifractal stochastic processes. – As Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Science in Specialization 01.05.02 –

Mathematical Modelling and Computational Methods. – Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, Kharkiv, 2013.

This thesis results in the development of the theory of fractal analysis. On this basis an important scientific and technical problems are solved. Such as, the improvement of efficiency in estimating the parameters of self-similar and multifractal stochastic processes for non-stationary time series of short length.

The developed methods involve a preliminary study of the time series structure, an unbiased interval estimation of the parameter of self-similarity. Complex application of various methods of fractal analysis, which improves the reliability of the estimates, there is also made. A method for determining the monofractal property on short time series is proposed.

New mathematical models of self-similar and multifractal stochastic processes that can produce various processes with given fractal properties are worked out. The “window methods” of analysis for correlation and fractal structure of time series according to multiple criteria were developed.

The results of the studies were used for the development and implementation of the systems for assessment, monitoring, diagnosis, and prevention of critical situations when processing data information of different nature.

Key words: self-similar and multifractal stochastic processes, Hurst exponent, multifractal characteristics, mathematical model of fractal process, parameter estimation in time series.

Підп. до друку . .13. Формат 60x841/16. Спосіб друку – ризографія
Умов. друк. арк. 2,1. Ціна договірна. Тираж 100 прим.
Зам. № 2-349.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
Харків, просп. Леніна, 14