

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

ДЕЙНЕКО ЖАННА ВАЛЕНТИНІВНА

УДК 519.2: 004.9

**МЕТОДИ АНАЛІЗУ НЕСТАЦІОНАРНИХ САМОПОДІБНИХ
ЧАСОВИХ РЯДІВ, ЩО ЗАСНОВАНІ НА ДИСКРЕТНОМУ
ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННІ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент
Кіріченко Людмила Олегівна, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри прикладної математики.

Офіційні опоненти:

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

доктор технічних наук, професор
Пашенко Руслан Едуардович, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, старший науковий співробітник відділу дистанційного зондування Землі.

Захист відбудеться «___» _____ 2012 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 «___» _____ 2012 р.

Учений секретар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній час стало загальновизнаним, що багато інформаційних, біологічних, фізичних, технологічних процесів мають складну фрактальну структуру. Фрактальний аналіз використовується для моделювання, аналізу та контролю складних систем в різних областях науки і техніки. Очевидно, що оцінювання ступеня самоподібності (параметра Херста) за експериментальними даними відіграє важливу роль у вивченні процесів, які мають фрактальні властивості. Міра самоподібності стохастичного процесу, що визначається параметром Херста, є показником складності динаміки і кореляційної структури часового ряду.

Для оцінювання параметра Херста за часовим рядом існує ряд методів. Однак, більшість з них застосовуються до стаціонарних рядів, у той час як чимало природних, технічних і інформаційних процесів є нестаціонарними. Типовими порушеннями стаціонарних властивостей, які мають місце на практиці, є наявність трендової та циклічної складових процесу. Ефективним інструментом дослідження структури нестаціонарних часових рядів є апарат вейвлет-аналізу, який дозволяє виділяти структурні компоненти процесу.

Існує велика кількість публікацій, присвячених аналізу фрактальних властивостей та визначенню ступеня самоподібності. Значний внесок у розвиток теорії самоподібних процесів та методів оцінювання показника Херста внесли H.E. Hurst, B. Mandelbrot, J. Feder, W. Willinger, E. Peters, J.W. Kantelhardt, O.I. Шелухін, В.М. Соловйов та інші вчені. Основні ідеї вейвлет-аналізу процесів, які мають фрактальні властивості, сформульовані в роботах S. Mallat, P. Abry, P. Flandrin, M.S. Taqqu. Водночас ще залишаються невирішеними завдання, що пов'язані з вейвлет-аналізом самоподібних часових рядів із значними трендовими та циклічними складовими.

Таким чином, актуальною і важливою науково-технічною задачею є розробка методів вейвлет-фрактального аналізу нестаціонарних часових рядів. Завдання, які при цьому постають, зумовили напрямок досліджень у наданій дисертаційній роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетних тем № Ф25/713 від 03.09.2007 р., держреєстрація № 0107U010621 «Аналіз та поведінка систем з великою нелінійністю: синергетичний підхід» та № Ф25/253 від 14.05.2008 р., держреєстрація № 0108U009112 «Розробка математичних моделей і інформаційних систем з великою нелінійністю». Дисертаційна робота є складовою частиною проведених за цією темою досліджень. Дисертант був одним із виконавців роботи за цими договорами і досліджував самоподібні властивості потоку даних на вузлових серверах та активних елементах мереж, що дозволило забезпечити максимальну пропускну здатність каналів при мінімальній кількості втрачених пакетів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка обчислювальних методів аналізу фрактальної структури нестаціонарних самоподібних часових рядів, що засновані на дискретному вейвлет-перетворенні, які дозволять підвищити точність і швидкість оцінювання параметра самоподібності в біологічних, інформаційних та технічних системах.

Досягнення цієї мети потребує вирішення таких задач:

- провести порівняльний аналіз статистичних характеристик оцінок показника Херста щодо основних методів оцінювання міри самоподібності по часових рядах;
- провести дослідження статистичних властивостей оцінок показника Херста, отриманих за допомогою дискретного вейвлет-перетворення для стаціонарних часових рядів;
- на основі результатів досліджень розробити метод ефективного оцінювання параметра Херста для стаціонарних рядів;
- провести аналіз статистичних властивостей оцінок показника Херста, отриманих за допомогою дискретного вейвлет-перетворення для часових рядів із трендовими та циклічними складовими;
- за результатами аналізу провести модифікацію і вдосконалення методів вейвлет-оцінювання параметра Херста для нестационарних часових рядів із трендовими та циклічними складовими;
- розробити алгоритми і програми комп'ютерної реалізації методів.

Об'єктом дослідження є самоподібні процеси в біологічних, інформаційних та технічних системах.

Предмет дослідження – вейвлет-методи аналізу самоподібних часових рядів в біологічних, інформаційних та технічних системах.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі використовувалися методи фрактального та статистичного аналізу даних при дослідженні властивостей самоподібності та розрахунку статистичних характеристик, методи теорії ймовірності та випадкових процесів для моделювання самоподібних процесів; методи вейвлет-аналізу для дослідження структури і самоподібності часових рядів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

- вперше запропоновано підхід до оцінювання ступеня самоподібності за допомогою дискретного вейвлет-перетворення, заснований на кореляційному аналізі оцінок показника Херста, що дозволило збільшити точність оцінювання в умовах часових рядів малої довжини;
- отримав подальший розвиток метод оцінювання показника Херста за допомогою дискретного вейвлет-перетворення, який використовує інтервальні оцінки, характеристики яких, на відміну від існуючих методів, враховують довжину самоподібного часового ряду і тип материнської вейвлет-функції;
- вперше запропоновано метод вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів із значними трендовими та циклічними складовими, який ґрунтується на аналізі компонент спектра вейвлет-енергії, що дозволяє підвищити точність оцінок;
- отримав подальший розвиток метод вейвлет-оцінювання показника Херста, заснований на попередньому аналізі спектра вейвлет-енергії та виборі ефективних параметрів материнської вейвлет-функції, який, на відміну від існуючих методів, враховує відношення фрактального шуму та трендової складової, і створює передумови для поліпшення обчислювальних властивостей базового методу оцінювання.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені методи дослідження самоподібних процесів можуть бути використані для моделювання і аналізу технічних, інформаційних, біологічних та інших систем, а також при проведенні моніторингу критичних явищ в динамічних системах, які мають властивості

самоподібності. Крім того, результати роботи передбачається використовувати при аналізі часових послідовностей в тих випадках, коли самоподібна та довгострокова залежність впливають на статистичні характеристики досліджуваних процесів.

Розроблені фрактально-вейвлетні методи дослідження впроваджені в Українському науково-дослідному інституті екологічних проблем, у акціонерному товаристві «Енергоблік», а також у навчальному процесі на кафедрах програмної інженерії, медіасистем та технологій Харківського національного університету радіоелектроніки, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто та опубліковані в роботах [1–17]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, з питань, що стосуються наданого дослідження, здобувачу належать такі результати. У роботах [1, 8, 12] запропоновано і чисельно досліджено підхід до вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів малої довжини, заснований на кореляційному аналізі вейвлет-оцінок, що дозволило збільшити точність оцінювання, проведено аналіз статистичних характеристик вейвлет-оцінок показника Херста. У статті [2] виконано дослідження фрактальних властивостей рядів споживання та виробництва електроенергії в Україні. У роботах [3, 13] проведено фрактальний аналіз часових реалізацій самоподібного телекомунікаційного трафіка. У роботах [4, 9, 14] запропоновано та досліджено метод вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів із трендовими та циклічними складовими, який заснован на аналізі спектру вейвлет-енергії і враховує відношення фрактального шуму та трендової складової. У статті [5] запропоновано метод вейвлет-оцінювання, що заснований на аналізі компонент спектра вейвлет-енергії, та проведено дослідження запропонованим методом фрактальної структури сигналів. У роботах [6, 7, 16] вдосконалено метод оцінювання показника Херста, що використовує інтервальні оцінки, характеристики яких

враховують

довжину часового ряду та тип материнської вейвлет-функції, виконано порівняльний статистичний аналіз оцінок запропонованим методом з іншими методами оцінювання ступеня самоподібності. У роботах [10, 11] чисельно досліджено вплив параметрів нестационарних часових рядів на властивості оцінок показника Херста. У роботі [15] застосовано метод вейвлет-оцінювання показника Херста для визначення точки розладки фрактальних властивостей у біологічних часових рядів. У роботі [17] проведено вейвлет-оцінювання ступеня самоподібності нестационарних мультифрактальних сигналів. Усі співавтори із задекларованим особистим внеском дисертанта згодні.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були апробовані на 11 наукових конференціях. Основні положення проведених досліджень доповідалися й обговорювалися авторкою на таких конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції CSIT-2009, що була організована Національним університетом «Львівська політехніка» (м. Львів, 15–17 жовтня 2009 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2010)» (м. Запоріжжя, 4–5 березня 2010 р. та 10–11 березня 2011 р.); Науково-технічній конференції з міжнародною участю «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях (КМНТ-2010)», (м. Харків, 18–21 травня 2010 р.); Науково-практичній конференції

«Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2010)» (м. Євпаторія, 17–21 травня 2010 р.); Міжнародній конференції «Сучасна стохастика: теорія та застосування II» (м. Київ, 7–11 вересня, 2010 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (м. Запоріжжя, 22–24 вересня 2010 р.); 17-й Міжнародній конференції по автоматичному управлінню «Автоматика – 2010» (м. Харків, 27–29 вересня 2010 р.); Міжнародній конференції «Тараповские чтения» – 2011, присвяченій 85-річчю І. Е. Тарапова та 50-річчю створення механіко-математичного факультету Харківського національного університету ім. Каразіна (м. Харків, 17–22 квітня 2011 р.); XVII Міжнародній конференції «KDS – 2011. Knowledge – Dialogue – Solution» (м. Київ, 5–9 вересня 2011 р.).

Публікації. Основні результати за темою дисертації викладено у 17 опублікованих роботах: 5 статтях у наукових журналах і збірниках, що входять до переліків фахових наукових видань України з технічних наук, 1 статті у закордонному фаховому журналі та 11 друкованих матеріалах конференцій національного та міжнародного рівня.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатка (7 стор.), списку використаних джерел із 134 найменувань (13 стор.), містить 18 таблиць (7 стор.), 62 рисунка (28 стор.) та має загальний обсяг 166 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дослідження; розглядаються проблеми, які виникають через властивості самоподібності в технічних та інформаційних системах; формулюється мета та задачі дослідження; визначаються об'єкт, предмет та методи досліджень; висвітлюється наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, а також особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві; відзначається апробація результатів дисертації та кількість праць, опублікованих за темою дисертаційної роботи.

У **першому розділі** дисертації проведений аналіз публікацій, присвячених дослідженням самоподібних часових рядів, що оснований на методах фрактального аналізу. Розглянуті основні поняття і властивості самоподібних стохастичних процесів. Стохастичний процес $X(t)$ є самоподібним із параметром самоподібності H (показником Херста), якщо процес $a^{-H}X(at)$ описується тими ж скінченновимірними законами розподілу, що й $X(t)$. Ключове значення в теорії самоподібних процесів має поняття повільно спадної залежності (довгострокової пам'яті процесу). Процеси мають довгострокову пам'ять, якщо їх кореляційна функція убуває гіперболічно при збільшенні часової затримки k :

$$r(k) : k^{-\beta} L_1(k), \quad k \rightarrow \uparrow, \quad (1)$$

де $\beta = 2H + 1$, $0 < \beta < 1$, $k \rightarrow \uparrow$, L_1 – медленно змінююча на нескінченності функція, то єсть $\lim_{t \rightarrow \uparrow} \frac{L_1(tx)}{L_1(t)} = 1$ для всіх $x > 0$.

Показник Херста H є показником складності динаміки і кореляційної структури ряду. Для оцінювання параметра Херста по часовому ряду існує низка методів. У розділі представлені основні методи оцінювання показника Херста. Однак, більшість з цих методів застосовні для аналізу стаціонарних часових рядів, і за наявності нестационарних властивостей призводять до некоректних результатів оцінювання. Найбільш адекватним математичним апаратом для дослідження динаміки та структури процесів, які мають нестационарні властивості, є методи вейвлет-перетворень. Вони забезпечують аналіз часового ряду одночасно у часовий і частотний областях.

У розділі наводяться основні положення вейвлет-аналізу, властивості вейвлет-перетворень, представлені основні ідеї багатомасштабного аналізу. Внаслідок дискретного вейвлет-перетворення (ДВП), заснованого на багатомасштабному аналізі, часовий ряд $X(t)$ може бути представлений сумою апроксимуючих та деталізуючих компонент:

$$X(t) = \sum_{k=1}^{N_a} \text{arg}(N, k) \varphi_{Nk}(t) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{N_j} \text{det}(j, k) \psi_{jk}(t), \quad (2)$$

де $\text{arg}(N, k) = \int_{-r}^r X(t) \varphi_{Nk}(t) dt$ – апроксимуючі вейвлет-коефіцієнти рівня N ,

$\text{det}(j, k) = \int_{-r}^r X(t) \psi_{jk}(t) dt$ – деталізуючі вейвлет-коефіцієнти j , N – вибраний максимальний рівень розкладу, N_j – кількість деталізуючих коефіцієнтів на рівні j , N_a – кількість апроксимуючих коефіцієнтів на рівні N , $\psi(t)$ – материнська вейвлет-функція, $\varphi(t)$ – відповідна скейлінг-функція.

Метод вейвлет-оцінювання ступеня самоподібності базується на властивостях деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів, отриманих на різних рівнях декомпозиції досліджуваного часового ряду. Основою цього методу є положення про те, що зміна середніх значень квадратів модулів вейвлет-коефіцієнтів $d_x(j, k)$ на масштабному рівні j , підпорядковується скейлінговому відношенню:

$$E_j : 2^{(2H+1)j}, \quad (3)$$

де H – показник Херста.

Графік залежності $\log_2(E_j)$ від j являє собою пряму лінію, що апроксимована методом найменших квадратів. Значення параметра H можна знайти, оцінивши тангенс кута нахилу прямої.

На основі проведеного у розділі аналізу публікацій визначена сукупність напрямків розв'язку наукового завдання по темі дисертації і сформульовані основні задачі наукових досліджень.

У **другому розділі** проведено дослідження методу вейвлет-оцінювання показника Херста для стаціонарних процесів щодо збільшення точності шляхом вибору ефективних параметрів ДВП. Особлива увага приділялася оцінюванню самоподібності часових рядів невеликої довжини (до 1000 значень). Був проведений

порівняльний аналіз удосконаленого методу вейвлет-оцінювання із найбільш відомими методами.

Метод вейвлет-оцінювання показника Херста H самоподібного процесу оснований на властивостях деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів, ряди яких на кожному рівні розкладання є також самоподібними. У ході дослідження були чисельно проаналізовані властивості деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів часових рядів невеликої довжини із різною кореляційною структурою. Показано, що ряди деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів на різних рівнях розкладу є стаціонарними, некорельованими і нормально розподіленими.

Удосконалення методу вейвлет-оцінювання та вибір ефективних параметрів ДВП було проведено на основі оцінювання самоподібності модельних фрактальних реалізацій. Модельним самоподібним процесом було обрано фрактальний броунівський рух (ФБР), який часто застосовується у різних галузях досліджень. У ході чисельного експерименту моделювалися реалізації ФБР із заданим показником H . Для кожної реалізації розраховувалась вейвлет-оцінка \hat{H}_w . Для кожного значення H були отримані масиви оцінок \hat{H}_w та досліджені їхні статистичні характеристики. Для оцінювання використовувалися ортогональні вейвлети із компактним носієм: вейвлет Хаара (haar), вейвлети Добеши різних порядків (db2-db10), вейвлет Мейера (dmey), симплети (sym1-sym10).

Чисельні дослідження показали, що при невеликій довжині часового ряду оцінки \hat{H}_w є зміщеними (заниженими). На рис. 1 представлені залежності середніх значень оцінок \hat{H}_w від теоретичного значення H для часових рядів довжиною 1000 значень, які отримано при різних материнських вейвлетах.

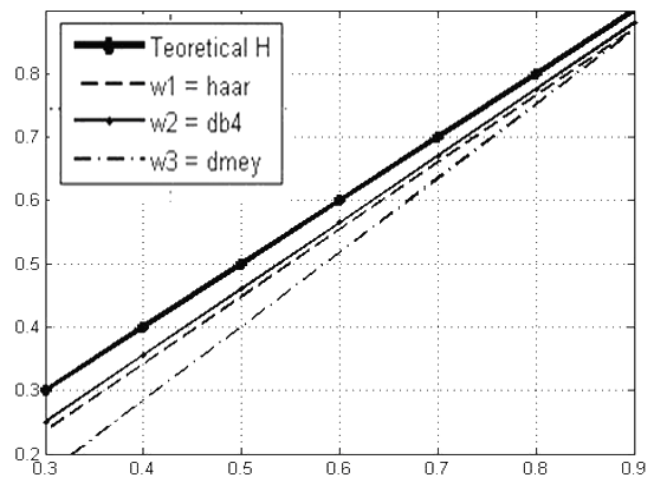


Рисунок 1 – Залежність середніх значень оцінок \hat{H}_w від вибору вейвлет-функції

Для кількісного оцінювання зміщення оцінки \hat{H}_w , отриманої за допомогою вейвлет-функції $wave$, від теоретичного значення показника H на усьому діапазоні значень, була розрахована величина зміщення Δ^{wave} за формулою:

$$\Delta^{wave} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\bar{H}_i^{wave} - H_i \right), \quad (4)$$

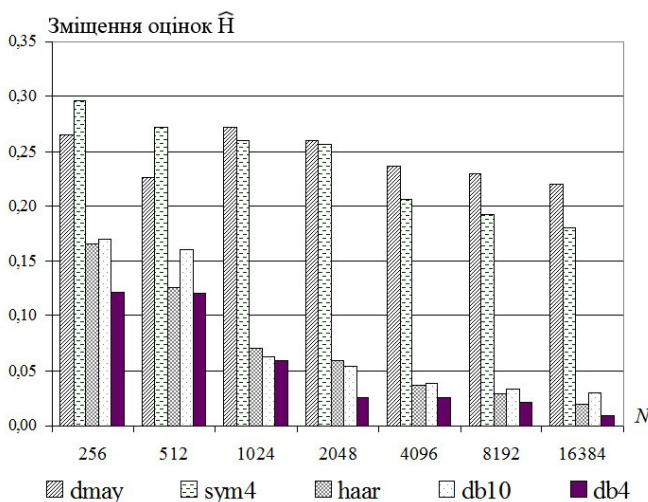


Рисунок 2 – Гістограма зміщення оцінок \hat{H}_w при різній довжині часового ряду для різних вейвлетів

де \bar{H}_i^{wave} – середнє значення оцінки \hat{H}_w , отриманої для реалізацій з теоретичним показником H_i , $0 < H_i < 1$.

На рис. 2 представлена гістограма зміщень оцінок показника Херста для різних материнських вейвлетів при різній довжині реалізації.

Особлива увага приділена дослід-женню середньоквадратичних відхилень оцінок показника Херста. Чисельний аналіз показав, що середньоквадратичне відхилення вейвлет-оцінок не залежить від значення показника Херста і визначається довжиною досліджуваного ряду і материнською вейвлет-функцією. У таблиці 1 представлені значення середньоквадратичних відхилень оцінок H , отриманих по реалізаціях довжини N при різних материнських вейвлетах. Дослідження показали, що найменші зміщення та середньоквадратичне відхилення мають оцінки, обчислені за допомогою вейвлета Добеши четвертого порядку.

Таблиця 1 – Середньоквадратичне відхилення оцінок показника H для різних вейвлетів

Довжина ряду N	S					
	haar	db4	db5	db10	sym4	dmey
256	0,0498	0,0420	0,0680	0,1703	0,2962	0,1372
1024	0,0454	0,0240	0,0540	0,0632	0,2601	0,0928
4096	0,0328	0,0104	0,0320	0,0383	0,2065	0,0619
16384	0,0087	0,0048	0,0280	0,0329	0,1920	0,0407

У роботі вперше проведено аналіз кореляційної залежності між вейвлет-оцінками показника Херста \hat{H}_1 та \hat{H}_2 , які були отримані за допомогою різних вейвлетів. Кореляційний аналіз показав слабку лінійну залежність: абсолютні значення вибіркових коефіцієнтів кореляції $r[\hat{H}_1, \hat{H}_2]$ перебувають у діапазоні меншому за 0,5. Дослідження показали, що більш ефективною оцінкою показника Херста є середнє арифметичне оцінок, отриманих за допомогою декількох різних материнських

вейвлет-функцій, оскільки в цьому випадку $S_{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{H}_i} \ll S_{\hat{H}_i}$. У табл. 2 пред-

ставлені вибіркові значення коефіцієнтів кореляції, середньоквадратичні відхилення вейвлет-оцінок та їх середніх арифметичних, обчислених із використанням різних вейвлетів при довжині часового ряду $N=256$. Таким чином, метод вейвлет-оцінювання, що враховує результати кореляційного аналізу оцінок показника Херста, дозволяє збільшити точність оцінювання.

Таблиця 2 – Середньоквадратичні відхилення та їх полусуми для різних материнських вейвлетів

Вейвлети	$r[\hat{H}_1, \hat{H}_2]$	$S_{\hat{H}_1}$	$S_{\hat{H}_2}$	$S_{\frac{1}{2}(\hat{H}_1 + \hat{H}_2)}$
$w_1 = \text{haar}$	0,39	0,0498	0,0680	0,045
$w_2 = \text{db5}$				
$w_1 = \text{db4}$	0,42	0,0420	0,0498	0,039
$w_2 = \text{haar}$				

$w_1 = db10$	0,32	0,1703	0,1372	0,125
$w_2 = dmey$				

Оцінки показника Херста, отримані методом, заснованим на ДВП, мають нормальний закон розподілу, що впливає із властивостей деталізуючих вейвлет-коєфіцієнтів. Параметри розподілу залежать від довжини досліджуваного часового ряду і обраного материнського вейвлета. Виходячи з вищевикладених результатів, вейвлет-оцінка показника Херста може бути представлена таким довірчим інтервалом значень:

$$\hat{H} + \Delta - t_\alpha S < H < \hat{H} + \Delta + t_\alpha S, \quad (5)$$

де $\hat{H} = \hat{H}(N, wave)$ – значення оцінки показника Херста, N – довжина досліджуваного часового ряду; $wave$ – материнська вейвлет-функція; $\Delta = \Delta(N, wave)$ – величина зміщення оцінки; $S = S(N, wave)$ – середньоквадратичне відхилення, розраховане по модельних реалізаціях довжини N ; α – необхідний рівень значущості; t_α – величина, така, що $\alpha = 2\Phi(t)$; $\Phi(t)$ – функція стандартного нормального розподілу. Таке інтервальне оцінювання особливо корисне при малій довжині часової реалізації, коли точкова оцінка ступеня самоподібності малонадійна.

У розділі був проведений порівняльний аналіз розробленого вейвлет-методу з іншими найбільш відомими методами оцінки показника Херста, де були досліджені статистичні характеристики оцінок. Для кожного згенерованого часового ряду із теоретично заданим показником H розраховувалися оцінки різними методами: методом R/S -аналізу ($\hat{H}_{R/S}$), зміни дисперсії (\hat{H}_d), флуктуаційного аналізу (\hat{H}_{fa}) та вейвлет-методом (\hat{H}_w) із материнським вейвлетом Добеши 4-го порядку.

Експеримент показав, що середні значення оцінок, отриманих різними методами, мають зміщення, яке залежить від теоретичного значення показника Херста і довжини досліджуваного ряду. На рис. 3 представлена залежність середніх значень оцінок \hat{H} , отриманих різними методами від теоретичного значення H для часових рядів довжиною 1000 значень. Очевидно, що вейвлет-оцінки мають найменше зміщення.

Оцінки показника Херста, отримані методом вейвлет-оцінювання, мають найменші середньоквадратичні відхилення. У табл. 3 представлені значення середньоквадратичних відхилень оцінок H , отриманих різними методами по реалізаціях довжини N .

Таблиця 3 – Середньоквадратичні відхилення оцінок \hat{H} для різних методів

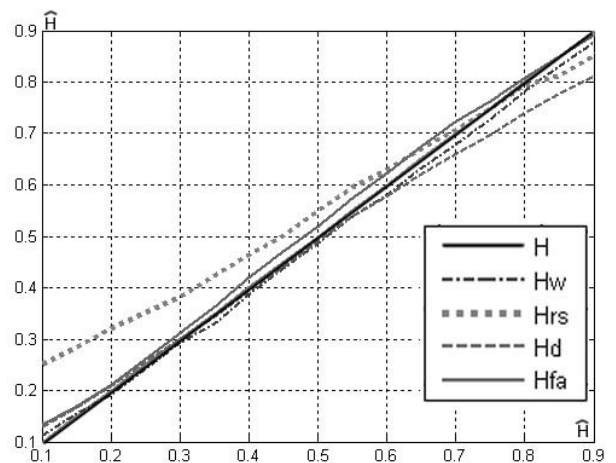


Рисунок 3 – Залежність середніх значень оцінок \hat{H}_w від теоретичного значення H для різних методів оцінювання

N S_H	256	512	1024	2048	4096	8192	16384
S_{Hrs}	0,0988	0,0801	0,0602	0,0505	0,0490	0,0465	0,0403
S_{Hd}	0,0983	0,0702	0,0621	0,0624	0,0580	0,0494	0,0464
S_{Hfa}	0,0982	0,0820	0,0702	0,0552	0,0518	0,0486	0,0458
S_{Hw}	0,0420	0,0350	0,0240	0,0211	0,0104	0,0065	0,0048

У роботі експериментальним шляхом показано, що метод, заснований на ДВП, має явні переваги за часом обчислень. Рис. 4 демонструє зміну часу оцінювання показника Херста для різних методів залежно від довжини досліджуваного ряду. Таким чином, алгоритм швидкого вейвлет-перетворення дозволяє проводити фрактальний аналіз із мінімальними витратами за часом і обсягом інформації.

У **третьому розділі** запропоновано і досліджено метод вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів із значними трендовими та циклічними складовими, що заснований на аналізі компонент спектра вейвлет-енергії.

Відомо, що більшість методів оцінювання параметра Херста застосовні до стаціонарних процесів і за наявності трендової компоненти призводять до некоректних результатів. За допомогою запропонованого методу можна чисельно визначити показник Херста для часових рядів в виду:

$$X(t) = T(t) + C(t) + \varepsilon_H(t), \quad (6)$$

де $X(t)$ – досліджуваний ряд; $T(t)$ – трендова компонента; $C(t)$ – циклічна компонента; $\varepsilon_H(t)$ – випадкова компонента, яка представляє фрактальний шум із параметром Херста H .

У ході роботи були досліджені різні сигнали, які мають трендові та циклічні складові. Як фрактальний шум використовувались природи ФБР із заданим показником Херста – фрактальний гаусівський шум (ФГШ).

Вейвлет-розклад дозволяє ефективно виділяти вище перелічені складові часового ряду. Для виділення складових аналізований сигнал декомпозується за допомогою ДВП на необхідне число рівнів. На кожному рівні розкладу буде отриманий набір апроксимуючих та деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів, за якими можна однозначно відновити компоненти сигналу. Максимальний рівень розкладу залежить від того, які частотні діапазони необхідно досліджувати. Кожен рівень розкладу відповідає певному діапазону частот, і коефіцієнти цього рівня показують, наскільки потужно пред-

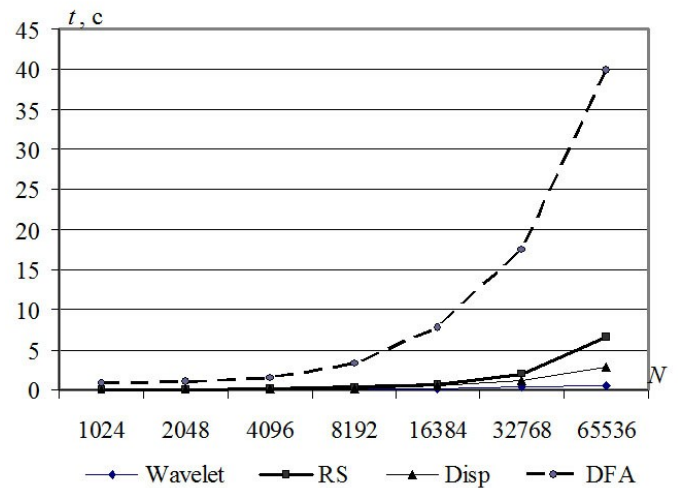


Рисунок 4 – Зміна часу оцінювання показника Херста при збільшенні довжини ряду

ставлений цей діапазон частот у сигналі. Енергію сигналу на кожному із рівнів розкладу характеризує спектр вейвлет-енергії, що розраховується за формулою:

$$E_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_X(j,k)|^2, \quad (7)$$

де $d_X(j,k)$ – деталізуючі коефіцієнти; J – рівень розкладу; n_j – кількість коефіцієнтів на рівні J .

На рис. 5 представлені компоненти сигналу, які були отримані за допомогою вейвлет-розкладу та відповідний спектр вейвлет-енергії.

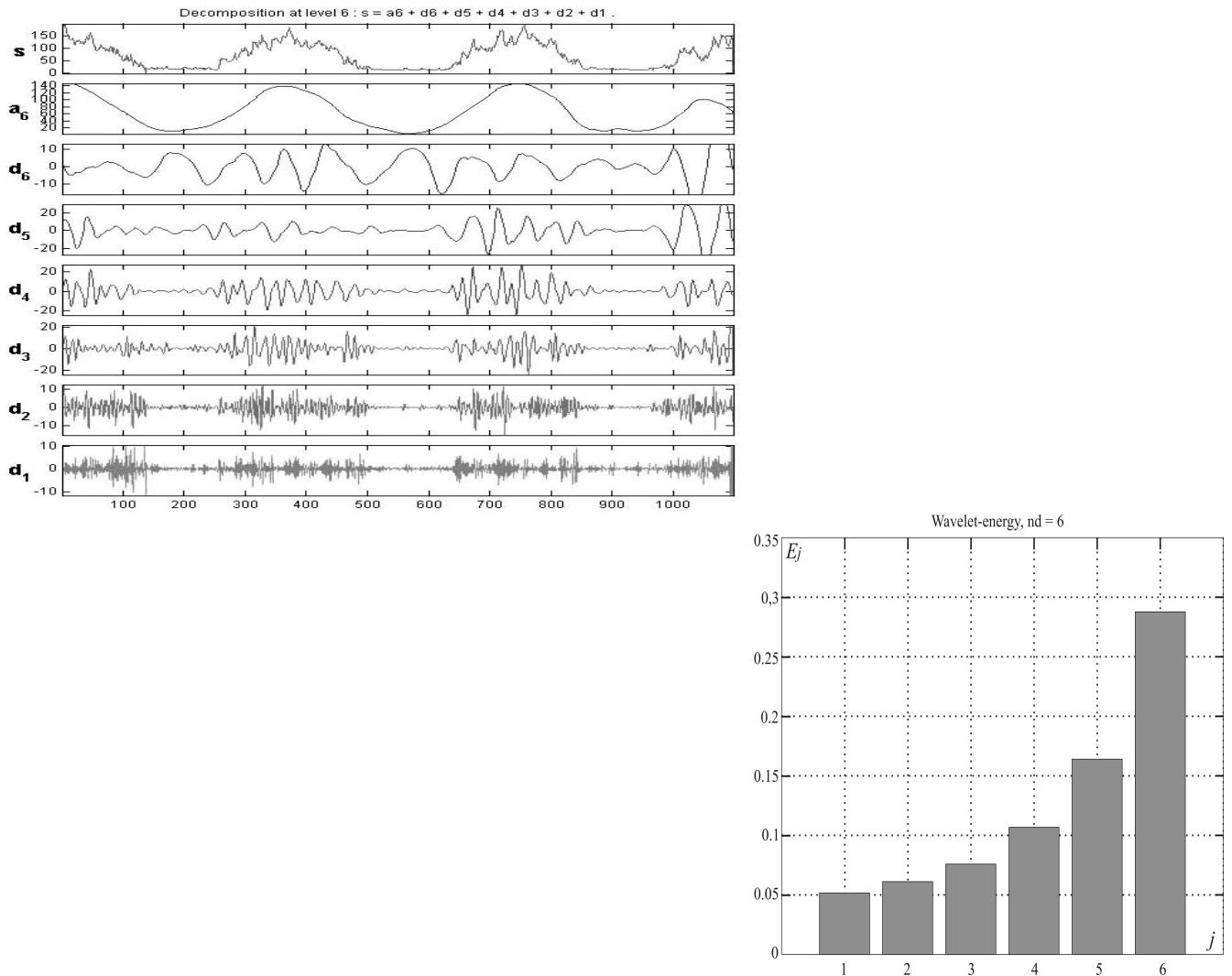


Рисунок 5 – Вейвлет-розклад сигналу і спектр вейвлет-енергії

Таким чином, ДВП дозволяє розкласти сигнал на необхідні складові. Однак безпосереднє видалення трендової або циклічної компоненти часового ряду призводить до порушення кореляційних зв'язків, що, у свою чергу, веде до некоректного оцінювання показника Херста. У роботі проведені обчислення, які підтверджують ці теоретичні припущення.

Однією із важливих характеристик вейвлет-функції $\psi(t)$ є наявність нульових моментів високого порядку: $\int_{-T}^{+T} t^k \psi(t) dt = 0$, $k = \overline{0, p-1}$. Кількість нульових моментів P материнського вейвлета характеризує здатність вейвлет-перетворення аналізувати дрібномасштабні флуктуації і особливості високого порядку, ігноруючи регулярні поліноміальні складові степеня $m < p$.

У розділі наведені результати оцінювання показника Херста для рядів із різними трендовими складовими із використанням вейвлет-функцій із різною кількістю нульових моментів P . У табл. 4 представлені значення оцінок показника Херста, отриманих для модельних рядів із поліноміальним трендом порядку m . Оцінки отримані за самоподібними реалізаціями з $H = 0,7$ довжиною 1000 значень із використанням вейвлетів Добеши.

Таблиця 4 – Оцінки показника H , для вейвлетів із різною кількістю нульових моментів

Поліноміальний тренд	H	Оцінка показника Херста H				
		db1 $p = 1$	db2 $p = 2$	db3 $p = 3$	db4 $p = 4$	db5 $p = 5$
$m = 1$	0,7	0,7350	0,7105	0,7127	0,6899	0,7024
$m = 2$	0,7	0,7908	0,7353	0,7013	0,7031	0,7036
$m = 3$	0,7	1,2272	0,9572	0,7344	0,7888	0,7805

Однак, правильний вибір вейвлет-функції дозволяє одержати адекватні оцінки показника Херста тільки в тому випадку, коли відношення трендової компоненти до стохастичного фрактального сигналу не є значним. У роботі був проведений чисельний експеримент для визначення діапазону, на якому коректно оцінюється показник Херста.

Модельний сигнал був представлений у вигляді суми:

$$Y(t) = aT(t) + \text{fgn}(t), \quad (8)$$

де $T(t)$ – тренд, який містить циклічну складову; $\text{fgn}(t)$ – фрактальний гаусівський шум; a – коефіцієнт, що регулює відношення тренда до шуму.

Дослідження показали, що існує діапазон значень a , при якому параметр Херста оцінюється коректно, але при подальшому зростанні значення a оцінка H стає завищеною і досить скоро досягає значення одиниці. Параметр a є малоінформативною характеристикою, оскільки величина діапазону залежить від довжини і місця розташування часового інтервалу, на якому заданий сигнал. Більш змістовною характеристикою, що встановлює відношення тренда і модельного шуму, є величина:

$$Ratio = \frac{S_{trend}}{S_{noise}}, \quad (9)$$

де S_{trend} – середньоквадратичне відхилення тренда; S_{noise} – середньоквадратичне фрактального процесу.

Оцінка показника Херста H , заданого при моделюванні фрактального процесу, обчислюється коректно залежно від коефіцієнта $Ratio$, що визначає рівень шуму. При зростанні значення коефіцієнта $Ratio$ оцінка H стає завищеною при будь-якому материнському вейвлеті та починає лінійно зростати, тобто здобуває лінійний тренд. На рис. 6 представлені значення оцінок параметра H , залежно від показника $Ratio$, отримані для фрактальних часових рядів із лінійним трендом. На представленій залежності показано діапазон, де оцінка є коректною. Теоретичне значення показника самоподібності $H = 0,8$.

У роботі було проведено визначення моменту появи тренда, тобто значення $Ratio^*$, що обмежує діапазон коректного оцінювання, за допомогою відомих статистичних критеріїв випадковості – серій та інверсій. У табл. 5 представлені результати експерименту для модельних фрактальних часових рядів із різними трендовими компонентами і відповідне значення коефіцієнта $Ratio^*$.

Якщо співвідношення тренда і фрактального шуму є значним, тобто значення $Ratio > Ratio^*$, для коректного оцінювання параметра H необхідно провести аналіз спектра вейвлет-енергії сигналу. Якщо сигнал містить трендову складову, спектр вейвлет-коефіцієнтів демонструє більші значення E_k на відповідних низькочастотних рівнях k . У цьому випадку при оцінюванні показника H переважні в сигналі низькочастотні складові пригнічують усі інші. Якщо при визначенні нахилу графіка функції $\log_2(E_j)$ від j не враховувати значення E_k , то у цьому випадку оцінка показника Херста буде коректною.

Таблиця 5 – Порогові значення коефіцієнта $Ratio^*$ для модельних рядів із трендовими компонентами

Тренд	Значення $Ratio^*$	
$T(t) = t$	8,27	$T(t) = \sqrt{t}$
$T(t) = t^2$	7,25	$T(t) = \log$
$T(t) = t^3$	4,74	$T(t) = \sin$
$T(t) = t^{3/4}$	0,45	$T(t) = \sin$

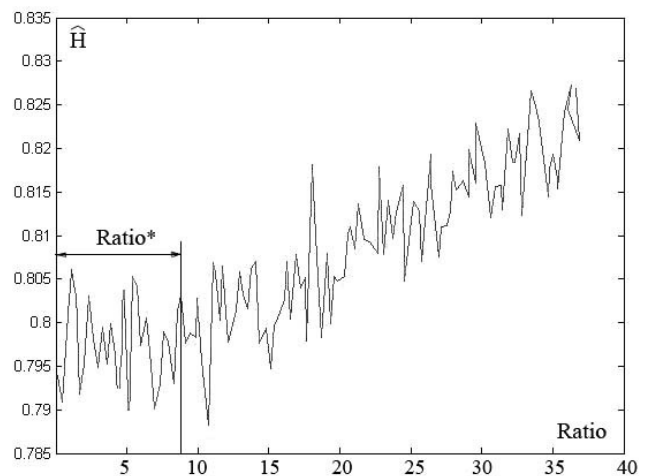


Рисунок 6 – Залежність показника Херста від коефіцієнта $Ratio$

На рис. 7, а представлені модельні сигнали: фрактальний шум без тренду, шум із поліноміальним трендом третього порядку, шум із трендом у вигляді суми синусоїд різної амплітуди. Теоретично заданий показник Херста – $H = 0,8$, довжина часового ряду – 1024 значення, обраний материнський вейвлет – db4. На рис. 7, б показані відповідні спектри вейвлет-енергії. На рис. 7, в показане визначення показника Херста без урахування (безперервна лінія) та з урахуванням (пунктирна лінія) трендових компонент. Оцінювання H без урахування рівнів розкладу, які відповідають трендовим та циклічним складовим, дає коректні результати.

Таким чином, у роботі запропоновано метод вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів із значними трендовими та циклічними складовими, який складається із декількох етапів.

Етап 1. Попереднє дослідження часового ряду. Аналіз часових рядів шляхом вейвлет-розкладу на складові, виділення трендової та циклічної компоненти.

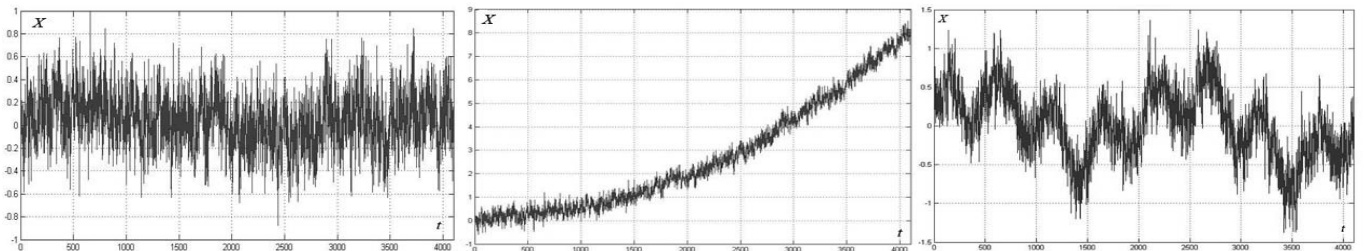
Етап 2. Аналіз трендових та циклічних компонент, оцінювання порядку m поліноміального тренда для вибору ефективної материнської вейвлет-функції.

Етап 3. Визначення значення параметра $Ratio$. Якщо значення знаходиться усередині діапазону коректного оцінювання ($Ratio < Ratio^*$), то показник Херста оцінюється за часовим рядом за допомогою обраного материнського вейвлета із кількістю нульових моментів $p > m$.

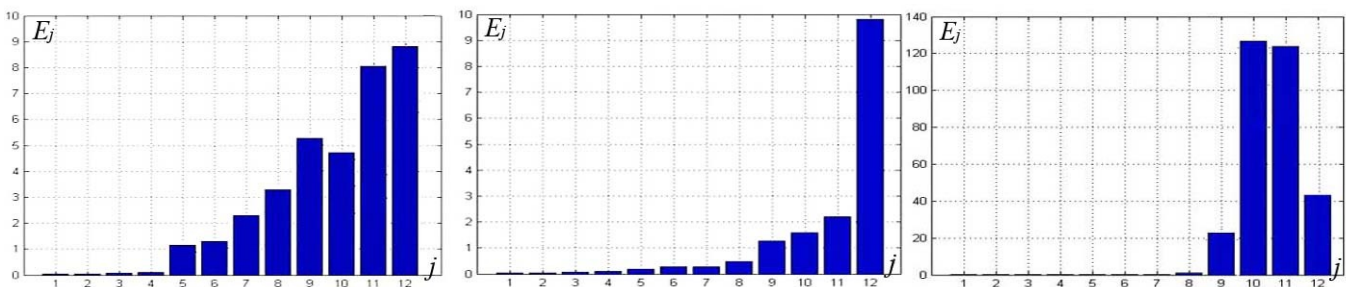
Етап 4. Якщо значення $Ratio > Ratio^*$, то необхідно зробити перетворення спектра вейвлет-енергії: виявити рівні розкладання, що відповідають трендовим компонентам і не враховувати їх при оцінці нахилу графіка функції $\log_2(E_j)$ від j .

У четвертому розділі показано застосування оцінювання показника Херста для часових рядів у різних областях досліджень.

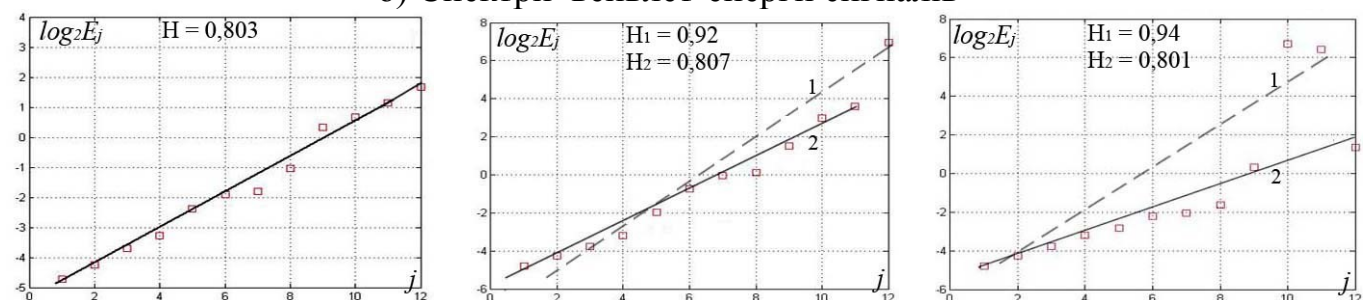
У роботі був проведений фрактальний аналіз часових рядів щодобового споживання і виробництва електроенергії в Україні за період з 2003 по 2010 роки. Дослідження показали, що ці ряди мають фрактальні властивості, а також довгострокову залежність, за винятком ряду виробництва електроенергії гідроелектро-станціями.



а) Модельні сигнали



б) Спектри вейвлет-енергії сигналів



в) Лінійна апроксимація без урахування (1) та з урахуванням (2) трендових компонент

Рисунок 7 – Вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів із трендовими та циклічними складовими

Для ряду щодобового споживання електроенергії виявлена довгострокова залежність із показником Херста $H = 0,56$. Для рядів виробництва електроенергії АЕС, ТЕС та ГЕС (рис. 8), аналіз показав наявність часових інтервалів із різними фрактальними властивостями, які відповідають сезонним циклам різної довжини.

Для ряду виробництва електроенергії АЕС показник Херста змінюється в межах $H = 0,58 \text{ } \grave{\text{e}} \text{ } 0,79$, для ТЕС – $H = 0,79 \text{ } \grave{\text{e}} \text{ } 0,89$. Фрактальний аналіз ряду виробництва електроенергії ГЕС показав наявність антиперсистентної залежності з показником Херста $H = 0,44$. Результати демонструють особливості структури часових рядів виробництва і споживання електроенергії, дослідження і прогнозування яких потребує окремого підходу, що враховує фрактальні особливості процесів.

Застосування методів фрактального вейвлет-аналізу є досить перспективним для моніторингу навколишнього середовища. У роботі був виконаний аналіз екологічних даних у акваторії Азовського моря для виявлення забруднення води, на підставі даних, наданих Харківським науково-дослідним інститутом екологічних проблем за період з 2006 по 2011 роки. Результати досліджень показали відсутність вираженої тенденції до зниження мінералізації води. Установлення цього факту дозволило зробити адекватний вибір розрахункових умов для прогнозування якості морської води.

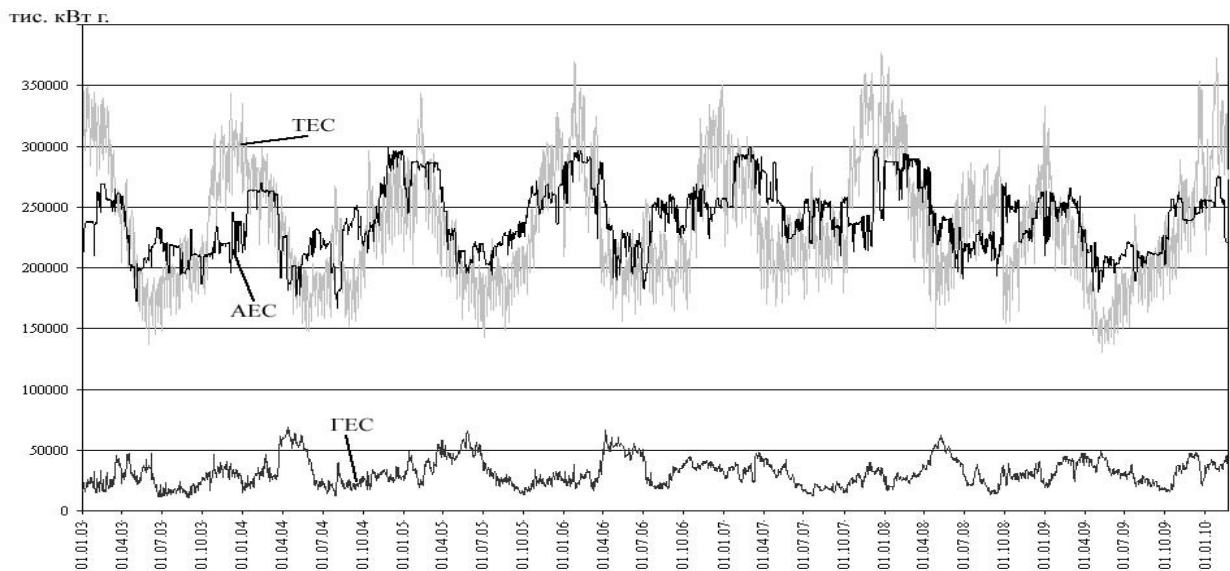


Рисунок 8 – Динаміка обсягів електроенергії, виробленої на АЕС, ТЕС та ГЕС України за період з 2003 по 2010 роки

Результати, що одержані у роботі, були використані для вивчення термодинамічних процесів у атмосферному прилеглому шарі. Внаслідок експериментальних досліджень, проведених на станції акустичного зондування Харківського національного університету радіоелектроніки, отримано ехограми акустичного зондува-

ння у цифровому вигляді. У роботі були розраховані оцінки показника H для сигналів, відбитих на різній висоті зондованого шару (рис. 9), і виявлена динаміка зміни показника Херста для сигналів, відбитих при різних висотах. На малих висотах, де впливає близькість об'єктів мегаполісу, значення показника Херста не перевищують 0,6. Потім, у зв'язку із припливом тепла у нижніх шарах атмосфери, значення H зростають до 0,75, що говорить про наявність довгострокової залежності в атмосферних процесах на невеликих висотах. По мірі збільшення висоти і далекості від мегаполіса, показник Херста зменшується і становить 0,5, що відповідає слабкорельованим випадковим процесам. Таким чином, дослідження показали, що математичними моделями сигналів, відбитих від атмосфери, можуть виступати самоподібні випадкові процеси.

Досить багато проблем з аналізу і керування складними технологічними і інформаційними процесами зводяться до виявлення розладки імовірнісних характеристик аналізованого часового ряду. Якщо під розладкою розуміти зміну фрактальних властивостей процесу, то зміна показника Херста є індикатором критичних ситуацій. У роботі була досліджена фрактальна структура енцефалограм лабораторних тварин у стані сну і активного періоду. Дослідження показали, що показник H принципово різний для різного стану тварини: для активного періоду (awake) $H = 0,7 \div 0,9$, для повільного сну (rem) – $H = 0,35 \div 0,6$, для швидкого сну (sws) – $H = 0,58 \div 0,82$. Отже, оцінювання параметра H дозволяє, проходячи «ковзним вікном» по енцефалограмі, визначати моменти переходу від сну до активного періоду і часові інтервали, коли тварина спить або перебуває в активному стані (рис. 10).

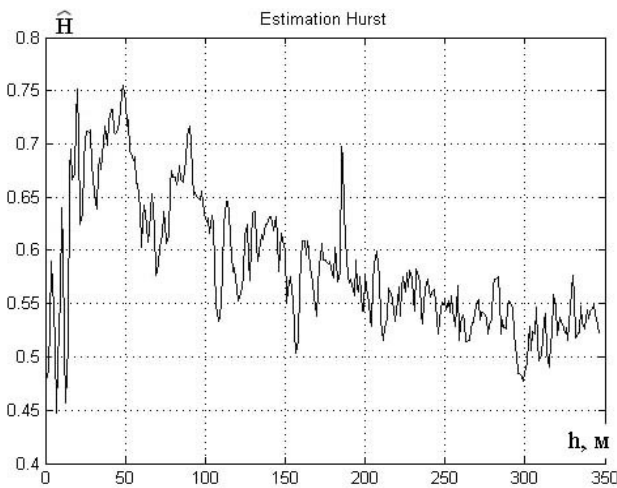


Рисунок 9 – Показник Херста як функція висоти h відбитого шару

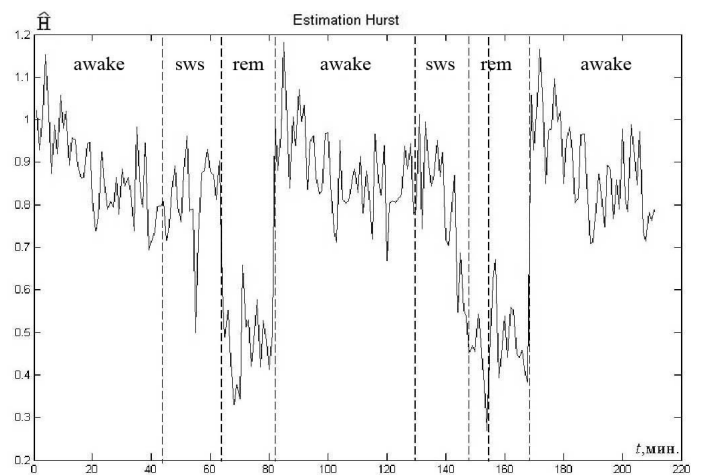


Рисунок 10 – Виявлення розладки фрактальних властивостей за енцефалограмою

Результати, що одержані в роботі, дозволяють застосувати оцінювання параметра самоподібності H для розробки інструментів автоматизованої діагностики і прогнозування критичних явищ для складних динамічних систем різної природи.

У додатку наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено результати, які відповідно до поставленої мети є вирішенням науково-технічної задачі розробки методів аналізу нестационарних самоподібних часових рядів. Результати роботи дозволили розробити вейвлет-методи щодо обстеження нестационарних часових рядів у біологічних, інформаційних та технічних системах. Одержані результати мають важливе наукове та практичне значення для обстеження фрактальних властивостей часових рядів.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі найсуттєвіші результати.

1. Проведено чисельний аналіз статистичних характеристик оцінок показника Херста, отриманих методом, що заснований на дискретному вейвлет-перетворенні. Аналіз показав, що оцінки є зміщеними (заниженими). Отримані залежності середнього зміщення і середньоквадратичних відхилень оцінок показника Херста від довжини часового ряду і вибору материнської вейвлет-функції. Показано, що найменші зміщення і середньоквадратичне відхилення мають оцінки, обчислені за допомогою вейвлета Добеши четвертого порядку.

2. Вперше запропоновано підхід до оцінювання ступеня самоподібності, заснований на кореляційному аналізі оцінок показника Херста. Показано, що вейвлет-оцінки, отримані за допомогою різних вейвлет-функцій, мають слабку лінійну залежність. Це дозволяє збільшити точність оцінювання, розглядаючи оцінку показника Херста як середнє арифметичне оцінок, одержаних за допомогою декількох різних материнських вейвлет-функцій.

3. Отримав подальший розвиток метод оцінювання показника Херста, заснований на дискретному вейвлет-перетворенні, який на відміну від існуючих методів, використовує інтервальні оцінки. Характеристики цих оцінок урахують довжину самоподібного ряду і материнську вейвлет-функцію, що особливо важливо при малій довжині часового ряду, коли точкова оцінка показника Херста малонадійна.

4. Проведено порівняльний аналіз розробленого вейвлет-методу з іншими найбільш відомими методами оцінки показника Херста, де були досліджені статистичні характеристики оцінок. Показано, що вейвлет-оцінки мають найменше зміщення і середньоквадратичне відхилення. Крім того, метод, що заснований на ДВП, має значні переваги за часом обчислень.

5. У роботі було виконано вейвлет-аналіз різних самоподібних часових рядів, із трендовими та циклічними складовими, і продемонстровано вплив трендових компонент на спектр вейвлет-енергії. Чисельно показано, що безпосереднє видалення трендової або циклічної компоненти ряду призводить до порушення кореляційних зв'язків і некоректного оцінювання показника Херста.

6. Вперше запропоновано метод вейвлет-оцінювання показника Херста для часових рядів із значними трендовими та циклічними складовими, заснований на аналізі компонент спектра вейвлет-енергії та виділенні діапазонів частот трендової та циклічної компонент ряду. Досліджено вплив трендових та циклічних складових на властивості оцінок показника Херста залежно від виду трендової компоненти і параметрів материнських вейвлет-функцій.

7. Отримав подальший розвиток метод вейвлет-оцінювання показника Херста, заснований на попередньому аналізі спектра вейвлет-енергії та виборі ефективних параметрів материнської вейвлет-функції, який на відміну від існуючих методів,

враховує відношення фрактального шуму та трендової складової, і створює передумови для поліпшення обчислювальних властивостей базового методу оцінювання. Визначено діапазон співвідношення тренда і фрактального шуму, на якому коректно оцінюється показник Херста. На основі результатів досліджень було запропоновано підхід до оцінювання, заснований на визначенні співвідношення фрактального шуму до компонент ряду і виборі ефективних параметрів вейвлет-функції.

8. На основі розроблених у роботі методів та їх програмних реалізацій були отримані такі практичні результати. Вперше виконаний фрактальний аналіз часових рядів виробництва та споживання електроенергії в Україні; виявлені самоподібні властивості досліджуваних рядів, що вказує на необхідність використання фрактальних моделей для аналізу і прогнозування даних часових рядів. Вперше проведено дослідження самоподібності сигналів акустичного зондування і показано, що вони мають фрактальну структуру, що залежить від висоти зондованого шару. Показано, що оцінювання параметра Херста для виявлення розладки фрактальної структури часових рядів, зокрема, біомедичних сигналів, дає можливість виявлення і моніторингу критичних явищ у складних системах різної природи.

9. Розроблений метод було застосовано для аналізу впливу шахтних вод, що відводяться у акваторію Азовського моря, на стан морської води в районі скиду. Була встановлена відсутність тенденції до зниження мінералізації води, що дозволило зробити адекватний вибір розрахункових умов для прогнозування якості морської води.

10. Результати досліджень були реалізовані в Харківському науково-дослідному інституті екологічних проблем для виявлення забруднень, пов'язаних із скидами шахтних вод; знайшли застосування в акціонерному підприємстві «Енергооблік» щодо аналізу часових рядів для виявлення дефектів, які виникають при тестуванні приладів, розроблюваних на підприємстві; були впроваджені у навчальному процесі в Харківському національному університеті радіоелектроніки, що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

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

3. Об одном методе моделирования самоподобного стохастического процесса / Ж.В. Дейнеко, А.А. Замула, Л.О. Кириченко, Т.А. Радивилова // Вісн. Харк. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Сер. Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2010. – № 890, вип. 13. – С. 53–63.

4. Дейнеко Ж.В. Оценивание параметра Хёрста 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.

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

6. 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. – № 1. – P. 371–388.

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

8. Дейнеко Ж.В. Использование методов корреляционного анализа при оценивании показателя Хёрста с помощью вейвлетов / Ж.В. Дейнеко, Л.О. Кириченко, Т.А. Радивилова // *Системний аналіз. Інформатика. Управління (САГУ-2010)* : Всеукр. наук.-практ. конф., 4–5 берез. 2010 р. : тези доп. – Запоріжжя, 2010. – С. 57–58.

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

10. 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*. : proceedings of the International Conference. – Kyiv, 2010. – P. 9–10.

11. 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.

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

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Kirichenko L. O. Comparative Analysis for Estimating of the Hurst Exponent for Stationary and Nonstationary Time Series / L.O. Kirichenko, T.A. Radivilova,

Zh.V. Deineko // Knowledge – Dialogue – Solution (KDS 2011) : XVII International Conference, September 5–9, 2011. : proceedings of the XVII-th International Conference. – Kyiv, 2011. – P. 5.

17. 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 Міжнар. наук.-техн. конф., 15–16 груд. 2011 р. : матеріали конф. – Київ–Харків, 2011. – С. 48.

АНОТАЦІЯ

Дейнеко Ж.В. Методи аналізу нестационарних самоподібних часових рядів, що засновані на дискретному вейвлет-перетворенні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата 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, 2012.

У ході дисертаційної роботи були розроблені обчислювальні методи аналізу фрактальної структури нестационарних самоподібних часових рядів, що засновані на дискретному вейвлет-перетворенні.

У процесі досліджень було отримано залежності статистичних характеристик вейвлет-оцінок показника Херста від довжини досліджуваного ряду та вибору материнської вейвлет-функції. Показано, що вейвлет-оцінки, отримані за допомогою різних вейвлет-функцій, мають слабку лінійну залежність. Це дозволяє збільшити точність оцінювання, розглядаючи оцінку показника Херста як середнє арифметичне оцінок, отриманих за допомогою декількох різних вейвлет-функцій. Запропоновано метод побудови інтервальних оцінок, характеристики яких ураховують довжину досліджуваного ряду та материнську вейвлет-функцію.

Досліджено вплив трендових та циклічних складових часового ряду на властивості оцінок показника Херста залежно від виду трендової компоненти та параметрів материнських вейвлет-функцій. На підставі результатів досліджень запропоновано підхід до оцінювання, заснований на визначенні відношення фрактального шуму до компонентів ряду та виборі ефективних параметрів вейвлет-функції. Розроблено метод вейвлет-оцінювання показника Херста щодо часових рядів із значними трендовими та циклічними складовими, що заснований на аналізі компонент спектра вейвлет-енергії та виділенні діапазонів частот трендової та циклічної компонент ряду.

Розроблені методи можуть бути використані для аналізу складних динамічних систем різної природи, а також при проведенні моніторингу критичних явищ у системах, що мають властивість самоподібності.

Ключові слова: самоподібний стохастичний процес, показник Херста, дискретне вейвлет-перетворення, нестационарний часовий ряд, спектр вейвлет-енергії, оцінювання показника Херста.

АННОТАЦИЯ

Дейнеко Ж.В. Методы анализа нестационарных самоподобных временных рядов, основанные на дискретном вейвлет-преобразовании. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата 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, 2012.

В результате выполнения диссертационной работы были разработаны вычислительные методы анализа фрактальной структуры нестационарных самоподобных временных рядов, основанные на дискретном вейвлет-преобразовании. Разработанные методы могут быть использованы для анализа сложных динамических систем различной природы, а также при проведении мониторинга критических явлений в системах, обладающих свойством самоподобия.

В работе проведен численный анализ статистических характеристик вейвлет-оценок показателя Хёрста, полученных с помощью дискретного вейвлет-преобразования по временным рядам небольшой длины. Анализ показал, что оценки являются смещенными. Получены зависимости среднего смещения и среднеквадратических отклонений вейвлет-оценок от длины исследуемого ряда и выбора материнской вейвлет-функции. Показано, что вейвлет-оценки, полученные с помощью разных вейвлет-функций, имеют слабую линейную зависимость. Это позволяет увеличить точность оценивания, рассматривая оценку показателя Хёрста как среднее арифметическое оценок, полученных с помощью нескольких разных вейвлет-функций. Предложен метод построения интервальных оценок, характеристики которых учитывают длину исследуемого ряда и материнскую вейвлет-функцию, что особенно важно при малой длине временного ряда, когда точечная оценка показателя Хёрста малонадежна.

В ходе исследования проведен сравнительный анализ вейвлет-метода с другими наиболее известными методами оценивания показателя Хёрста. Было показано, что вейвлет-оценки обладают наименьшим смещением и среднеквадратическим отклонением, предложенный метод имеет значительное преимущество по времени вычислений.

Проведен вейвлет-анализ и оценивание степени самоподобия для временных рядов, содержащих трендовые и циклические составляющие. Показано, что непосредственное удаление трендовой или циклической компоненты ряда приводит к нарушению корреляционных связей и некорректному оцениванию показателя Хёрста. Исследовано воздействие трендовых и циклических составляющих на свойства оценок показателя Хёрста в зависимости от вида трендовой компоненты и параметров материнских вейвлет-функций. Определен диапазон отношения трендовой компоненты к фрактальному шуму, на котором корректно оценивается показатель Хёрста. На основании результатов исследований предложен подход к оцениванию, основанный на определении отношения фрактального шума к компонентам ряда и выборе эффективных параметров вейвлет-функции. Разработан метод вейвлет-оценивания показателя Хёрста для временных рядов со значительными трендовыми и циклическими составляющими, основанный на анализе компонент спектра вейвлет-энергии и выделении диапазонов частот трендовой и циклической компонент ряда.

На основе разработанных методов и их программных реализаций были получены следующие практические результаты. Впервые выполнен фрактальный анализ временных рядов производства и потребления электроэнергии в Украине, выявлены самоподобные свойства исследуемых рядов, что указывает на необходимость использования фрактальных моделей для анализа и прогнозирования данных времен-

ных рядов. Впервые проведено исследование самоподобия сигналов акустического зондирования и показано, что они обладают фрактальной структурой, зависящей от высоты зондируемого слоя. Показано, что оценивание параметра Хёрста для выявления разладки фрактальной структуры временных рядов дает возможность обнаружения и мониторинга критических явлений. На основании разработанных методов был проведен анализ экологических данных с целью выявления загрязнений, связанных с выбросами шахтных вод.

Результаты исследований были реализованы в Харьковском научно-исследовательском институте экологических проблем, в акционерном предприятии «Енергооблік», в учебном процессе в Харьковском национальном университете радиоэлектроники, что подтверждено соответствующими актами.

Ключевые слова: самоподобный стохастический процесс, показатель Хёрста, дискретное вейвлет-преобразование, нестационарный временной ряд, спектр вейвлет-энергии, оценивание показателя Хёрста.

ABSTRACT

Deineko Zh.V. Methods of analysis of nonstationary self-similar time series, based on the discrete wavelet transform. – As the Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Science in Specialization 01.05.02 – Mathematical Modelling and Computational Approaches. – Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science, Youth and Sport of Ukraine, Kharkiv, 2012.

As a result of the thesis have been developed computational methods for analyzing non-stationary self-similar fractal structure of time series based on the discrete wavelet transform.

The dependences of the statistical characteristics of wavelet Hurst exponent estimates of the length of the test series and the choice of the mother wavelet function. It is shown that wavelet estimates obtained by using different wavelet functions that have a weak linear relationship. This allows you to increase the accuracy of estimation, considering the estimate Hurst exponent as the average of estimates obtained by using several different wavelet functions. A method for constructing interval estimates, which take into account the characteristics of the length of the test series and the mother wavelet function.

The influence of trend and cyclical components of time series on the properties of Hurst exponent estimates, depending on the trend components and parameters of the parent wavelet functions. Based on the results of research, an approach to evaluation is based on determining the relationship of the fractal noise to a number of components and the choice of effective parameters of the wavelet function. Developed a method for wavelet estimation of Hurst exponent for time series with significant trend and cyclical components, based on an analysis of the spectral components of the wavelet power and the allocation of frequency bands for the trend and cyclical components of the series.

The developed methods can be used for the analysis of complex dynamic systems of different nature, as well as monitoring of critical phenomena in systems with self-similar.

Key words: self-similar stochastic process, Hurst, discrete wavelet transform, nonstationary time series, wavelet-energy spectrum, Hurst exponent estimation.

Підп. до друку 26.04.2012. Формат 60x841/16. Спосіб друку – різнографія
Умов. друк. арк. 1,2. 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