

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний економічний університет
імені Семена Кузнеця

ТВЕРДОХЛІБ ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 004.9; 519.2

**МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КОМПЛЕКСНОГО
ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ
НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ**

05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькому національному технічному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

кандидат технічних наук, професор
Дубровін Валерій Іванович,
Запорізький національний технічний
університет, професор кафедри програмних
засобів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кіріченко Людмила Олегівна,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, професор кафедри
прикладної математики

доктор технічних наук, професор
Малахов Євгеній Валерійович,
Одеський національний університет імені
І.І. Мечникова, завідувач кафедрою
математичного забезпечення комп'ютерних
систем

Захист відбудеться «27» червня 2018 р. о 15-30 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради К 64.055.03 у Харківському національному
економічному університеті імені Семена Кузнеця за адресою: 61166, м. Харків,
пр. Науки, 9-А

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного
економічного університету імені Семена Кузнеця за адресою: 61145, м. Харків,
пров. Інженерний, 1-А.

Автореферат розісланий «25» травня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 64.055.03
к.т.н., доцент



Лосєв М.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вейвлет-перетворення (ВП) на сьогоднішній день є однією з найбільш перспективних технологій аналізу даних, його інструменти знаходять застосування в самих різних сферах інтелектуальної діяльності. Їх використовують в тих випадках, коли результат аналізу сигналу повинен містити не тільки простий перелік його характерних частот (масштабів), але і відомості про певні локальні координати, при яких ці частоти виявляють себе. На відміну від перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз дозволяє виділяти одночасно як частотну, так і часову компоненти мінливості, тобто дає можливість аналізувати часову зміну частотного спектра процесу. Таким чином, аналіз та обробка нестационарних (в часі) або неоднорідних (в просторі) сигналів різних типів представляють основну область застосування вейвлет-аналізу. Вейвлет-перетворення має рухоме частотно-часове вікно, яке самостійно налаштовується, та однаково добре виявляє як низькочастотні так і високочастотні характеристики сигналу на різних часових масштабах. Вейвлет-фільтри дозволяють не тільки боротися з шумами, але і виділяти необхідні компоненти сигналу. Оскільки вейвлети мають добру частотно-часову адаптацію, вони можуть служити зручним інструментом для дослідження частотних характеристик нестационарного сигналу.

Методи ідентифікації спектральних характеристик сигналів за допомогою вейвлет-перетворення були запропоновані та досліджені Барзинським В.П., Сауковим А.М., Биковою Т.В., Дудко П.Г., Колодяжним В.В., Аврутовою І.В., Корепановим В.В., Воробйовим В., Дреміною І.М., Кайсером Г., J. Lim, M. Padma, C. Runshen та ін. У розробку методів проектування та аналізу материнського вейвлету зробили істотний внесок роботи Ососкова Г., Шитова А.Б., Стадніка А., S. Qian, T. Songu та ін. Можливості вейвлет-аналізу в задачі розподілу близько розташованих сигналів описані в роботах Шитова А.Б., Ільїна А.А., V. Kumar, P. Addison.

Незважаючи на безліч публікацій, пов'язаних з практичним застосуванням вейвлет-перетворення, в даний час залишається невирішеним ряд завдань, пов'язаних з оцінюванням параметрів самого вейвлет-перетворення при дослідженні об'єктів різної природи: вибір параметрів при попередній обробці даних, вибір вейвлет-базису, визначення рівня вейвлет-декомпозиції та ін. Визначення оптимального вейвлет-базису є важливим етапом у вейвлет-аналізі, тому, що саме з цього базису будуть проходити процеси розкладання-складання (декомпозиції та реконструювання) сигналу. На даний час вибір материнського вейвлету носить суб'єктивний характер і ґрунтується на існуючому досвіді. Також однією із задач, ефективно рішення якої широко затребуване у цифровій обробці сигналів, є розкладання вихідного сигналу складної форми на складові, вимога до яких визначається, виходячи із прикладної задачі.

Таким чином, актуальність роботи полягає в розробці сукупності ефективних взаємопов'язаних методів та інформаційної технології комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і

науки України та Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ) в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт «Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень та цифрової обробки даних на основі вейвлет-аналізу» (номер державної реєстрації ДР № 0112U005349), «Моделі, методи та інформаційні технології управління складними об'єктами на основі спектрального аналізу та ризик-орієнтованого прийняття рішень» (номер державної реєстрації ДР № 0113U001098), «Моделі, методи та інформаційні технології прийняття рішень і технічного діагностування» (номер державної реєстрації ДР № 0109U007672), де автор приймав участь як виконавець, розробив і експериментально досліджував методи вейвлет-аналізу нестационарних сигналів різної природи.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності аналізу та діагностування об'єктів різної природи за допомогою розробки методів та інформаційної технології комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення.

Згідно з зазначеною метою треба розв'язати такі задачі:

- провести аналіз існуючих методів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів для вирішення задач аналізу та діагностування об'єктів різної природи;
- розробити метод побудови вейвлет-частотної характеристики;
- створити метод визначення ефективного вейвлет-базису при виконанні вейвлет-перетворення;
- розробити метод вейвлет-декомпозиції сигналу складної форми на незалежні складові;
- запропонувати інформаційну технологію комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів для підвищення якості аналізу та діагностування об'єктів різної природи (в медичній (кардіології) та машинобудівній (фрезеруванні) галузях).

Об'єкт дослідження – процес вейвлет-аналізу нестационарних сигналів зі змінними частотними параметрами у часі.

Предмет дослідження – методи комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач в роботі використовувався математичний апарат вейвлет-перетворення; методи вейвлет-аналізу – для ідентифікації спектральних характеристик сигналу; методи теорії інформації – для визначення інформаційних складових декомпозиційного сигналу; методи математичної статистики – для аналізу розподілу вейвлет-коефіцієнтів сигналу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці нових та вдосконаленні існуючих методів комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів, які забезпечать ефективне застосування вейвлет-аналізу стосовно об'єктів різної природи, а саме:

вперше запропоновано:

метод оптимальної декомпозиції сигналу складної форми, який використовує критерій мінімізації сумарної ентропії вейвлет-коефіцієнтів обох його компонент

при визначенні оптимального рівня декомпозиції, відновлення сигналу за апроксимуючими вейвлет-коефіцієнтами оптимального рівня декомпозиції при визначенні компонент сигналу, що дозволяє розкласти сигнал складної форми на дві незалежні складові, які характеризують певні властивості об'єкту дослідження;

удосконалено:

метод побудови вейвлет-частотної характеристики (ВЧХ), який відрізняється тим, що не застосовує залежності значень середньоквадратичних відхилень вихідного та реконструйованого сигналів у заданому (дослідному) частотному діапазоні, що дозволяє використовувати будь-який вейвлет-базис, не вимагаючи наявності скейлінг-функції вейвлету;

метод визначення ефективного вейвлет-базису при застосуванні апарату вейвлет-перетворення, який на відміну від існуючих використовує в якості критерію вибору мінімізацію параметрів вейвлет-частотної характеристики і дозволяє вибрати оптимальний вейвлет-базис при аналізі сигналу;

подальший розвиток отримали:

методи дослідження електрокардіосигналу (ЕКГ), які використовують процедуру вейвлет-трешолдінгу, порогове значення з апроксимацією сигналу в ділянках QRS-комплексів, нейромережевий класифікатор з виділенням морфології ЕКГ, що дозволили покращити ефективність його аналізу і подальшого діагностування здорових та з патологічними хворобами серця пацієнтів;

метод аналізу профілограм металевих поверхонь, оброблених шляхом фрезерування, який відрізняється тим, що використовує процедуру вейвлет-декомпозиції сигналу складної форми на незалежні складові, що дозволяє виділити профілі хвилястості та шорсткості поверхні.

Практичне значення отриманих результатів.

– усі теоретичні розробки дисертації доведені автором до конкретних методів і покладені в основу функціонування інформаційної технології комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів, а саме щодо аналізу та діагностування об'єктів різної природи в медичній (кардіології) та машинобудівній (фрезеруванні) галузях;

– створено алгоритмічне та програмне забезпечення аналізу профілограм металевих поверхонь (оброблених шляхом фрезерування), що дозволяє виділити профілі хвилястості і шорсткості та обчислювати відповідні параметри згідно діючим стандартам ДСТУ;

– розроблені вейвлет-методи виділення комплексів ЕКГ дозволили покращити ефективність знаходження комплексів, включно Р та Т зубців, обчислити показники варіабельності серцевого ритму (BCP) часової області, будувати скатерограми, ритмограми й гістограми RR-інтервалів, а також на базі яких створено відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення;

– запропоновані в роботі методи дозволили обґрунтовано визначити оптимальний материнський вейвлет (вейвлет-базис) для нестационарних сигналів при виконанні вейвлет-перетворення, провести оптимальну вейвлет-фільтрацію сигналів, розподілити сигнал складної форми на незалежні складові.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в процесі спектрального аналізу нестационарних сигналів. Описані в роботі методи та інформаційна технологія впроваджені в навчальний процес і використовуються при читанні наступних навчальних курсів: в курсі «Теорія прийняття рішень» в Запорізькому національному технічному університеті (акт впровадження від 2016 р.), в курсі «Чисельні методи» в Запорізькому національному університеті (акт впровадження від 2017 р.) та впроваджені в експлуатацію на кафедрі медичної і фармацевтичної інформатики та новітніх технологій в Запорізький державний медичний університет (акт впровадження від 2017 р.) в навчальній і науково-дослідній роботі.

Представлені у роботі експериментальні дослідження та методи аналізу профілограм металевих поверхонь, отриманих шляхом фрезерування, для виділення профілів хвилястості та шорсткості впроваджені на підприємстві ПАТ «МОТОР СІЧ» (акт про використання №УГТ-12/14-10308 від 14.03.17 р.) і використовуються для оцінки якості обробки деталей авіаційних двигунів.

Результати дисертаційного дослідження комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів використовуються на підприємстві ДП «Івченко-Прогрес» (акт про використання від 2017 р.) для обчислення та аналізування параметрів вібросигналу при діагностуванні деталей газотурбінних двигунів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом самостійної роботи автора. Наукові положення, висновки і рекомендації, які становлять суть дисертаційної роботи, були сформульовані, розроблені і досліджені самостійно. За результатами дисертаційної роботи було опубліковано 40 праць. В роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: [1, 10, 11, 13] – розробка методу визначення оптимального вейвлету для аналізу сигналів на основі дослідження його вейвлет-частотної характеристики, [1, 3, 14] – розробка методу розподілу сигналу складної форми на незалежні складові за допомогою ВП та теорії інформації, [11, 12, 15] – розробка ІТ комплексного оцінювання параметрів ВП нестационарних сигналів, [2, 16, 17] – експериментальні дослідження розроблених методів та ІТ для вирішення завдання виділення профілів хвилястості та шорсткості профілограм металевих поверхонь, що оброблені шляхом фрезерування [4–9, 12, 18–20] – експериментальні дослідження розроблених методів та ІТ для вирішення завдання аналізу ЕКГ.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях: 3-й міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу» (Рівно, 2014 р.), на 6–8-й науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2012, 2014, 2016 рр.), на 18–20-й міжнародних наукових конференціях студентів, аспірантів та молодих вчених у Московському державному університеті секції «Обчислювальна математика та кібернетика» (Москва, 2011–2013 рр.), на 17-й міжнародній науково-технічній конференції «Цифрова обробка сигналів та її застосування» (Москва, 2014 р.), на

щорічних науково-практичних конференціях викладачів, наукових працівників, молодих вчених, аспірантів і студентів у Запорізькому національному технічному університеті (Запоріжжя, 2011–2016 рр.), на 15-ому та 16-ому міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.» (Харків, 2011, 2012 рр.), на міжнародній науковій конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (Дніпро, 2014 р.), на міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (Рівно, 2015 р.), на 2-й науково-технічній конференції «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг» (Донецьк, 2011 р.), на 2-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (Запоріжжя, 2011 р.), на міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (Євпаторія, 2013 р.), на 1-й IEEE міжнародній науковій конференції «Data Stream Mining and Processing» (Львів, 2016 р.), 1-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (Житомир, 2015 р.).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано в 40 наукових працях, з яких 9 статей, 8 з яких у наукових спеціалізованих виданнях, що входять до переліку фахових видань України, в яких публікуються результати досліджень з технічних наук, 28 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір та патент на винахід (корисну модель). Загальний обсяг – 12 ум.-друк. арк., з них автору належить 7 ум.-друк. арк.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 137 найменувань (16 стор.) та 3 додатків (17 стор.); містить 24 таблиць і 67 рисунків та має загальний обсяг 160 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, публікації та особистий внесок автора.

Перший розділ дисертації містить аналіз сучасного стану проблеми комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів. Аналіз існуючих методик застосування апарату вейвлет-перетворення провідними вітчизняними та зарубіжними фірмами для управління складними об'єктами і системами показав низку проблем. Однією з проблем є вибір материнського вейвлета (вейвлет-базису) при проведенні вейвлет-аналізу, який визначається окремим завданням, але цей вибір нічим не обґрунтований, має випадковий характер і спирається тільки на досвід і думку самого дослідника. Також не існує обґрунтованого підходу для визначення оптимального рівня декомпозиції сигналу складної форми на незалежні складові. Крім того, залишається невирішеними ряд завдань, пов'язаних з визначенням параметрів самого ВП. Розробка таких взаємопов'язаних методів та реалізація на основі ІТ дозволить

вирішити задачу комплексного оцінювання параметрів ВП нестационарних сигналів. В розділі детально розглянуто спектральний аналіз у частотно-часовій області. Проведено аналіз застосувань вейвлет-аналізу в сучасних дослідженнях. Сформульовано мету та задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі розглянуті принципи роботи вейвлет-перетворення, вейвлет-фільтри. В якості попередньої обробки даних запропоновано використовувати вейвлет-трешолдінг.

Вейвлет-перетворення є згорткою функції вейвлета з сигналом. Іншими словами, вейвлет-перетворення полягає в розкладі сигналу по базису, сконструйованому з функції (вейвлета), що володіє певними властивостями, за допомогою масштабних змін та переносів. Основоположна ідея вейвлет-перетворення – це розбивка приближення до сигналу на дві складові – грубу (апроксимуючу) та уточнюючу (деталізуючу):

– вейвлет-функція *psi* $\psi(t)$ з нульовим значенням інтегралу ($\int_{-\infty}^{\infty} \psi(e) dt = 0$), що

визначає деталі сигналу та породжує деталізуючі коефіцієнти;

– скейлінг-функція (масштабуюча) *phi* $\varphi(t)$ з одиничним значенням інтегралу ($\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(e) dt = 1$), що визначає грубе приближення (апроксимацію) сигналу та породжує

коефіцієнти апроксимації. Ці функції мають лише вейвлети, які відносяться до ортогональних та використовують можливість реконструювати сигнал із швидкими алгоритмами вейвлет-перетворення.

Функція $\psi(t)$ створюється на основі базисної функції $\psi(t)$ та визначає тип вейвлета. Також *psi*-функція повинна забезпечувати виконувати дві основні операції:

– зсув за часом $t - \psi_0(t - b)$ при $b \in R$, де $\psi_0(t)$ – вейвлет;

– масштабування $a^{-1/2} \psi_0\left(\frac{t}{a}\right)$ при $a > 0$ та $a \in R$.

Тоді, неперервне вейвлет-перетворення функції $f(t)$ визначається:

$$W_{a,b}[f(t)] = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

де a – масштаб ВП, b – центр часової локалізації, $\psi(t)$ – материнський вейвлет.

Дискретне ВП використовує масштаби, що кратні ступеню двійки. Для ортогональних вейвлетів застосовується швидке ВП за алгоритмом Малла, що виконує рекурсивне застосування процедури одержання апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів. В результаті цього процесу вихідний сигнал s розкладається на вейвлет-компоненти до заданого рівня декомпозиції, після цього, в ході реконструкції, відновлюється до наближеного сигналу.

Визначення вейвлет-базису для аналізу сигналів є важливим етапом в застосуванні ВП. Для розв'язку цього визначення в роботі запропоновано метод

визначення оптимального вейвлет-базису на основі дослідження ВЧХ. Багато в чому від того, який базис і рівень розкладання буде обраний, залежить результат роботи математичного апарату ВП. При побудові ВЧХ вейвлету спочатку виконується пряме ВП. Після цього обчислюється відношення середньоквадратичних значень коефіцієнтів розкладання і вихідного сигналу. Процедура повторюється для різних частот у заданому інтервалі (від 0 Гц до частоти Найквіста). Описана вище процедура виконується в масштабі ВП, частота якого максимально відповідає заданій досліджуваній частоті сигналу:

$$Freq = \left\{ \frac{(F_{wavelet} \cdot F_{signal})}{A_j} \right\}, j = 2^0 : 2^N, \quad (2)$$

де $F_{wavelet}$ – центральна частота вейвлету, F_{signal} – несуча частота вхідного сигналу, A – масштаб ВП, N – кількість рівнів розкладання ВП.

Для кожної пелюстки ВЧХ можна визначити наступні параметри: ширина смуги пропускання (L_p) головної пелюстки (на рівні -3 дБ), площа бічних пелюсток (S_b), близькість центральної частоти головної пелюстки до частоти досліджуваного сигналу (F_{cs}). Оптимальним вейвлет-базисом назовемо такий вейвлет $w_{opt} = w_i$, для якого досягається:

$$\min(L_p^H, S_b^H, F_{cs}^H), \quad (3)$$

де $w_i^H = \frac{w_i - \bar{w}}{\Delta w}$ ($\bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$, $\Delta w = w_{max} - w_{min}$), H – нормоване значення

відповідного параметру.

Розроблений метод побудови ВЧХ дозволив аналізувати будь-який вейвлет-базис, не вимагаючи наявності скейлінг-функції вейвлету та покладений в основу визначення ефективного вейвлет-базису при застосуванні апарату ВП. Крім обрання вейвлет-базису, визначення рівня декомпозиції є другою важливою складовою при виконанні ВП.

У **третьому розділі** розглянуто задачу вейвлет-розкладання вихідного сигналу складної форми на дві незалежні складові. Розглянуто поняття ентропії, в тому числі інформаційної ентропії і вейвлет-ентропії. Проведено дослідження поведінки ентропії та енергії сигналу на етапах його (сигналу) декомпозиції.

Вейвлет-ентропія (H_s) характеризує посередність, «розмазаність» сигналу та дає критерій того, скільки необхідно ефективних компонент, щоб представити сигнал s у певному базисі:

$$H(s) = \sum_i s_i^2 \log_2(s_i^2). \quad (4)$$

Для вирішення завдання декомпозиції сигналу складної форми на незалежні складові введено правило: першу компоненту сигналу можна отримати, відновивши сигнал вейвлет-перетворенням на певному рівні за апроксимаційними коефіцієнтами; друга компонента отримується шляхом віднімання першої компоненти із загального сигналу.

Метод виділення компонент сигналу складається з наступних етапів:

1. Встановити максимальну дозволена кількість рівнів розкладання сигналу i_{\max} (кількість ітерацій) та початкове значення ітерацій $i = 1$.
2. Обчислити початкове значення ентропії H_s сигналу s за формулою (4), при цьому $H_1 = H_s$.
3. Встановити рівень вейвлет-декомпозиції $i = 2$.
4. Розкласти сигнал s на глибину i , отримуючи першу компоненту (W_i) сигналу.
5. Відняти від сигналу s , що досліджується, першу компоненту W_i , отримавши другу компоненту (R_i) сигналу.
6. Обчислити вейвлет-ентропію для першої і другої компонент сигналу (H_{W_i} и H_{R_i}) за формулою (4).
7. Обчислити сумарну ентропію компонент сигналу: $H_i = H_{W_i} + H_{R_i}$.
8. Якщо $i \leq i_{\max}$ встановити $i = i + 1$ та перейти до кроку 4.
9. Кінець.

За результатами роботи методу буде отримано криву розподілу сумарної вейвлет-ентропії компонент сигналу. Оптимальним рівнем декомпозиції відповідно є той, який надає мінімальне значення вейвлет-ентропії.

Розроблений метод оптимальної декомпозиції сигналу складної форми, який використовує критерій мінімізації сумарної ентропії вейвлет-коефіцієнтів обох компонент при визначенні оптимального рівня декомпозиції, відновлення сигналу за апроксимуючими вейвлет-коефіцієнтами оптимального рівня декомпозиції, що дозволяє розкласти сигнал складної форми на незалежні складові. Таким чином, обґрунтований вибір вейвлет-базису та рівня вейвлет-декомпозиції дозволяє комплексно оцінити параметри ВП, щодо застосування до нестационарних сигналів та бути основою інформаційної технології.

У **четвертому розділі** розроблені методи та інформаційна технологія комплексного оцінювання параметрів ВП нестационарних сигналів практично застосовані в аналізі та діагностуванні об'єктів різної природи, зокрема в медичній (кардіології) та машинобудівній (фрезеруванні) галузях в наступних задачах: виділення профілів хвилястості та шорсткості профілограм металевих поверхонь, виявлення основних комплексів кардіосигналу. Розроблена IDEF0-модель запропонованої ІТ комплексного оцінювання параметрів ВП нестационарних сигналів наведена на рис.1.

Завдання комплексного оцінювання параметрів ВП є неодмінною умовою в застосуванні апарату вейвлет-аналізу і полягає головним чином у визначенні вейвлет-базису та рівня декомпозиції сигналу. Завдяки цим основним параметрам дослідник має можливість проаналізувати сигнал і його складові в

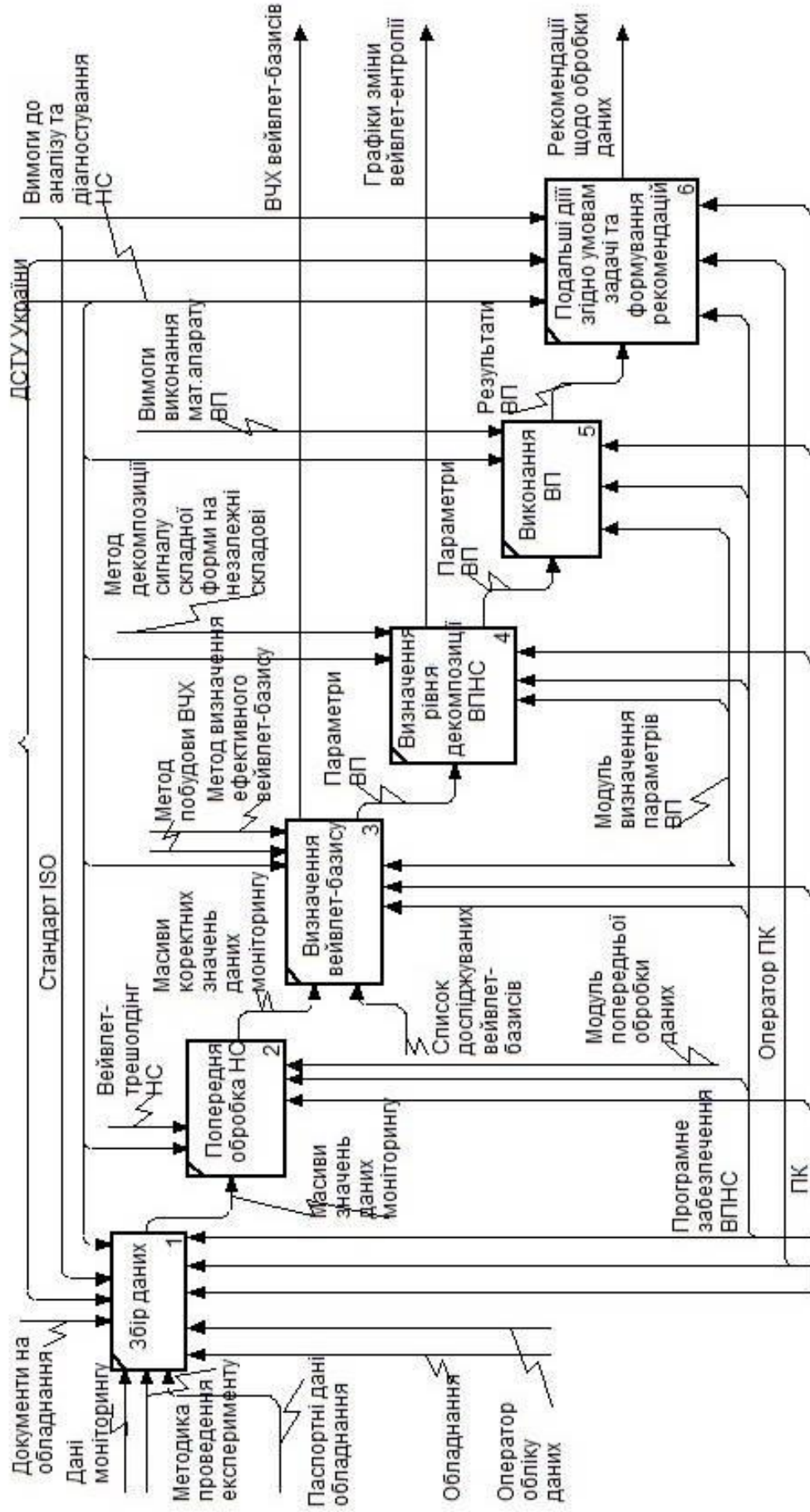


Рис. 1. IDEFO-модель інформаційної технології комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів

певному діапазоні частот. Обґрунтований вибір даних величин дозволяє зрозуміти природу сигналу (даних), що досліджується.

Етап ІТ попередньої обробки вихідного сигналу полягає у видаленні високочастотних компонентів сигналу за допомогою вейвлет-трешолдінгу і представлений у другому розділі дисертації. Визначення параметрів ВП детально розглянуто у вигляді методів та алгоритмів: визначення вейвлет-базису – у другому розділі роботи, визначення рівня декомпозиції для розділення сигналу складної форми на незалежні складові – у третьому розділі дисертації відповідно. Наступними етапами ІТ є безпосередня процедура виконання ВП з обраними параметрами та перехід до подальших дій із сигналом згідно вимогам умов конкретної задачі. В блоці 6 представленої ІТ виконується формування рекомендації згідно з умовами задачі щодо обробки даних. Наприклад, при аналізі профілограм – це виділені профілі хвилястості та шорсткості поверхні та їх обчислювальні параметри.

Задача аналізу електрокардіосигналу складається у виділенні основних комплексів сигналу (P-, QRS- та T-зубців), класифікації та інтерпретації кардіосигналу. Запропоновану в роботі ІТ застосовано до аналізу та інтерпретації сигналу ЕКГ з метою інформаційної допомоги лікарю-кардіологу. ІТ надає користувачу наступні можливості: завантаження ЕКГ-сигналу та відображення його на екрані, розпізнавання характерних елементів ЕКГ, автоматичне розставлення маркерів вузлових точок сигналу, формування анотації ключових точок ЕКГ, автоматичне та ручне вимірювання інтервалів ЕКГ, вимірювання інформативних параметрів ЕКГ, часовий аналіз варіабельності серцевого ритму, подання результатів аналізу в графічній формі, класифікація кардіоциклів ЕКГ, автоматичне формування інтерпретаційного повідомлення.

ІТ складається з набору функцій і графічного інтерфейсу користувача, який дозволяє застосовувати програму для вирішення конкретних завдань. ІТ має ієрархічну структуру і складається з п'яти функціональних модулів, а саме: модуля попередньої обробки сигналу, модуля делінеації сигналу, модуля аналізу варіабельності серцевого ритму, модуля класифікації кардіоциклів, модуля інтерфейсу користувача та візуалізації.

Модуль попередньої обробки сигналу дозволяє виконати передискретизацію сигналу ЕКГ до частоти 250 Гц та використовує процедуру вейвлет-трешолдінгу. Модуль делінеації сигналу призначений для ідентифікації сигналу ЕКГ, тобто визначення положення піків та встановлення меж індивідуальних хвиль QRS-комплексів, P- і T-хвиль ЕКГ. Етап виявлення координат точок ЕКГ включає процедуру знаходження пари коефіцієнтів, які перетинають нульову межу та вибір двох послідовних пар таким чином, щоб між кожною з них знаходився вейвлет-коефіцієнт, що перевищує поріг, який визначається величиною 0,5 від максимального вейвлет-коефіцієнту, а також лінійну апроксимацію ділянок сигналу між точками знайденого комплексу, для покращення пошуку наступного.

Модуль класифікації кардіоциклів призначений для визначення класу для кожного кардіоциклу, за допомогою навченої нейромережі прямого поширення

сигналу. В якості формування навчальної вибірки було використано БД аритмій MIT-BIH Arrhythmia Database Массачусетського технологічного інституту. Морфологічні ознаки ЕКГ використовуються для подання її морфології. Процес відбору морфологічних ознак даного сигналу показано на рис. 2.

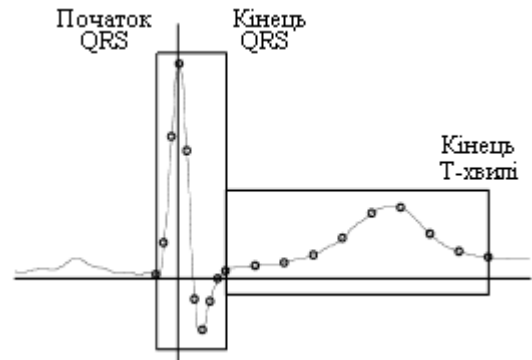


Рис. 2. Виділення морфологічних ознак ЕКГ

Модуль аналізу призначений для обчислення показників ВСР часової області, побудови скатерограми, ритмограми й гістограми RR-інтервалів ЕКГ. В якості класифікатора було обрано двошарову нейронну мережу. Перший шар мережі має 12 нейронів, 2-й – 4 (за кількістю класів кардіоциклів). На входи нейронів 1-го шару надходить 24-елементний вектор ознак кардіоциклу, клас якого необхідно визначити. Виходи нейронів 1-го шару надходять на входи нейронів 2-го шару, а виходи нейронів 2-го шару формують вектор виходів мережі. Цільовий вектор мережі є 4-елементним вектором. Правильно функціонуюча мережа повинна відповісти вектором з одиницею в єдиному елементі вектора виходу, позиція якого відповідає номеру класу представленого екземпляра (табл.). Усі інші елементи вектора виходу повинні бути нулями. В якості функції активації для нейронів обох шарів обрано логістичну сигмоїдну функцію. Для навчання мережі використовувався метод Левенберга-Марквардта зворотнього поширення помилки. Інтерфейс програмної реалізації вейвлет-аналізу кардіосигналу наведено на рис. 3.

Табл. Цільові вектори для різних класів кардіоциклів

Клас кардіоциклу	Цільовий вектор
NOR	[1 0 0 0]
LBBB	[0 1 0 0]
RBBB	[0 0 1 0]
PVC	[0 0 0 1]

Задача аналізу профілограм металевих поверхонь включає виділення профілів хвилястості та шорсткості та визначення їх параметрів з метою оцінки якості обробленої поверхні. Ця задача зводиться до вирішення задачі делінеації сигналу, задачі декомпозиції сигналу складної форми на незалежні складові: хвилястість є низькочастотною складовою сигналу, а шорсткість – високочастотною.

Експериментальні дані були отримані на верстаті FDW-32J у дослідженні зразків сталі Ст. 3, обробленої шляхом фрезерування за паспортними даними верстату. В якості інструмента використовувалась кінцева фреза з одним зубом зі швидкорізальної сталі Р6М5, що дозволяє отримувати постійні характеристики зрізу та уникнути додаткових погрешностей в швидкоплинних процесах, обумовлених часом контакту інструменту з оброблюваним зразком.

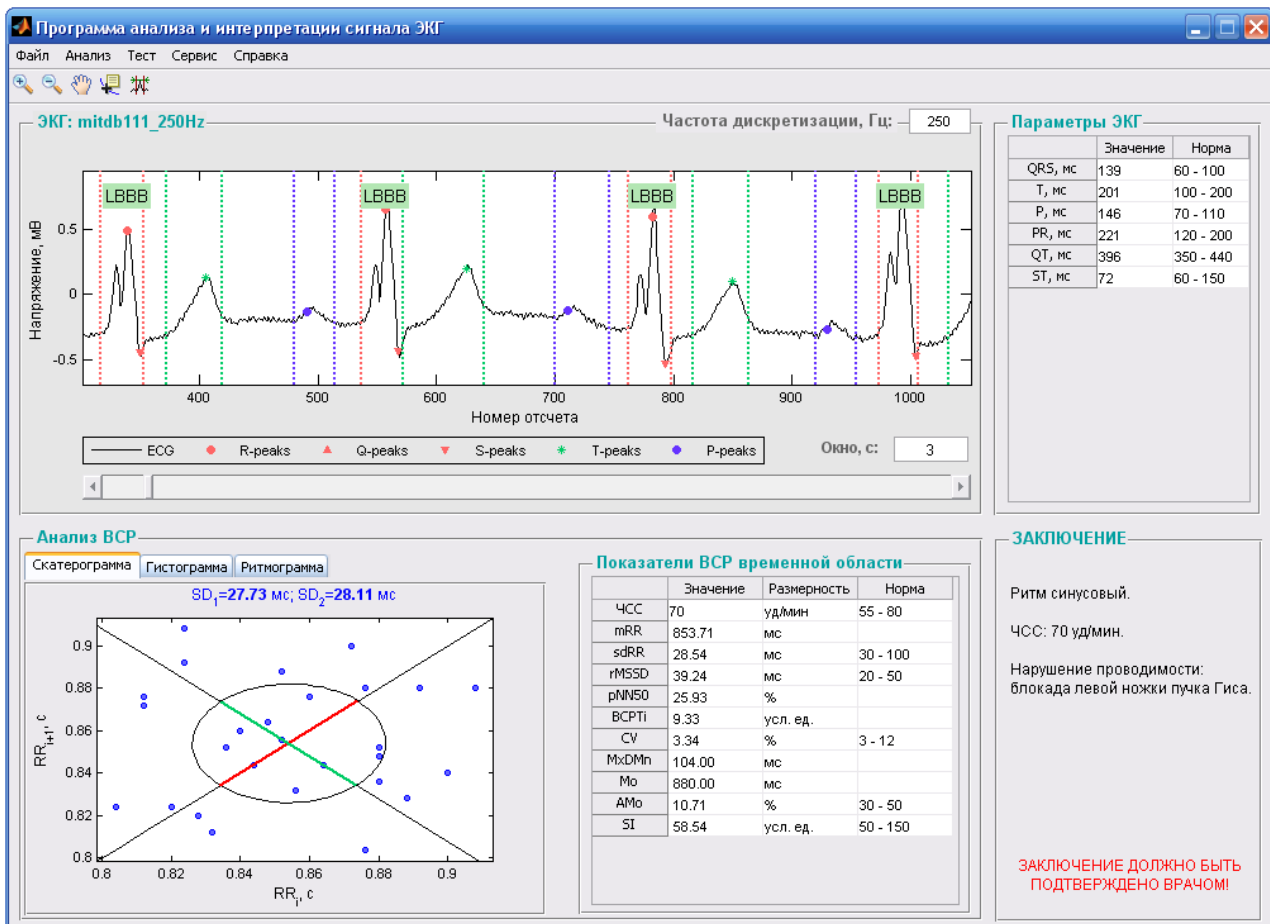


Рис. 3. Інтерфейс програмної реалізації вейвлет-аналізу кардіосигналу

Зразки оброблялися в широкому діапазоні подач і частот обертання інструменту. Після чого записувалась профілограма нерівностей, що виникли в процесі обробки. В процесі використовувалась наступна методика вимірювання профілю поверхні: профілограма поверхні записувалась на профілографі-профілометру Калібр-170311 при швидкості трасування 6 мм/хв на всій довжині зразка. Зразок, за допомогою ручного пресу, кріпився до опорної пластини. Оброблена поверхня встановлювалася паралельно траєкторії руху контактної щупа. АЦП мод. E-140 підключався до аналогового виходу, і сигнал через нього передавався на персональний комп'ютер, в якому запис профілограми проводиться із використанням програмних пакетів «L-Graph» і «Power-Graph».

Діюча методика розподілу вихідного профілю згідно з ДСТУ 4287:2002 «Технічні вимоги до геометрії виробів. Структура поверхні. Профільний метод» і ДСТУ 4288:2002 «Структура поверхні. Профільний метод. Правила і процедури оцінювання структури поверхні» передбачає отримання профілю шорсткості за допомогою цифрового профільного фільтра; при цьому його довжина хвилі відповідає базовій довжині профілю, яку визначають після процедури обчислення ряду параметрів для вихідного профілю. Після цього визначають клас шорсткості для поверхні. Недоліком даної методики є те, що вона залежить від обчислених параметрів для вихідного профілю і, як наслідок, визначений поріг профільного фільтра не може бути точним. Також слід зазначити, що кожен параметр фільтра розподілено на кілька класів шорсткості. В якості альтернативи в дисертаційній

роботі розроблену ІТ застосовано до автоматизованого розділення профілограми на профілі хвилястості і шорсткості та визначення основних їх параметрів згідно діючим стандартам: R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, R_{Sm} – середній крок нерівностей, R_z (R_{10}) – висота нерівностей профілю за 10 точками, R_c – середній крок місцевих виступів профілю, R_t – відносна довжина профілю.

Програмна реалізація складається з набору функцій і графічного інтерфейсу користувача, який дозволяє легко застосовувати програму для вирішення конкретних завдань та має ієрархічну структуру і складається з наступних функціональних модулів: модуля попередньої обробки даних, модуля визначення рівня декомпозиції профілограми, модуля розділення профілограми на профілі та модуля визначення параметрів виділених профілів.

Результати дослідження зразка, отриманого при фрезеруванні з наступними характеристиками: частота обертання шпинделя – 1800 об/хв (30 об/сек), ширина фрезерування – 3,4 мм, подача – 36 мм/хв (0,6 мм/с), глибина різання – 0,5 мм при частоті дискретизації сигналу – 10000 відл/с наведено на рис. 4. За результатами роботи програми, отримані наступні характеристики профілю шорсткості: $R_{10}=7,7944$ мкм, $R_t=9,9972$ мкм, $R_c=0,3140$ мкм, $R_{Sm}=0,0323$ мкм, $R_a=1,24$ мкм; та відповідні параметри для профілю хвилястості: $W_{10}=2,7166$ мкм, $W_t=5,3979$ мкм, $W_c=2,7166$ мкм, $W_{Sm}=4,7497$ мкм, $W_a=1,0147$ мкм.

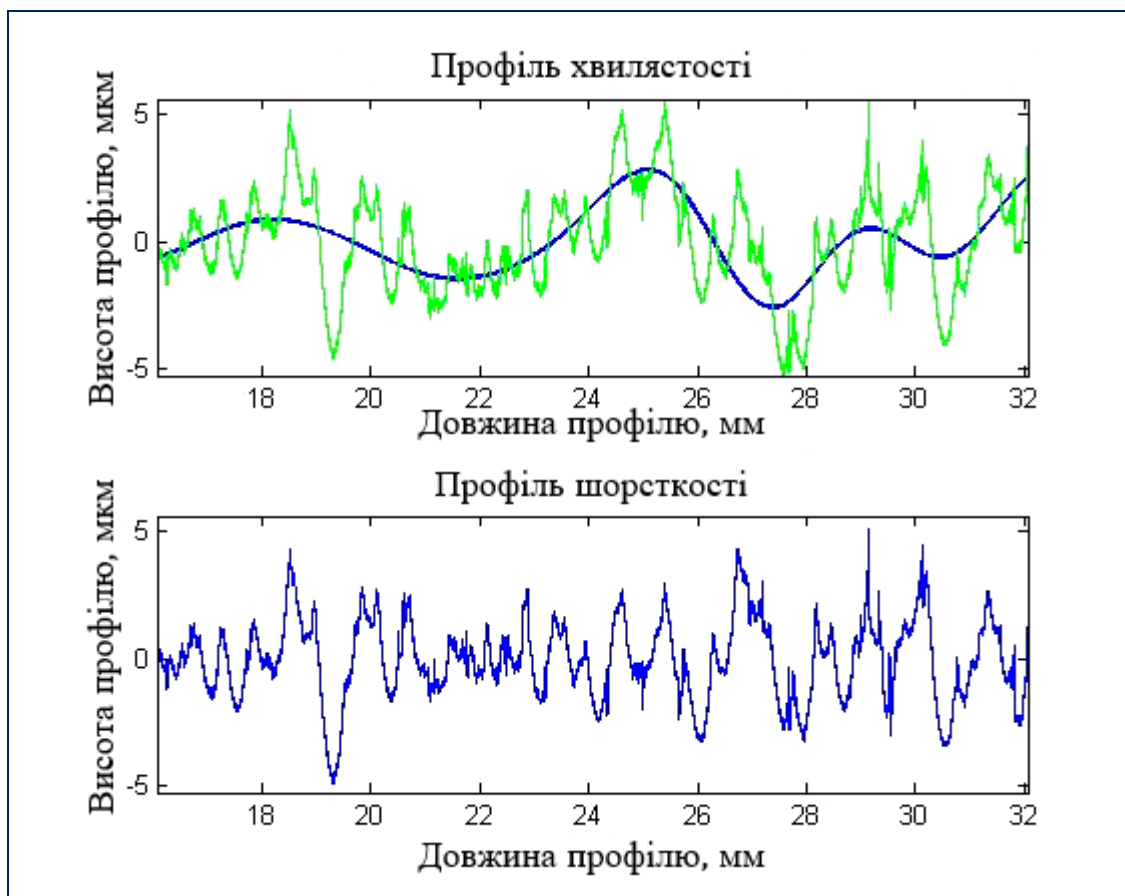


Рис. 4. Автоматизована вейвлет-декомпозиція профілограми на основі ІТ

Результати використання методів та інформаційної технології показали збільшення точності у визначенні параметрів профілю на 5–7%. Відсоток точного виявлення кардіокомплексів ЕКГ в середньому склав 97–98% у здорових пацієнтів і 94–95% у пацієнтів з різними патологіями.

Висновки містять основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

У **додатках** наведено акти впровадження розроблених методів, а також методику проведення експерименту для вирішення задачі оцінки якості поверхні, що оброблена шляхом фрезерування, та результати дослідження зразка профілограми запропонованими у роботі методами.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача розробки методів та інформаційної технології комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів з метою підвищення ефективності аналізу та діагностування об'єктів різної природи. Результати проведених досліджень полягають у наступному.

1. Проведено аналіз існуючих методів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів для задач аналізу та діагностування об'єктів різної природи в медичній (кардіології) та машинобудівній (фрезеруванні) галузях. Виявлено основні проблеми застосування ВП в прикладних дослідженнях.

2. Розроблено метод побудови вейвлет-частотної характеристики, який відрізняється тим, що не застосовує залежності значень середньоквадратичних відхилень вихідного та реконструйованого сигналів у заданому (дослідному) частотному діапазоні, дозволяє використовувати будь-який вейвлет-базис, не вимагаючи наявності скейлінг-функції вейвлету.

3. Створено метод визначення ефективного вейвлет-базису при застосуванні апарату вейвлет-перетворення, який на відміну від існуючих використовує в якості критерію вибору мінімізацію параметрів вейвлет-частотної характеристики (ширина смуги пропускання головної пелюстки, площа бічних пелюсток, близькість центральної частоти головної пелюстки до частоти вихідного сигналу), що дозволяє обрати оптимальний вейвлет-базис при аналізі сигналу. Переваги методу полягають у використанні будь-якого вейвлету для побудови його ВЧХ, не вимагаючи наявності скейлінг-функції і реконструювання сигналу.

4. Розроблено метод оптимальної декомпозиції сигналу складної форми, який використовує критерій мінімізації сумарної ентропії вейвлет-коефіцієнтів обох його компонент при визначенні оптимального рівня декомпозиції, відновлення сигналу за апроксимуючими вейвлет-коефіцієнтами оптимального рівня декомпозиції при визначенні його компонент, що дозволяє розкласти сигнал складної форми на дві незалежні складові, які характеризують певні властивості об'єкту дослідження.

5. Запропоновано ІТ комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів. Дане використання дає змогу підвищити ефективність аналізу та діагностування в машинобудівній (фрезеруванні) галузі для

профілограм металевих поверхонь, оброблених шляхом фрезерування, та в медичній (кардіології) галузі для дослідження ЕКГ. Створено відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення.

Розроблені методи виділення комплексів ЕКГ відрізняються тим, що використовують процедуру вейвлет-трешолдінгу, порогове значення з апроксимацією сигналу в ділянках QRS-комплексів, нейромережевий класифікатор з виділенням морфології ЕКГ, що дозволили покращити ефективність знаходження кардіо-комплексів, включно Р та Т зубців, обчислити показники варіабельності серцевого ритму в часовій області, будувати скатерограми, ритмограми й гістограми RR-інтервалів ЕКГ.

Представлений метод аналізу профілограм металевих поверхонь, оброблених шляхом фрезерування, відрізняється тим, що використовує процедуру вейвлет-декомпозиції сигналу складної форми на незалежні складові, що дозволяє виділити профілі хвилястості та шорсткості.

Експериментальні дослідження підтвердили коректність запропонованих методів та ІТ. Достовірність отриманих практичних результатів підтверджена експериментальними дослідженнями створеного програмного забезпечення. Отримані результати дозволили зробити висновок, що поставлені завдання виконанні та мета досягнута.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Дубровин В. И. Исследование изменений энтропии и энергии на этапах декомпозиции сигнала / Дубровин В. И., Твердохлеб Ю. В. // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2013. – №2 (29). – С. 54–58. (*INSPEC, Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DOI, WorldCat, OAIster, EBSCO, Google Scholar, BASE, Academic Keys, CiteFactor, ADAT, OAJI, SIS, ZDB, Journalindex.net, Research Bible, EZB, UIF, DRJI, JournalTOCs, MIAR, DOAJ, eLibrary.ru / РИНЦ, ВИНИТИ, Україніка наукова, Джерело, УРАН*)

2. Твердохлеб Ю. В. Метод выделения профилей волнистости и шероховатости профилограмм металлических поверхностей с помощью вейвлет-анализа / В. И. Дубровин, П. А. Каморкин, Ю. В. Твердохлеб // Адаптивные Системы Автоматического Управления. Межведомственный научно-технический сборник. – 2015. – № 1(26). – С. 26–31. (*Google Scholar, ISSN, NBUV, ELAKPI, eLibrary, Джерело, Україніка наукова, WorldCat, OpenAIRE*)

3. Твердохлеб Ю. В. Обработка видеоряда спортивных игр с использованием фильтра Габора / В. И. Дубровин, Ю. В. Твердохлеб, Д. В. Панченко // Радиоэлектроника и информатика. – 2014. – № 1(64). – С. 46–49. (*Index Copernicus, Google Scholar, OAJI, CiteFactor, ISSN, NBUV, Перечень-изданий.ru, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIB UB, I2OR, eLibrary*)

4. Дубровін В. І. Огляд методів вейвлет-перетворення для аналізу фоно- та електрокардіограм / Дубровін В. І., Твердохліб Ю. В., Рашавченко А. В. // Бионика интеллекта. – 2013. – №2(81). – С. 87–92. (*Google Scholar, ISSN, NBUV*)

5. Dubrovin V. I. R-peaks detection using wavelet technology / V. I. Dubrovin, J. V. Tverdohleb, V. V. Kharchenko // *Радиоелектроника, информатика, управління.* – 2013. – №2 (29). – С. 126–129. (*INSPEC, Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DOI, WorldCat, OAIster, EBSCO, Google Scholar, BASE, Academic Keys, CiteFactor, ADAT, OAJI, SIS, ZDB, Journalindex.net, Research Bible, EZB, UIF, DRJI, JournalTOCs, MIAR, DOAJ, eLibrary.ru / РИНЦ, ВИНІТИ, Україніка наукова, Джерело, УРАН*)

6. Твердохлеб Ю. В. Автоматизированная система анализа и интерпретации ЭКГ / В. И. Дубровин, Ю. В. Твердохлеб, В. В. Харченко // *Радиоелектроника, информатика, управління.* – 2014. – №1(30). – С. 150–156. (*INSPEC, Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DOI, WorldCat, OAIster, EBSCO, Google Scholar, BASE, Academic Keys, CiteFactor, ADAT, OAJI, SIS, ZDB, Journalindex.net, Research Bible, EZB, UIF, DRJI, JournalTOCs, MIAR, DOAJ, eLibrary.ru / РИНЦ, ВИНІТИ, Україніка наукова, Джерело, УРАН*)

7. Твердохлеб Ю. В. Метод обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигнала на основе вейвлет-трешолдинга / Ю. В. Твердохлеб, В. И. Дубровин // *Бионика интеллекта.* – 2011. – №1(75). – С. 98–01. (*Google Scholar, ISSN, NBUV*)

8. Твердохлеб Ю. В. Усовершенствование методов анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения / Ю. В. Твердохлеб, В. И. Дубровин // *Радиоелектроника, информатика, управління.* – 2011. – №1(24). – С. 91–98. (*INSPEC, Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DOI, WorldCat, OAIster, EBSCO, Google Scholar, BASE, Academic Keys, CiteFactor, ADAT, OAJI, SIS, ZDB, Journalindex.net, Research Bible, EZB, UIF, DRJI, JournalTOCs, MIAR, DOAJ, eLibrary.ru / РИНЦ, ВИНІТИ, Україніка наукова, Джерело, УРАН*)

9. Tverdohleb J. V. Processing of ECG signals based on wavelet transformation / J. V. Tverdohleb, V. I. Dubrovin // *International journal of advanced science and technology.* – 2011. – Vol. 30. – P. 73–81. (*Ulrich's Periodicals Directory, EBSCO, ProQuest, DOAJ, OpenJ-Gate, Cabell Publishing*)

Патент на винахід (корисну модель)

10. Пат. 90102 Україна, МПК6 G01R 23/16. Спосіб визначення оптимального вейвлету для аналізу сигналів на основі дослідження його амплітудно-частотної характеристики [Текст]/ В. І. Дубровін, Ю. В. Твердохліб; заявник і патентовласник: Запорізький національний технічний університет. – заявл. 20.12.13; опубл. 12.05.14, Бюл. №9.,3с.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір

11. Комп'ютерна програма «Аналіз частотних складових вейвлет-базису»: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60630 / Ю. В. Твердохліб, В. І. Дубровін. – Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 14.07.2015.

12. Комп'ютерна програма «Аналіз та інтерпретація електрокардіографічного сигналу»: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 56325 / Ю. В. Твердохліб, В. І. Дубровін. – Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 05.09.2014.

Друковані тези, доповіді та інші матеріали наукових конференцій

13. Твердохлеб Ю. В. Метод определения оптимального вейвлета на основе исследования его АЧХ / Ю. В. Твердохлеб // Ломоносов-2012: Сборник тезисов 19 международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (секция «Вычислительная математика и кибернетика»). – Москва: МГУ, 2012. – С. 149–151.

14. Твердохлеб Ю. В. Метод вейвет-разделения сигнала сложной формы на независимые составляющие // В. И. Дубровин, Ю. В. Твердохлеб // Сборник докладов 17 международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2014)». – Москва: РНТОРЕС имени А.С. Попова, 2014. – Т. 2. – С. 722–725.

15. Твердохлеб Ю. В. Информационные технологии анализа нестационарных сигналов / В. И. Дубровин, Ю. В. Твердохлеб // Сборник тезисов 3 международной научно-практической конференции «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу». – Ровно: НУВГП, 2014. – С. 50–51.

16. Твердохлеб Ю. В. Вейвлет-преобразование в задаче исследования профилограмм металлических поверхностей / В. И. Дубровин, Ю.В. Твердохлеб // Сборник тезисов научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении». – Днепр: НметАУ, 2014. – С. 6–7.

17. Твердохлеб Ю. В. Вейвлет-преобразование в задаче разделения профиля поверхности / Ю. В. Твердохлеб // «Ломоносов-2013»: Сборник тезисов XX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (секция «Вычислительная математика и кибернетика»). – Москва: МГУ, 2013. – С.61–62.

18. Твердохлеб Ю. В. Использование вейвлет-трешолдинга при анализе электрокардиограмм / Ю. В. Твердохлеб // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XV международного молодежного форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – Т. 1. – С. 214–215.

19. Твердохлеб Ю. В. Увеличение точности при обнаружении Р и Т комплексов кардиосигнала / Ю. В. Твердохлеб, В. И. Дубровин // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI-2013): Материалы международной научной конференции. – Евпатория, 2013. – С. 116–117.

20. Твердохлеб Ю. В. Методика анализа ЭКГ-сигнала на основе вейвлет-преобразования / Ю. В. Твердохлеб // «Ломоносов-2011»: Сборник тезисов 18 международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (секция «Вычислительная математика и кибернетика»). –Москва: МГУ, 2011. – С. 22–23.

За темою дисертації опубліковано також 20 наукових праць інших матеріалів конференцій.

АНОТАЦІЯ

Твердохліб Ю.В. Методи та інформаційна технологія комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробці нових та вдосконаленню існуючих методів комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів та інформаційної технології (ІТ), що забезпечують ефективне застосування математичного апарату вейвлет-аналізу щодо об'єктів різної природи.

Розроблено метод оптимальної декомпозиції сигналу складної форми, який використовує критерій мінімізації сумарної ентропії вейвлет-коефіцієнтів обох компонент. Удосконалено метод побудови вейвлет-частотної характеристики, що дозволяє використовувати будь-який вейвлет-базис, не вимагаючи наявності скейлінг-функції вейвлету. Удосконалено метод визначення ефективного вейвлет-базису, який використовує в якості критерію вибору мінімізацію параметрів вейвлет-частотної характеристики.

Розроблені методи та інформаційна технологія комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів практично застосовані в наступних задачах: задача виділення профілів хвилястості та шорсткості профілограм металевих поверхонь, задача виявлення основних комплексів кардіосигналу. Результати роботи методів показали збільшення точності в оцінці визначення якості обробки поверхні та в підвищенні виявлення комплексів кардіосигналу. Достовірність отриманих практичних результатів підтверджена експериментальними дослідженнями створеного програмного забезпечення.

Ключові слова: спектральний аналіз, вейвлет-перетворення, материнський вейвлет, оптимальний вейвлет-базис, делініяція сигналу.

АННОТАЦИЯ

Твердохлеб Ю.В. Методы и информационная технология комплексного оценивания параметров вейвлет-преобразования нестационарных сигналов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, Харьков, 2018.

Диссертационная работа посвящена разработке новых и усовершенствованию существующих методов комплексного оценивания параметров вейвлет-преобразования нестационарных сигналов и информационной технологии, которые обеспечат эффективное использование математического аппарата вейвлет-анализа применительно к объектам разной природы.

Разработан метод построения вейвлет-частотной характеристики (ВЧХ), который не использует зависимости значений среднеквадратических отклонений выходного и реконструированного сигналов в заданном (исследовательском)

частотном диапазоне, позволяет анализировать любой вейвлет-базис, не требуя наличия скейлинг-функции вейвлета.

Представлен метод определения эффективного вейвлет-базиса при применении аппарата вейвлет-преобразования, который использует в качестве критерия выбора минимизацию параметров вейвлет-частотной характеристики (ширина полосы пропускания главного лепестка, площадь боковых лепестков, близость центральной частоты главного лепестка с частотой выходного сигнала) и позволяет выбрать оптимальный вейвлет-базис при анализе сигнала. Преимущества метода заключаются в использовании любого вейвлета для построения его ВЧХ, не требуя наличия скейлинг-функции и реконструкции сигнала.

Создан метод оптимальной декомпозиции сигнала сложной формы, который использует критерий минимизации суммарной энтропии вейвлет-коэффициентов обеих его компонент при определении оптимального уровня декомпозиции, восстановление сигнала аппроксимирующими вейвлет-коэффициентами оптимального уровня декомпозиции при определении его компонент и позволяет разложить сигнал сложной формы на две независимые составляющие, характеризующие определенные свойства объекта исследования.

Предложено ИТ комплексной оценки параметров вейвлет-преобразования нестационарных сигналов. Данное использование позволяет повысить эффективность анализа и диагностирования в машиностроительной (фрезеровании) области для профилограмм металлических поверхностей, обработанных путем фрезерования, и в медицинской (кардиологии) области для исследования электрокардиографического сигнала (ЭКГ). Создано соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение.

Разработанные методы выделения комплексов ЭКГ используют процедуру вейвлет трешолдингу, пороговое значение с аппроксимацией сигнала в участках QRS-комплекс, нейросетевой классификатор с выделением морфологии ЭКГ и позволяют повысить эффективность нахождения кардиокомплексов, включая Р и Т зубцов, вычислить показатели variability сердечного ритма в временной области, строить скатерограммы, ритмограммы и гистограммы RR-интервалов ЭКГ.

Представленный метод анализа профилограмм металлических поверхностей, обработанных путем фрезерования, использует процедуру вейвлет-декомпозиции сигнала сложной формы на независимые составляющие и позволяет выделить профили волнистости и шероховатости.

Экспериментальные исследования подтвердили корректность предложенных методов и ИТ. Достоверность полученных практических результатов подтверждена экспериментальными исследованиями созданного программного обеспечения. Результаты предложенных методов показали увеличение точности в оценке определения качества обработки поверхности и в повышении обнаружения комплексов кардиосигнала.

Ключевые слова: спектральный анализ, вейвлет-преобразование, материнский вейвлет, оптимальный вейвлет-базис, делиниация сигнала.

ANNOTATION

Tverdokhlib J.V. Methods and information technology of complex estimation of wavelet transform parameters of a non-stationary signal. – Manuscript.

Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Candidate of Engineering, specialty 05.13.06 – information technologies at Kharkiv National University of Economics them. Semen Kuznets, Kharkiv, 2018.

Originality of the obtained findings consist in developing new and improving existing methods and information technology of complex estimation of wavelet transform parameters of non-stationary signal which will ensure the effective application mathematical tool / use of mathematical apparatus wavelet analysis of wavelet analysis for signals a different nature.

Building method of wavelet-frequency response was improved and it allows to use any wavelet basis without necessity usage of wavelet scaling function. Wavelet basis determination method was improved. Optimization allows to measure minimal values of next parameters: passband bandwidth of the main lobe, side lobe area, correspondence between the main lobe resonance frequency and input signal frequency. The method of optimal decomposition of complex shape signals has been developed. It uses the criterion of minimization of total entropy of wavelet coefficients of both components of signal.

Developed methods for integrated estimation of wavelet transform parameters of non-stationary signals practically applied in the following problems: the problem of allocation the waviness and the roughness profiles of profilograms of metal surfaces, the problem detection of detecting the main cardiac signal complexes. The results of the methods showed increased accuracy in evaluation of determination of surface quality and detection of cardiac signal complexes. The reliability of the obtained results is confirmed by experimental researches of the created software.

Keywords: Spectral analysis, wavelet transformation, mother wavelet, optimal wavelet basis, delineation of signal.