

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ЛАГУН ІЛОНА ІГОРІВНА



УДК 681.325:004.38

**МЕТОДИ ЕФЕКТИВНОГО ВИБОРУ БАЗОВИХ ФУНКЦІЙ
ДЛЯ ЧАСО-ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному університеті “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Наконечний Адріан Йосифович,
завідувач кафедри комп’ютеризованих
систем автоматички
Національного університету “Львівська політехніка”,
м. Львів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Воробель Роман Антонович,
завідувач відділу інтелектуальних технологій і
систем діагностики Фізико-механічного
інституту ім.Г.В.Карпенка НАН України,
м. Львів

доктор технічних наук, доцент
Клименко Ірина Анатоліївна,
професор кафедри обчислювальної техніки
факультету Інформатики та обчислювальної техніки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
м.Київ.

Захист відбудеться «29» березня 2019 року о 16 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 28а, ауд. 711 V навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою 79013, Львів-13, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “28” лютого 2019 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.08, д.т.н., проф.



Я.Т. Луцик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Актуальним напрямком розвитку сучасних комп'ютерних систем є аналіз, оброблення, зберігання та передавання інформації, представленої за допомогою різних типів сигналів. Однак для аналізу та опрацювання сигналів, частота яких змінюється в часі, звичайний спектр є переважно малоінформативним. З огляду на це, широкого розповсюдження набули методи часо-частотного представлення сигналів, найпоширеніші з яких використовують малохвильове (вейвлет) перетворення (МП). При цьому ефективність представлення сигналів у малохвильовій області, їх аналіз та опрацювання суттєво залежать від вибору базових функцій, які при цьому використовуються. Ефективний вибір таких функцій забезпечує необхідну точність апроксимації інформативних сигналів у часо-частотній області, дозволяє реалізувати якісну декомпозицію і зосередити енергію сигналу в невеликій кількості значущих ненульових коефіцієнтів.

На сьогоднішній день процедура вибору базових малохвильових функцій (МФ) недостатньо досліджена і у більшості випадків відбувається необґрунтовано. У переважній більшості, при виборі базової МФ, враховуються такі характеристики, як розмір носія, кількість нульових моментів та гладкість базових функцій. Проте, вказані властивості надають лише математичний опис базових МФ, який не дозволяє отримати явних рекомендацій щодо їх практичного застосування для аналізу та опрацювання різних типів сигналів. Тому, з метою пошуку оптимальних МФ в сучасній техніці обробки сигналів використовуються підходи, в основі яких лежать енергетичні, кореляційні та інформаційні критерії.

Теоретичні дослідження та практичні застосування існуючих підходів до вибору оптимальних МФ для відповідних типів сигналів проводилися в таких галузях, як медична діагностика, біомедична інженерія, вібродіагностика, дефектоскопія, ультразвукова діагностика, енергетика та системна інженерія. Однак, на даний час не існує ніяких узагальнених рекомендацій та практичних підходів для вибору материнських малохвильових функцій для широкого кола сигналів.

З огляду на це, актуальним є наукове завдання визначення ефективності існуючих та пошуку нових методів та алгоритмів ефективного вибору базових малохвильових функцій для сигналів, інструментарієм аналізу й опрацювання яких є малохвильове перетворення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри «Комп'ютеризовані системи автоматики» – «Комп'ютеризовані системи автоматики та їх компоненти: принципи побудови, моделювання, методи аналізу і синтезу». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт: «Розроблення методів та засобів цифрової обробки інформації на базі її малохвильового (вейвлет) перетворення», (номер державної реєстрації 0109U008855), яка виконувалась з 02.07.2010р. по 10.12.2012р.; ДБ/КІБЕР «Розроблення методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кіберфізичних систем» за науковим напрямом «Розроблення методів та засобів цифрового опрацювання одно- та багатовимірних неперіодичних сигналів представлених у різних областях перет-

ворення», (номер державної реєстрації 0115U000446), яка виконувалася з 1.01.2015 р. по 31.12.2017 р.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні ефективності вибору базових малохвильових функцій, які б забезпечували високу точність подання і швидкодію перетворення сигналів у часо-частотній області та дозволяли зосередити енергію сигналу в невеликій кількості значущих коефіцієнтів. Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

- провести класифікацію різних типів сигналів та існуючих базових малохвильових функцій;
- здійснити аналіз та вибрати методи та засоби представлення сигналів в малохвильовій області;
- провести аналіз існуючих методів вибору базових малохвильових функцій;
- удосконалити існуючі та розробити нові методи вибору базових малохвильових функцій;
- дослідити ефективність запропонованих методів, алгоритмів та критеріїв вибору базових малохвильових функцій;
- провести комп'ютерне моделювання алгоритмів вибору базових малохвильових функцій.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення та опрацювання неперіодичних одновимірних сигналів

Предмет дослідження – методи перетворення та опрацювання цифрових сигналів з використанням часо-частотної області.

Методи дослідження – методи цифрової обробки сигналів, методи математичного аналізу, методи оптимізації, теорії рядів і цифрової фільтрації, спектрального та малохвильового (вейвлет) аналізів, математичне та комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі проведених теоретичних та практичних досліджень отримано такі наукові результати:

1. Вперше розроблено метод багатокритеріальної оптимізації вибору базових малохвильових функцій для опрацювання одновимірних неперіодичних сигналів, який на відміну від відомих базується на основі апарату нечіткої логіки, що дозволило підвищити ефективність вибору базових малохвильових функцій.

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано використання універсального індексу якості сигналу як нового критерію вибору базових малохвильових функцій, який на відміну від відомих дозволяє здійснювати вибір базових малохвильових функцій на основі сукупності оцінок корельованості, зміни середнього значення та динамічного діапазону опрацьованого сигналу, що дозволило підвищити якісні характеристики малохвильового перетворення в процесі очищення сигналів від шуму.

3. Удосконалено метод вибору базових малохвильових функцій з використанням генетичного алгоритму на основі досягнення максимальної ефективності результатів опрацювання сигналів, який відрізняється від відомих використанням критерію універсального індексу якості сигналу, що дало змогу підвищити ефективність очищення сигналів від шуму.

4. Отримали подальший розвиток методи оцінки ефективності вибору малохвильових базових функцій за критерієм співвідношення енергії малохвильових коефіцієнтів та ентропії розподілу енергії Шеннона, який відрізняється від відомих використанням співвідношення норми енергії коефіцієнтів апроксимації до ентропії детальних коефіцієнтів; за критерієм оцінки коефіцієнта взаємної кореляції, який на відміну від існуючого використовує взаємну кореляцію між аналізованим сигналом та малохвильовими коефіцієнтами; за інформаційним критерієм, який відрізняється від відомих використанням співвідношення взаємної інформації до відносної ентропії аналізованого сигналу, що дозволило зосередити енергію сигналу в невеликій кількості значущих коефіцієнтів, забезпечити необхідну точність апроксимації та найбільш повне представлення сигналів у часо-частотній області.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено нові та удосконалено існуючі методи та алгоритми ефективного вибору базових МФ, які можуть бути використані для розроблення та удосконалення апаратно-програмних засобів опрацювання сигналів у спеціалізованих комп'ютерних системах, комп'ютеризованих системах діагностування та контролю параметрів процесів і середовищ, системах для вимірювання параметрів випадкових процесів і полів, системах ідентифікації сигналів, системах автоматичного контролю технологічних процесів та ін., що дозволить підвищити ефективність опрацювання сигналів, в тому числі зображень та відеосигналів, з огляду на підвищення швидкодії передачі таких сигналів та якісного їх перетворення у часо-частотній області.

Отримані практичні результати полягають в тому, що розроблена модель багатокритеріальної оптимізації вибору базової МФ дозволяє вирішити проблему неоднозначності вибору оптимальної МФ та підвищити ефективність представлення сигналів у малохвильовій області, їх аналіз та опрацювання. Розроблені та вдосконалені методи з використанням енергетичних, кореляційних та інформаційних критеріїв підвищили ефективність вибору базових функцій як в часовій, так і в часо-частотній областях. Розроблений метод з використанням генетичного алгоритму та універсального індексу якості сигналу забезпечує можливість зменшення рівня шуму у сигналі в межах 4-10 % у порівнянні з методом оптимізації на основі оцінки середньоквадратичної похибки. Використання методу вибору базової МФ на основі інформаційного критерію дозволяє підвищити точність реконструкції сигналу на 15-20% у порівнянні з використанням енергетичного та кореляційного критеріїв. Розроблене програмне забезпечення для вибору базової МФ, дозволяє використовувати його в апаратно-програмних засобах опрацювання сигналів в комп'ютерних системах.

Проведені автором дослідження використані для практичних розробок в рамках науково-дослідної роботи ДБ/КІБЕР «Розроблення методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кіберфізичних систем» за науковим напрямом «Розроблення методів та засобів цифрового опрацювання одно- та багатовимірних неперіодичних сигналів представлених у різних областях перетворення»; теоретичні та практичні результати використані в курсі лекцій «Цифрові методи обробки сигналів та зображень», який читається для студентів спеціальностей «Комп'ютерні науки» та «Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології» Національного університету «Львівська політехніка», а також при виконанні магістерських робіт і наукових досліджень аспірантів.

Отримані теоретичні та експериментальні результати є основою для подальшого розвитку існуючих та розробки нових методів вибору базових малохвильових функцій для опрацювання як одновимірних, так і багатовимірних сигналів у комп'ютерних системах.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати досліджень дисертації одержані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: [1, 7, 13] – застосування апарату нечіткої логіки для побудови системи багатокритеріальної оптимізації ефективного вибору базових МФ; [2] – аналіз, класифікація сигналів та формулювання загальних рекомендації щодо опрацювання різних типів сигналів; [3] – визначення оцінки ентропії розподілу квадратів модулів малохвильових коефіцієнтів (МК), як основного критерію вибору МФ; [4, 12] – визначення ефективності вибору базових МФ за критерієм мінімального середньоквадратичного відхилення та ентропійного критерію; [5] – використання генетичного алгоритму для пошуку оптимальних базових МФ в процесі очищення сигналів від шуму; [6] – дослідження ефективності енергетичного, інформаційного та кореляційного критеріїв; [8, 15] – визначення впливу типу базової МФ на якість нанесення цифрових водяних знаків; [9] – визначення доцільності використання індексу структурної подібності для оцінки результатів фільтрації зображень; [10] – визначення впливу різних базових МФ на якість фільтрації зображень; [11] – можливість застосування індексу структурної подібності як критерію вибору базових МФ; [14] – застосування дискретного малохвильового перетворення (ДМП) для виявлення аномалій трафіку у комп'ютерних мережах.

Апробація результатів дисертації. За результатами досліджень були представлені доповіді на таких конференціях: I Міжнародна конференція з автоматичного управління та інформаційних технологій «ICACIT-2011» (м. Львів, 15-17 грудня, 2011 р.); XI Міжнародна наукова конференція з контролю і управління в складних системах «КУСС-2012», (м. Вінниця, 9-11 жовтня, 2012 р.); II Міжнародна науково-технічна конференція «Захист інформації та безпека інформаційних систем» (м. Львів, 30 травня - 1 червня 2013 р.); The Second International Conference on Automatic Control and Information Technology (ICACIT-2013, Cracow, Poland, December 7-8, 2013); 3-тя Міжнародна конференція з автоматичного управління та інформаційних технологій, (м. Київ, 11-13 грудня 2015 р.), The Fourth International Conference on 'Automatic Control and Information Technology' (ICACIT-2017, Cracow, Poland, December 13-16, 2017).

Публікації. Результати досліджень опубліковані у 15 наукових працях, що повністю відображають основні результати дисертації, з них 7 статей у наукових фахових виданнях України, з них 1 стаття у науковому фаховому виданні України, яке включене до міжнародних наукометричних баз [1], 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, одна з яких у виданні, яке включене до міжнародних наукометричних баз [6, 7].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 110 на-

йменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації 175 сторінок, з яких основний текст викладено на 136 сторінках друкованого тексту, містить 74 рисунки, 10 таблиць та список використаних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Вказано зв'язок роботи з науковими програмами та НДР за місцем виконання роботи. Надано інформацію щодо кількості публікацій та апробації результатів дисертації.

У першому розділі проведено аналіз методів подання сигналів в часовій, частотній та часо-частотній областях, розроблено класифікацію сигналів та можливих способів їх опрацювання, відзначено ефективність МП для аналізу неперіодичних сигналів, які змінюються в широкому діапазоні частот.

Показано, що усі МФ мають властивості локалізації за часом та за частотою, рівність нулю середнього значення функції, властивість самоподібності та коливний характер і дозволяють концентрувати увагу на тих чи інших локальних особливостях аналізованих процесів.

Відзначено, що подальші розробки у дисертаційному дослідженні базуються на використанні методів ДМП, підвищення якісних показників якого, вимагає розробки нових методів ефективного вибору базових МФ для опрацювання неперіодичних сигналів.

У другому розділі роботи розглянуто особливості формування та вибору базових МФ для опрацювання одновимірних сигналів, розроблена класифікація базових МФ, проведено аналіз алгоритму швидкого МП, алгоритмів фільтрації та компресії сигналів на основі МП, сформульовано основні критерії для оцінки ефективності МП.

Показано, що при застосуванні МП використовується властивість базових МФ ефективно апроксимувати деякі класи сигналів із використанням незначної кількості ненульових коефіцієнтів. Така ситуація виникає при аналізі, синтезі та опрацюванні сигналів, зокрема при стисненні, фільтрації або швидких обчисленнях. З огляду на це, формування МФ $\psi(t)$ повинно відбуватися з використанням максимальної кількості малохвильових коефіцієнтів (МК), які наближаються до нуля. В цьому випадку перетворений сигнал має декілька значущих МК і більшість майже нульових, що вказують на високу роздільну здатність.

Визначено, що найбільший вплив на вибір МФ мають розмір носія, кількість нульових моментів та гладкість функцій. Розмір носія функції і кількість нульових моментів є незалежними величинами. Встановлено, що розмір носія впливає на похибку апроксимації сигналів у часо-частотній області, особливо для скінченних їх функціональних залежностей.

Відзначається, що на даний час існує достатньо багато типів МФ. Загальна класифікація базових МФ представлена наступним чином:

- «грубі» – функції Гауссового типу, Морле і «мексиканського капелюха» (МНАТ);
- нескінченні регулярні – безперервні функції Мейера;

– ортогональні з компактним носієм – малохвильові функції сімейств Добеші, Симлет і Койфлет;

– біортогональні МФ з компактним носієм – B -сплайнові малохвильові функції;

– комплексні МФ з мінімальними властивостями. До них відносяться функції Гауса, Морле, Шеннона і частотні B -сплайнові малохвильові функції.

Встановлено, що існує більше однієї материнської МФ з однаковими властивостями, які надають лише математичний опис базових функцій, що не дозволяє отримати явних рекомендацій щодо їх практичного застосування для аналізу та опрацювання різних типів нестационарних сигналів.

Для проведення подальших досліджень обрано сімейства МФ Добеші, Койфлет, Симлет та функція Хаара, основними властивостями яких є ортогональність, наявність масштабуючої функції, можливість реконструкції та можливість дискретного перетворення для аналізу та опрацювання дискретних неперіодичних сигналів.

В процесі МП застосування функцій Добеші дозволяє ефективно зберігати енергію сигналів і перерозподіляти цю енергію в більш компактну форму. Недоліком функцій Добеші є асиметричність.

Відзначається, що до Симлетів відносяться ортогональні та майже симетричні МФ, властивості яких є схожі до властивостей функцій Добеші, причому властивість симетрії Симлетів забезпечує мінімальні фазові спотворення. Симлети співпадають з функціями Добеші до 4 порядку.

Наголошується, що функції Койфлет є сімейством з певними особливостями, а саме, ці функції є більш симетричними ніж функції Добеші, що забезпечує майже лінійні фазові характеристики. Однак, розкид значень коефіцієнтів стосовно гладкості у функціях Койфлет більший ніж у функцій Добеші того ж порядку.

У випадку використання функції Хаара, яка в часовій області має компактний носій на проміжку $[0, 1]$, показано, що погано локалізована в частотній області та неефективна при розкладанні сигналів, представлених за допомогою гладких функцій. Перевагами функції Хаара є простота застосування та швидкість перетворення.

Визначено, що частотне представлення МФ є основою для швидкого МП, що базується на пірамідальному алгоритмі Маллата і проріджуванні спектра МФ за частотою. Для проведення подальшого аналізу та досліджень обґрунтовано доцільність використання пірамідального алгоритму Маллата, який дозволяє вирішувати задачі фільтрації та компресії сигналів шляхом порогоування коефіцієнтів розкладу на різних масштабах (різних рівнях), що в свою чергу вимагає проведення оптимізації вибору МФ для забезпечення необхідної точності апроксимації інформативних сигналів у часо-частотній області, якісної декомпозиції та повної реконструкції сигналу.

Для оцінки ефективності МП сигналів запропоновано використовувати критерії, які базуються на оцінках: похибки середньоквадратичного відхилення, відношення сигнал/шум та коефіцієнта кореляції між аналізованим сигналом S та очищеним від шуму \tilde{S} :

– середньоквадратичне відхилення (MSE):

$$MSE_t = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - \tilde{s}_i)^2}{N}, \quad (1)$$

– відношення сигнал/шум (SNR):

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{\sum_{i=1}^N |s_i - \tilde{s}_i|^2} \right), \quad (2)$$

– коефіцієнт кореляції:

$$Cr = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})(\tilde{s}_i - \bar{\tilde{s}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2 \sum_{i=1}^N (\tilde{s}_i - \bar{\tilde{s}})^2}}, \quad (3)$$

де S – вихідний сигнал, \tilde{S} – реконструйований сигнал.

Таким чином, визначено необхідність проведення оптимізації вибору базових МФ функцій для забезпечення необхідної точності апроксимації інформативних сигналів у часо-частотній області, якісної декомпозиції та повної реконструкції сигналу.

У третьому розділі проведено аналіз існуючих та запропоновано нові методи та алгоритми вибору базових МФ для опрацювання одновимірних сигналів.

Відомо, що енергія сигналу є одним з основних параметрів, які характеризують реальні сигнали. Теорема Парсеваля дозволяє встановити зв'язок між енергіями сигналу в часовій та частотній областях. Так як для досліджень обрано ортогональні малохвильові базиси, то згідно теореми Парсеваля, зв'язок енергії сигналу та енергії його МК представлено у вигляді:

$$E_c = \sum_n |S(n)|^2 = \sum_m \sum_n |C_{m,n}|^2, \quad (4)$$

де E_c – енергія сигналу у малохвильовому просторі, $S(n)$ – дискретний сигнал, $C_{m,n}$ – коефіцієнти ДМП.

Значну роль при аналізі та опрацюванні сигналів на основі МП має спектральний розподіл енергії МК. Кількісною мірою такого розподілу енергії є ентропія Шеннона:

$$En = -\sum_m p_m \cdot \log p_m. \quad (5)$$

Ентропія МК дозволяє отримати корисну інформацію про основний динамічний процес, пов'язаний з сигналом. Чим меншим буде значення ентропії Шеннона, тим вищою буде концентрація енергії при МП сигналу. Таким чином, критерій для оцінки ефективності обраної базової малохвильової функції може бути визначений за допомогою співвідношення енергії та ентропії Шеннона

$$EER = \frac{E_c}{En}. \quad (6)$$

При багаторівневому розкладанні сигналу, оцінку співвідношення енергії та ентропії Шеннона можна проводити зокрема для кожного рівня m :

$$EER_m = \frac{E_{C_m}}{En_m}. \quad (7)$$

В процесі проведення експериментальних досліджень встановлено, що для деяких сигналів при розрахунку значень за критерієм, що визначається виразом (6) постає задача вирішення невизначеності оптимальної МФ. Прикладом є реалізація за даним критерієм в пакеті Matlab для тестового сигналу ‘bumps’, яка наведена на рис.1. Для вирішення цієї задачі в роботі запропоновано визначити частку енергії апроксимуючих коефіцієнтів у загальній енергії опрацьованого сигналу, яка визначається коефіцієнтом:

$$\gamma_E = \frac{\sum_n |a_n|^2}{\sum_n |a_n|^2 + \sum_n |d_n|^2} \quad (8)$$

де a_n – коефіцієнти апроксимації, d_n – деталізуючі коефіцієнти ДМП.

Чим більш наближене значення γ_E до 1, тим більше енергії зосереджено в коефіцієнтах апроксимації. Деталізуючі коефіцієнти містять певну інформацію про особливості сигналу на усіх рівнях розкладання. Тому, чим меншою є ентропія розподілу енергії деталізуючих МК d_n , тим краще вони виявляють ці особливості сигналу.

В роботі для оцінки ефективності обраної базової МФ запропоновано використовувати модифікований критерій відношення енергії до ентропії Шеннона, який визначається за допомогою наступного співвідношення:

$$EER = \frac{\gamma_E}{En(d)}, \quad (9)$$

На рис. 1 наведено діаграму значень за критерієм EER, розрахованих згідно виразів (6) та (9) для тестового сигналу ‘bumps’.

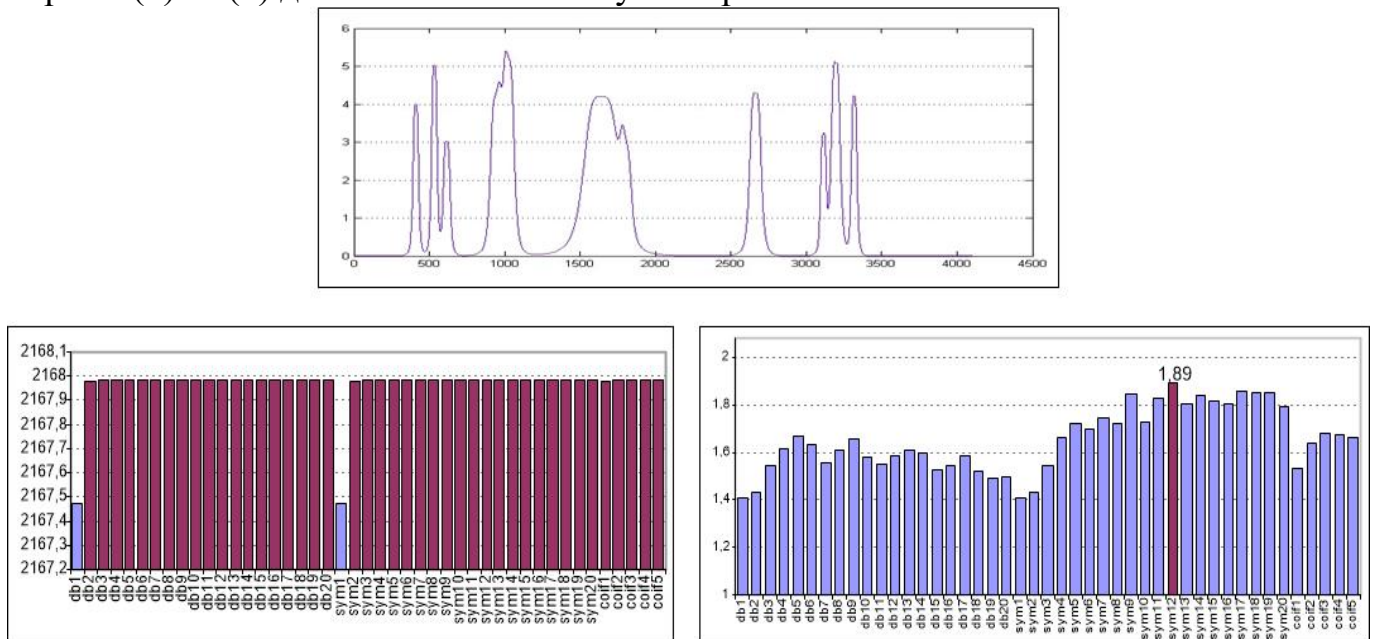


Рис.1. Реалізація обчислень за критерієм EER згідно виразів (6) та (9) для тестового сигналу ‘bumps.mat’

Порівняння діаграм на рис. 1 дозволяє стверджувати, що різниця між максимальним та мінімальним значеннями для критерію EER, отриманими згідно виразу (6) становить 0.02% між максимальним та мінімальним значеннями отриманими згідно виразу (9) становить 26%.

Оскільки, МП визначає подібність між аналізованим сигналом і масштабованою версією базової МФ, то для визначення ступеня подібності обох сигналів використовується поняття кореляції. З огляду на це, автором запропоновано використання коефіцієнта взаємної кореляції як критерію вибору базової малохвильової функції.

$$CORR = \frac{COV_{S\psi}}{\sigma_S \cdot \sigma_\psi}, \quad (10)$$

де $CORR$ – коефіцієнт кореляції між аналізованим сигналом та базовою малохвильовою функцією; $COV_{S\psi}$ – взаємна коваріація послідовностей; σ_S та σ_ψ – стандартні відхилення послідовностей.

Чим більша подібність між сигналом та базовою МФ, тим більшим буде наближення до 1 коефіцієнта кореляції.

Встановлено, що застосування такого критерію є малоефективним, якщо вихідний сигнал є зашумлений, особливо при значному його рівні. В такому випадку, пропонується визначати подібність сигналу та його МК, а саме коефіцієнтів апроксимації, за умовою що значна кількість шумових коефіцієнтів міститься в детальних коефіцієнтах наступним чином:

$$Cr = \frac{COV_{SW}}{\sigma_S \cdot \sigma_W}, \quad (11)$$

де Cr – коефіцієнт кореляції між аналізованим сигналом та малохвильовими коефіцієнтами апроксимації; COV_{SW} – взаємна коваріація послідовностей; σ_S та σ_W – стандартні відхилення послідовностей сигналу та МК.

Однак, як видно з рис. 2, недоліком даного критерію є неможливість для деяких сигналів встановлення єдиної оптимальної МФ.

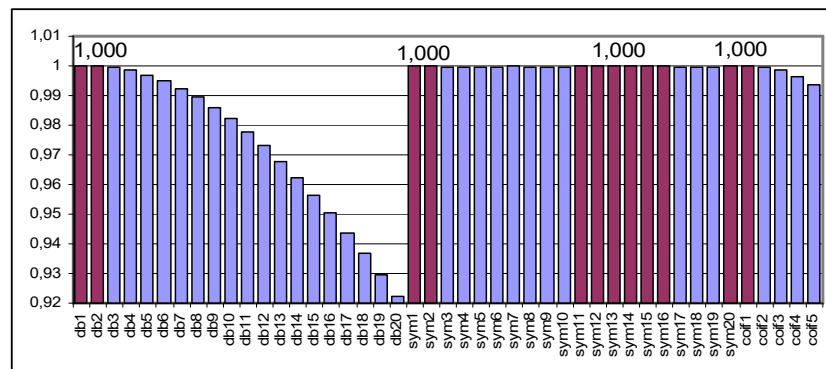


Рис. 2. Реалізація обчислень за критерієм Cr для оцінки подібності між аналізованим сигналом та МК сигналу 'bumps'

Оскільки, МП застосовується переважно для аналізу та опрацювання сигналів, які мають певну інформаційну невизначеність, то в таких випадках запропоновано використовувати таку інформаційну міру як ентропія. Для того, щоб отримати інформаційний вміст МК та порівняти його з інформаційним вмістом

сигналу, в роботі використано такі інформаційні критерії як *спільна ентропія, умовна ентропія та взаємна інформація*.

Для вибору ефективної МФ на рис. 3 представлений зв'язок між цими критеріями. Чим більше інформації про сигнал S міститимуть малошвильові коефіцієнти C , які утворилися в результаті ДМП, тим ефективнішою є МФ.

Оскільки взаємна інформація $I(S;C)$, яка визначається як середня кількість інформації, що містять МК про сигнал, то:

$$I(S,C) = -H(S,C) + H(S) + H(C), \quad (12)$$

де $H(S,C)$ – спільна ентропія сигналу та його МК, $H(S)$ – ентропія сигналу, $H(C)$ – ентропія МК.

Крім згаданих характеристик в теорії інформації використовується відносна ентропія або дивергенція Кульбака-Лейблера, яка є мірою відстані між двома розподілами ймовірностей, визначеними в одному і тому ж алфавіті. На противагу взаємній інформації, що є мірою віддаленості двох змінних в межах одного розподілу, відносна ентропія $D(S \parallel C)$ визначає відстань між розподілами:

$$D(S \parallel C) = \sum_{i \in S,C} p(S_i) \ln \frac{p(S_i)}{p(C_i)}, \quad (13)$$

де $p(S_i)$ та $p(C_i)$ – ймовірності розподілу сигналу та МК відповідно.

Беручи до уваги необхідність забезпечення максимальної взаємної інформації та мінімальної відносної ентропії, в роботі запропоновано критерій для оцінки ефективності обраної базової МФ, який представляється наступним співвідношенням:

$$IER = \frac{I(S,C)}{D(S \parallel C)} \quad (14)$$

На рис. 4. наведено діаграму отриманих значень за критерієм IER , розрахованих згідно виразу (14) для тестового сигналу 'bumps', що дозволяє зробити висновок про ефективність цього критерію для вибору базової МФ.

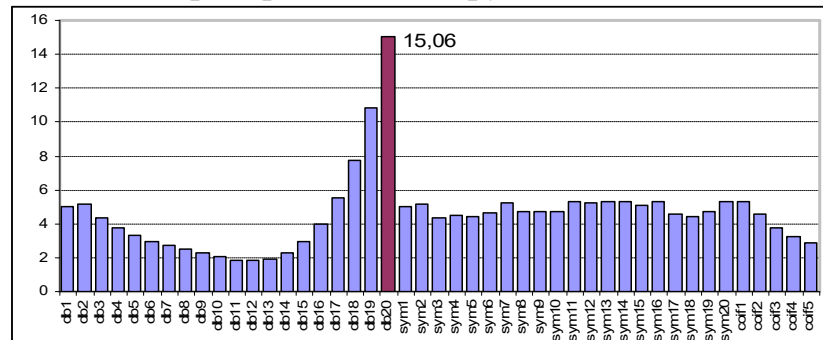


Рис. 4. Діаграма отриманих значень за критерієм IER для тестового сигналу 'bumps'

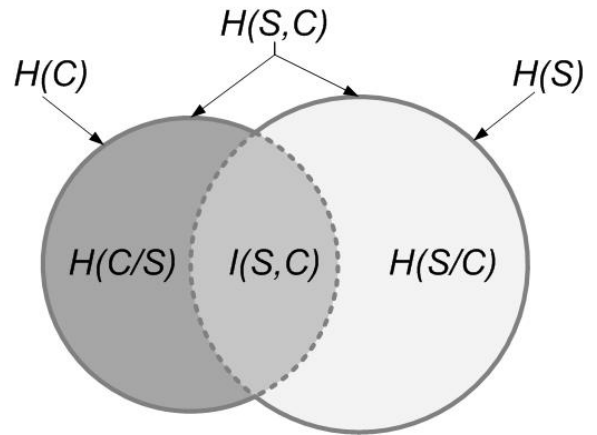


Рис. 3. Зв'язок між спільною ентропією, умовною ентропією і взаємною інформацією сигналу S та малошвильових коефіцієнтів C

На основі проведеного аналізу встановлено, що досягнути однозначності вибору базової МФ за згаданими вище трьома критеріями не завжди представляється можливим. З огляду на це, виникає необхідність переходу до розроблення узагальненого критерію. Таким чином, для вирішення задачі, коли неможливо оптимізувати усі конфліктні критерії на 100%, а лише кожен з них до певної міри, в роботі запропонований новий метод, який базується на використанні багатокритеріальної оптимізації (БКО) на основі теорії нечітких множин.

Нехай $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ – множина базових МФ, один з елементів якої $x^* \in C$, де $C \subseteq X$, оптимізує (максимізує) задані критерії EER , IER та Cr , а $G = \{G_1, G_2, G_3\}$ – множина критеріїв, за якими проводиться оцінка ефективності застосування базових МФ, де G_1 – критерій EER ; G_2 – критерій IER , G_3 – критерій Cr .

На основі аналізу методів побудови функції належності нечітких множин для реалізації моделі БКО вибору базової МФ обрано метод прямої експертної оцінки.

Оскільки, мета оптимізації полягає в максимізації заданих критеріїв, то відповідні функції належності $\mu_{G_i}(X)$ представлено у вигляді параметричної сигмоїдної функції з параметрами $a=12$ та $c=0.6$:

$$\mu_G(x_i) = \frac{1}{1 + \exp(-12 \cdot (x_i - 0.6))} \quad (15)$$

В результаті отримано наступне нечітке рішення для рівнозначних критеріїв:

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{\min(\mu_{G_1}(x_1), \mu_{G_2}(x_1), \mu_{G_3}(x_1))}{x_1}, \frac{\min(\mu_{G_1}(x_2), \mu_{G_2}(x_2), \mu_{G_3}(x_2))}{x_2}, \dots, \frac{\min(\mu_{G_1}(x_k), \mu_{G_2}(x_k), \mu_{G_3}(x_k))}{x_k} \right\} \quad (16)$$

На основі проведеного дослідження ефективності критеріїв за результатами опрацювання різних типів сигналів, для визначення відносної ваги критеріїв сформовано наступні експертні парні порівняння: 1) слабка перевага G_2 над G_1 ; 2) суттєва перевага G_2 над G_3 ; 3) суттєва перевага G_1 над G_3 . Сформована матриця парних порівнянь за шкалою Сааті наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Матриця парних порівнянь критеріїв

$[A]$	G_1	G_2	G_3	Вектор пріоритетів	Ваговий коефіцієнт
G_1	1	$\frac{1}{3}$	5	1,186	0,295
G_2	3	1	5	2,5	0,62
G_3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	1	0,34	0,084
Сума:				4,026	1

Матриця парних порівнянь є діагональною та обернено-симетричною. Ступеням належності нечіткої множини (16) відповідають координати власного вектора $W = (w_1, w_2, \dots, w_k)^T$ матриці A . Вагові коефіцієнти критеріїв $G_1 \div G_3$:

$$w_1 = 0,3; w_2 = 0,6; w_3 = 0,1.$$

Отже, шукана нечітка множина, яка необхідна для вибору ефективної базової МФ визначається з наступного виразу:

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{\min(\mu_{G_1}(x_1)^{0.3}, \mu_{G_2}(x_1)^{0.6}, \mu_{G_3}(x_1)^{0.1})}{x_1}, \frac{\min(\mu_{G_1}(x_2)^{0.3}, \mu_{G_2}(x_2)^{0.6}, \mu_{G_3}(x_2)^{0.1})}{x_2}, \dots, \frac{\min(\mu_{G_1}(x_k)^{0.3}, \mu_{G_2}(x_k)^{0.6}, \mu_{G_3}(x_k)^{0.1})}{x_k} \right\} \quad (17)$$

Множина обраних критеріїв є незамкнутою, її можна доповнити з урахуванням більш детальних вимог до вибору конкретної МФ, оскільки кожен критерій може розглядатися як згортка локальних показників на нижчих рівнях ієрархії.

Оскільки переважна більшість існуючих методів вибору малошвилювального базису ґрунтуються на принципі схожості сигналу і базової МФ, то дослідження в цій області показали, що такий принцип не завжди дозволяє визначити оптимальну базову функцію для обробки сигналу. Запропоновано здійснювати такий вибір на основі максимальної ефективності результатів опрацювання сигналів МФ.

Для оцінки ефективності результатів опрацювання одновимірних сигналів в процесі їх МП запропоновано використання універсального індексу якості:

$$Q = Q_{corr} \cdot Q_{dyn} \cdot Q_{mean} = \frac{\sigma_{S\tilde{S}}}{\sigma_S \cdot \sigma_{\tilde{S}}} \cdot \frac{2 \cdot S \cdot \tilde{S}}{(\bar{S})^2 + (\tilde{\bar{S}})^2} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_S \cdot \sigma_{\tilde{S}}}{\sigma_S^2 + \sigma_{\tilde{S}}^2}, \quad (18)$$

де Q_{corr} – оцінка корельованості вихідного сигналу і отриманого в результаті опрацювання, яка змінюється в діапазоні $[-1;1]$; Q_{dyn} – оцінка зміни середнього значення отриманого сигналу відносно вихідного; Q_{mean} – оцінка зміни динамічного діапазону сигналів S і \tilde{S} . Така оцінка є особливо придатною при опрацюванні малопотужних сигналів та сигналів з високим рівнем шумів.

Встановлено, що застосування генетичного алгоритму (ГА) для визначення оптимальних базових МФ є достатньо ефективним у випадку фільтрації сигналів, так як правильний вибір не тільки базової МФ, але і таких основних параметрів компенсації шуму, як рівень розкладання, тип функції порогоування, правило вибору порогу і його рівня та метод перемасштабування порогу забезпечують комплексний підхід до вибору МФ та її параметрів і мають важливе значення для підвищення ефективності процесу очищення сигналу від шуму. На рис.5 наведена узагальнена блок-схема пошуку оптимальних базових МФ та параметрів очищення сигналу від шуму з використанням ГА.

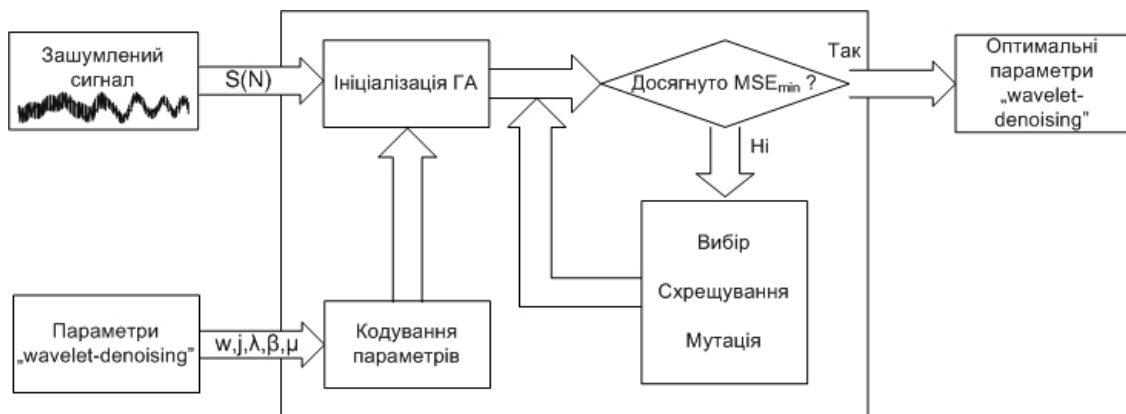


Рис. 5. Узагальнена блок-схема пошуку оптимальних базових МФ та параметрів очищення сигналу від шуму з використанням ГА

На перший вхід схеми поступає зашумлений сигнал $S(N)$, а на другому встановлюється набір складових компенсації шуму. Оптимізація згаданих характеристик реалізується за допомогою ГА. Коли задовольняється критерій оптимізації, завершується робота ГА. В результаті оптимізації отримується масив характеристик компенсації шуму.

Набір параметрів для видалення шуму представлений у двійковому вигляді. Таким чином, параметри кодуються послідовністю, яка складається з 15 двійкових розрядів, як показано на рис. 6.

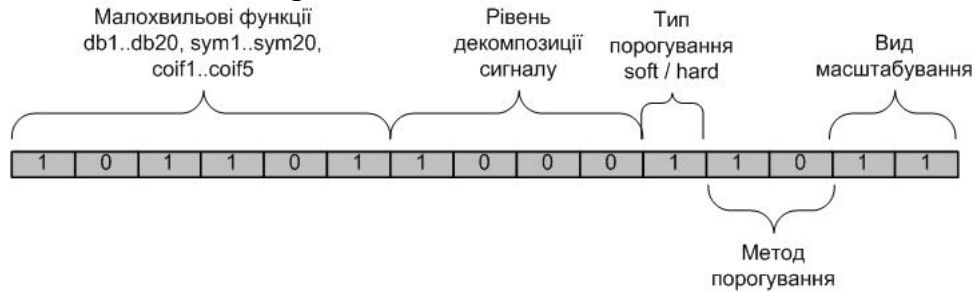


Рис. 6. Параметри для видалення шуму, представлені у двійковому вигляді

Значення складових для компенсації шуму вибирались для малохвильових функцій: Добеші (db1...db20), Койфлети (coif1...coif5), Симлети (sym1...sym8); рівнів розкладання $1 \div 10$; типу порогу «soft», «hard»; правила вибору порогу «heursure», «rigrsure», «sqtwolog», «minimax»; методів перемасштабування порогу: no scaling (one), single level (sln), multiple level (mln).

На основі представленого аналізу визначено доцільність використання значення середньоквадратичної похибки, що розраховується згідно виразу (1) та універсального індексу якості сигналу, що розраховується згідно виразу (18) для реалізації фітнес-функції генетичного алгоритму.

У четвертому розділі проведено дослідження методів вибору базових МФ з використанням тестових сигналів пакету Matlab: *blocks*, *bumps*, *doppler*, *heavy sine*, *sumlichr*, *trsin*, *vonkoch*, *wcantor*. Тестові сигнали вибрано таким чином щоби вони відрізнялись як за формою так і за спектральним вмістом. Для кожного тестового сигналу та обраних базових функцій засобами Matlab проведено оцінку значень для критерію відношення енергії до ентропії Шеннона згідно виразу (9), коефіцієнта кореляції згідно виразу (11), критерію оцінки співвідношення взаємної інформації та відносної ентропії згідно виразу (14). Для подальших досліджень проводилося накладання шуму на кожний тестовий сигнал та подальше його знешумлення з використанням базових МФ, визначених як найефективніші за кожним з критеріїв. Результати експериментальних досліджень на основі оцінок SNR, MSE та коефіцієнта кореляції C_r наведено на рис. 7.

На основі отриманих значень статистичних показників найкращі результати за оцінками відношення сигнал/шум, середньоквадратичної похибки та коефіцієнта кореляції отримано з використанням малохвильових функцій, визначених методом на основі критерію відношення взаємної інформації до відносної ентропії. Аналіз оцінки статистичного показника на основі коефіцієнта кореляції дозволяє стверджувати, що для більшості сигналів (крім «trsin») отримано якісні, приблизно однакові результати використовуючи МФ, що визначені усіма трьома критеріями.

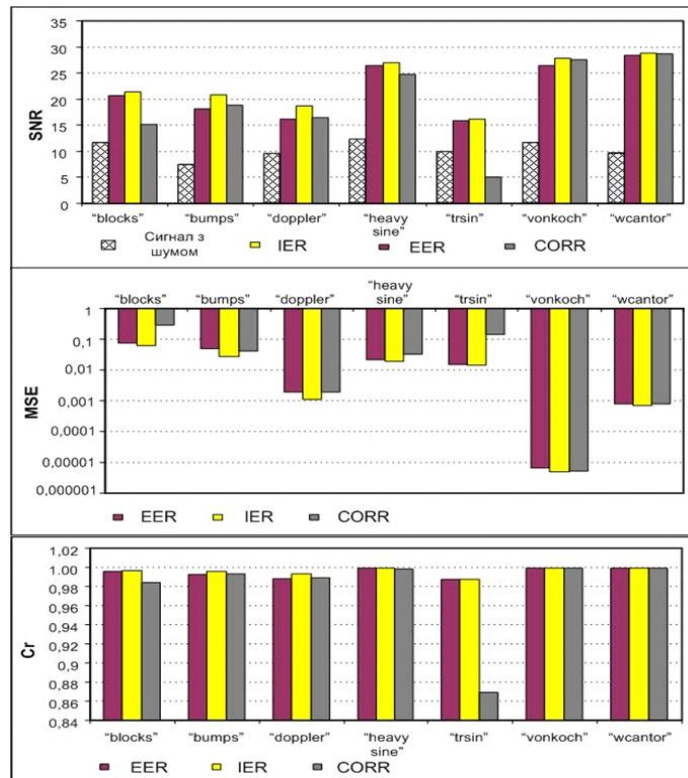


Рис. 7. Порівняння значень SNR, MSE та коефіцієнта кореляції C_r , отриманих в результаті очищення сигналів від шуму для МФ, визначених за кожним критерієм

Розроблено модель БКО вибору базової МФ на основі апарату нечіткої логіки та проведено дослідження цієї моделі в середовищі Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Для побудови моделі БКО вибору базової МФ обрано нечітку модель типу Мамдані. Структуру такої моделі представлено на рис. 8.



Рис. 8. Структура реалізації нечіткої моделі БКО вибору базової МФ

На першому етапі множина критеріїв $G = \{G_1, G_2, G_3\}$ представляється трьома лінгвістичними змінними: $EER = \{EER_L, EER_M, EER_H\}$; $IER = \{IER_L, IER_M, IER_H\}$; $C_r = \{C_r_L, C_r_M, C_r_H\}$. Формується база правил у вигляді структури з трьома входами та одним виходом. На останньому етапі дефазифікації для дискретної множини значень функції належності використовується метод центру ваги, що дає можливість отримати оцінку ефективності базової МФ.

На основі проведених досліджень отримано кінцеві результати у вигляді розподілу залежності рівня ефективності базової функції від значень визначених за критеріями EER, IER, C_r .

Для кожного тестового сигналу та обраних базових функцій засобами Matlab проведено оцінку значень для критеріїв EER, C_r та IER згідно виразів (9, 11, 14) відповідно.

До кожного масиву значень отриманих в результаті попередніх досліджень кожного з критеріїв для усіх тестових сигналів було застосовано розроблену модель БКО та отримано відповідні результати (рис.9), (табл.2).

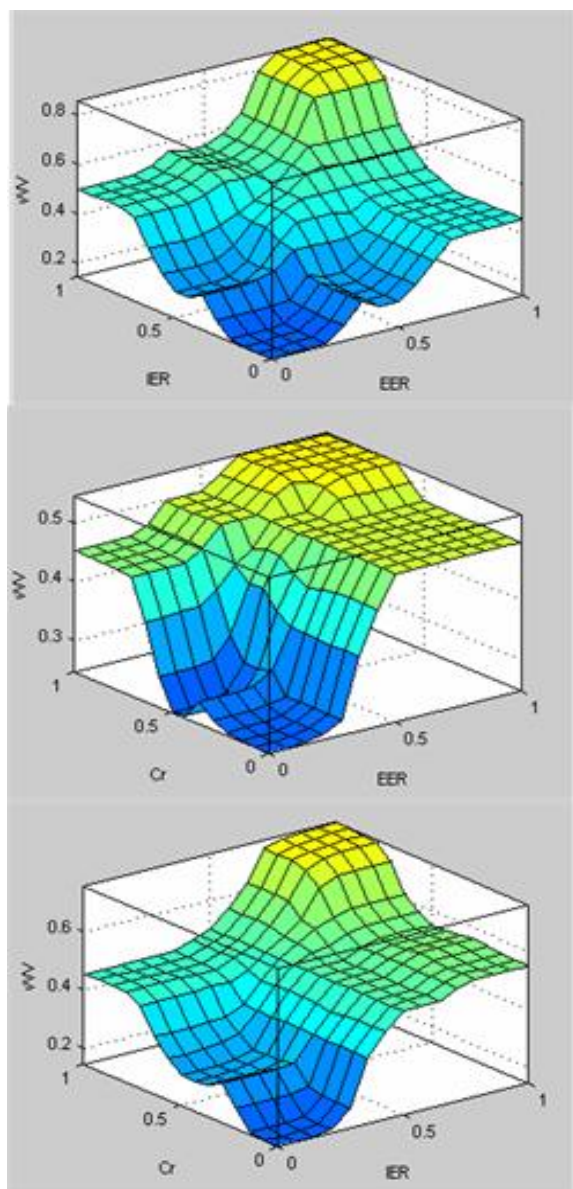


Рис.9. Поверхні системи нечіткої моделі відносно вхідних змінних EER, Cr, IER

Проведено дослідження алгоритму пошуку базових МФ з використанням ГА, який дозволяє одночасно отримати набір оптимальних параметрів для подальшої реалізації алгоритмів очищення сигналів від шуму. Для цього розроблено дві моделі алгоритму:

- на основі оцінки середньоквадратичної похибки як фітнес-функції;
- на основі оцінки універсального індексу якості сигналу як фітнес-функції.

Критерії, які використовувалися для зупинки програми ГА:

1. У випадку досягнення максимальної кількості поколінь $N_s=100$.
2. Досягнення фітнес-функцією свого найефективнішого значення протягом ряду поколінь.

Отримано оптимальні характеристики компенсації шуму для кожного тестового сигналу при використанні середньоквадратичної похибки та універсального індексу якості як фітнес-функцій алгоритму оптимізації.

Таблиця 2. Базові МФ, визначені як найбільш ефективні, для опрацювання тестових сигналів за методом БКО

Тестові сигнали	Базові функції
“blocks”	db1, sym1
“bumps”	sym15, sym19
“doppler”	sym9, sym13
“heavy sine”	db2, db3
“trsine”	sym7
“wcantor”	db15, db17, db18, db19, db 20

Відповідно до результатів проведених досліджень методу БКО, визначено, що для сигналів “doppler” та “trsine”, які містять гармонічну складову, найбільш ефективними базовими МФ за цим критерієм є функції сімейства Симлет порядків 7, 9 та 13. Для сигналу “blocks”, який має ступінчасту форму, найбільш ефективною базовою МФ є функції сімейства Добеші та Симлет порядку 1. Для сигналу “wcantor” вибір базових функцій є особливо ускладнений та потребує додаткових досліджень.

Для порівняння ефективності критеріїв проведено очищення сигналів від шуму з використанням малохвильових функцій та параметрів, отриманих в результаті застосування ГА при різних рівнях шуму у сигналах. Як критерій оцінки ефективності усунення шуму використано відношення сигнал/шум (SNR). На рис. 10 показано діаграму значень SNR очищених сигналів при різних значеннях початкового рівня шуму у сигналах.

Встановлено, що найкращі результати отримано при використанні параметрів, визначених за критерієм універсального індексу якості для сигналів з початковим рівнем шуму $SNR=5dB$, що забезпечило можливість покращення результатів очищення сигналів від шуму на 4-10% у порівнянні з методом на основі середньоквадратичної похибки як оптимізаційного критерію.

Проведені дослідження показують, що розроблені нові та удосконалені існуючі методи вибору базових МФ дозволяють підвищити точність перетворення та реконструкції сигналу на 15-20%, покращити результати очищення сигналів від шуму на 4-10%, а також підвищити швидкість перетворення.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, на основі виконаних автором досліджень, запроваджено нові та розвинуто відомі теоретичні та практичні засади оптимізаційних методів вибору базових МФ. Завдяки цьому розв'язано наукове завдання, яке полягає у визначенні ефективності існуючих та пошуку нових методів та алгоритмів ефективного вибору базових малохвильових функцій для різних типів сигналів, що дозволило забезпечити високу точність подання таких сигналів у часочастотній області, зосередити енергію сигналу в невеликій кількості значущих коефіцієнтів та підвищити швидкість перетворення.

1. Проведено класифікацію сигналів та способів їх опрацювання. Визначено, що МП найефективніше використовувати для опрацювання неперіодичних, широкосмугових, випадкових сигналів, завдяки властивості базових функцій МП змінювати роздільну здатність за часом та за частотою, а також для аналізу та си-

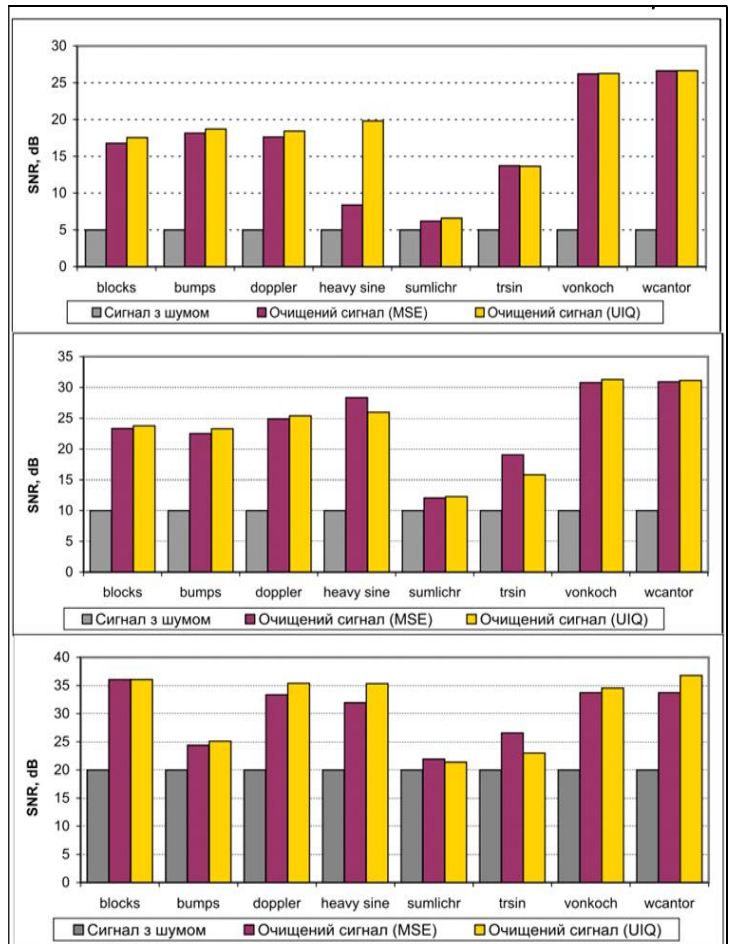


Рис. 10. Діаграми значень SNR очищених сигналів при різних значеннях початкового рівня шуму у сигналах

нтезу неперіодичних широкосмугових сигналів, з-за можливості здійснювати декореляцію сигналів одночасно в часовій та частотній областях.

2. Проведено класифікацію існуючих базових МФ. Обрано сімейства МФ Добеші, Симлет та Койфлет, як таких, що їх доцільно використовувати в подальших дослідженнях.

3. Вперше розроблено метод багатокритеріальної оптимізації вибору базових малохвильових функцій для опрацювання одновимірних неперіодичних сигналів, на основі апарату нечіткої логіки, що дозволило вирішити проблему неоднозначності вибору оптимальної МФ та підвищити ефективність представлення сигналів у малохвильовій області, їх аналіз та опрацювання.

4. Вперше запропоновано та обґрунтовано використання універсального індексу якості сигналу як нового критерію вибору базових малохвильових функцій, який дозволяє здійснювати вибір базових малохвильових функцій на основі сукупності оцінок корельованості, зміни середнього значення та динамічного діапазону опрацьованого сигналу, що дозволило підвищити якісні характеристики малохвильового перетворення в процесі очищення сигналів від шуму.

5. Удосконалено метод вибору базових малохвильових функцій з використанням генетичного алгоритму на основі досягнення максимальної ефективності результатів опрацювання сигналів, що дало змогу підвищити ефективність очищення сигналів від шуму за рахунок зменшення рівня шуму у сигналі в межах 4-10 % у порівнянні з методом оптимізації на основі оцінки середньоквадратичної похибки.

6. Отримали подальший розвиток методи оцінки ефективності вибору малохвильових базових функцій за критерієм співвідношення енергії малохвильових коефіцієнтів та ентропії розподілу енергії Шеннона, який відрізняється від відомих використанням співвідношення норми енергії коефіцієнтів апроксимації до ентропії детальних коефіцієнтів; за критерієм оцінки коефіцієнта взаємної кореляції, який на відміну від існуючого використовує взаємну кореляцію між аналізованим сигналом та малохвильовими коефіцієнтами; за інформаційним критерієм, який відрізняється від відомих використанням співвідношення взаємної інформації до відносної ентропії аналізованого сигналу, що дозволило зосередити енергію сигналу в невеликій кількості значущих коефіцієнтів, забезпечити необхідну точність апроксимації та найбільш повне представлення сигналів у часо-частотній області. Встановлено, що використання методу вибору базової МФ на основі інформаційного критерію дозволяє підвищити точність реконструкції сигналу на 15-20% у порівнянні з використанням методів на основі енергетичного та кореляційного критеріїв.

7. Розроблено програмне забезпечення для вибору базової МФ, що дозволяє підвищити ефективність вибору базових МФ, при використанні його в апаратно-програмних засобах опрацювання сигналів в комп'ютерних системах.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. Лагун І. Метод нечіткої багатокритеріальної оптимізації вибору базових малохвильових функцій / І.І. Лагун, А.Й. Наконечний // Комп'ютерні технології друкарства. – 2017. – № 37. – С. 64-73.
2. Лагун І. І. Загальна класифікація сигналів та їх опрацювання / І. І. Лагун, Р. А. Наконечний // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2009. - №22. С. 71–75.
3. Лагун І. І. Основні підходи до вибору оптимального малохвильового базису / І. І. Лагун, А. Й. Наконечний // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, сер. : Автоматика, вимірювання та керування. – Львів : НУ “Львівська політехніка”. – 2009. – № 639. – С. 70-75.
4. Лагун І. І. Вибір малохвильових базових функцій для опрацювання одновимірних сигналів / І. І. Лагун, А. Й. Наконечний // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Сер.: Автоматика, вимірювання та керування. – Львів : НУ “Львівська політехніка”. – 2014. – № 802. – С. 3–8.
5. Лагун І. І. Оптимізація пошуку базових малохвильових функцій з використанням генетичного алгоритму / І. І. Лагун, Р. А. Наконечний // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Сер.: Автоматика, вимірювання та керування. – Львів : НУ “Львівська політехніка”. – 2015. – № 821. – С. 30–36.
6. Lagun I. Selection of wavelet basis for the effectiveness processing of signals / I. Lagun, A. Nakonechnyi. // Вестник Брестского государственного технического университета, 2016. – №5 – С. 69–73.
7. Lagun I. Using fuzzy logic to optimise the selection of mother wavelets / I. Lagun, A. Nakonechnyi, V. Samotyuy // Technical Transactions – Electrical Engineering – 2018. – №3 – pp. 107 – 114.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Лагун А. Використання вейвлет-перетворення для приховування інформації в нерухомих зображеннях / А. Лагун, І. Лагун // Матеріали II науково-технічної конференції «Захист інформації і безпека інформаційних систем», 30 травня – 1 червня 2013 р. – Львів. – 2013. – С. 98–99.
9. Лагун І.І. Індекс структурної подібності як критерій вибору базової малохвильової функції для обробки зображень / І. І. Лагун, А. Й. Наконечний // Збірник тез доповідей I Міжнародної конференції з автоматичного управління та інформаційних технологій «ІСАСІТ-2011». – Львів, 2011.– С. 15.
10. Лагун І.І. Оцінка якості зображень при фільтрації сигналів різними базисними малохвильовими функціями / І. І. Лагун, А. Й. Наконечний // Збірник тез доповідей XI Міжнародної наукової конференції з контролю і управління в складних системах «КУСС-2012» – Вінниця, 2012.– С. 101.
11. Лагун І. І. Використання універсального індексу якості сигналу при виборі оптимальних малохвильових базових функцій // І. І. Лагун, А. Й. Наконечний, Р. І. Стахів // ІСАСІТ-2015. Матеріали 3-ої Міжнародної конференції з авто-

матичного управління та інформаційних технологій, м.Київ, 11-13 грудня 2015 р. – К. : 2015. – С. 132–135.

12. Nakonechnyy A. Wavelet basis functions to one-dimensional signal processing / A. Nakonechnyy, I. Lagun //Матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції «International Conference on Automatic Control and Information Technology 2013 (ICACIT'13)», 7 – 8 грудня 2013 р., Краків. – [Електронне видання] – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. – Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000, XP ; MS Word 97-2003.

13. Lagun I. Using the Fuzzy Logic to Optimize the Selection of Mother Wavelets/ A. Nakonechnyy, I. Lagun, V. Samotyuy //Матеріали 4-ої міжнародної науково-технічної конференції «International Conference on Automatic Control and Information Technology 2017 (ICACIT'17)», 13 – 16 грудня 2017 р., Краків. – [Електронне видання] – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. – Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000, XP ; MS Word 97-2003.

Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації:

14. Лагун І.І. Використання дискретного малохвильового перетворення для виявлення аномалій мережевого трафіку / І. І. Лагун, А. Е. Лагун // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Сер.: Автоматика, вимірювання та керування. – Львів : НУ “Львівська політехніка”. – 2011. – № 695. – С. 88–94.

15. Лагун А. Е. Використання вейвлет-перетворення для приховування інформації в нерухомих зображеннях / А. Е. Лагун, І. І. Лагун // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Сер. : Автоматика, вимірювання та керування. – Львів : НУ “Львівська політехніка”. – 2013. – № 774. – С. 60–65.

АНОТАЦІЯ

Лагун І.І. Методи ефективного пошуку базових функцій для часо-частотного перетворення сигналів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп’ютерні системи та компоненти. – Інститут комп’ютерних технологій, автоматки та метрології Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичного завдання підвищення ефективності вибору базових функцій для опрацювання різних типів одновимірних сигналів в часо-частотній (малохвильовій) області. У роботі показано, що ефективність представлення сигналів у малохвильовій області, їх аналіз та опрацювання напряму пов’язані з вибором базових функцій, які при цьому використовуються. Визначені основні методи та алгоритми вибору базових малохвильових функцій, оптимальний вибір яких здійснюється за визначеним критерієм для певних типів сигналів. Отримали подальший розвиток методи оцінки ефективності вибору малохвильових базових функцій за критерієм співвідношення енергії малохвильових коефіцієнтів та ентропії розподілу енергії Шеннона, критерієм оцінки коефіцієнта взаємної кореляції та інформаційним критерієм. Вперше запропоновано та обґрунтовано використання універсального індексу якості сигналу як нового критерію вибору базових малохвильових функцій та вдосконалено

метод вибору базових малохвильових функцій з використанням генетичного алгоритму за критерієм універсального індексу якості сигналу. Запропоновано та розроблено метод багатокритеріальної оптимізації вибору базових малохвильових функцій для опрацювання одновимірних неперіодичних сигналів на основі апарату нечіткої логіки, що дозволило підвищити ефективність вибору базових малохвильових функцій. Проведено дослідження методів вибору базових малохвильових функцій з використанням тестових сигналів пакету Matlab. Ефективність методів вибору базових малохвильових функцій оцінювалась за результатами реалізації алгоритму очищення сигналів від шуму.

Ключові слова: малохвильова область, вейвлет область, малохвильові базові функції, оптимальні вейвлети, дискретне малохвильове перетворення, критерії вибору, багатокритеріальна оптимізація.

ABSTRACT

Lagun I.I. Methods of effective search of basic functions for time-frequency signal transformation. - On the rights of manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.05 - Computer systems and components. - Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology of Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis addresses the problems of the effectiveness increasing of the selection of base functions for the processing of different types of one-dimensional signals in the time-frequency (wavelet) domain. In that thesis, it is shown that the efficiency of representing signals in the wavelet domain, their analysis and processing are related to the selection of base functions. The basic methods and algorithms for selecting base functions are defined, in which the selection of optimal wavelets is carried out according to a certain criterion for definite types of signals. Further development methods for assessing the efficiency of the wavelet selection by the criterion for the ratio of the energy of the wavelet coefficients to the entropy of energy distribution of wavelet coefficients, by the criterion for estimating the correlation coefficient and by the information criterion, have been obtained. The universal index of quality of the signal was proposed and substantiated for the first time as a new criterion for selecting a wavelet and the method for selecting base wavelets using a genetic algorithm according to the universal signal quality index criterion was improved. The method of multi-criteria optimization of the selection of base wavelet for the processing of one-dimensional non-periodic signals based on the tools of fuzzy logic has been proposed and developed, which made it possible to improve the efficiency of selection of optimal wavelets. The research of the methods of selecting base wavelet using test signals of the Matlab package has been carried out. The efficiency of the methods for selecting base wavelet was evaluated based on the results of the algorithm denoising signal.

Keywords: wavelet domain, base wavelets, optimal wavelets, selection criteria, multicriterion optimization.

АННОТАЦИЯ

Лагун И.И. Методы эффективного поиска базисных функций для время-частотного преобразования сигналов. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - Компьютерные системы и компоненты. - Институт компьютерных технологий, автоматизации и метрологии Национального университета «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2019.

Диссертация посвящена проблеме повышения эффективности выбора базисных функций для обработки различных типов одномерных сигналов во время-частотной (вейвлет) области. В работе показано, что эффективность представления сигналов в вейвлет области, их анализ и обработка напрямую связаны с выбором базисных функций, которые при этом используются. Первый раздел работы содержит обзор литературных источников по теме диссертации. В разделе проведен анализ методов представления сигналов во временной, частотной и время-частотной областях, проведена классификация сигналов и способов их обработки, определена эффективность вейвлет преобразования для анализа непериодических сигналов, изменяющихся в широком диапазоне частот. Показано, что все вейвлеты имеют свойства локализации по времени и по частоте, равенства нулю среднего значения функции, свойство самоподобия, колебательный характер и позволяют сконцентрировать внимание на тех или иных локальных особенностях рассматриваемых процессов. Определено, что дальнейшие разработки в диссертационном исследовании базируются на использовании методов вейвлет преобразования, поиска существующих и разработке новых методов эффективного выбора базисных вейвлетов для обработки непериодических сигналов. Во втором разделе работы рассмотрены особенности формирования и выбора базисных вейвлетов для обработки одномерных сигналов, дана классификация базисных вейвлетов, рассмотрен алгоритм быстрого вейвлет преобразования, алгоритмы фильтрации и компрессии сигналов на основе вейвлет преобразования и основные критерии для оценки его эффективности. Рассмотрены основные характеристики вейвлетов, такие как ортогональность, размер носителя, количество нулевых моментов и гладкость, определено их влияние на эффективность применения базисных функций.

Приведена классификация вейвлетов, в которой все функции разделены на «грубые» вейвлеты, бесконечные регулярные вейвлеты, ортогональные и биортогональные вейвлеты с компактным носителем, а также комплексные вейвлеты, которые имеют минимум свойств. Рассмотрены особенности формирования вейвлетов и предложено использование функций семейств Добеши, Симлет и Койфлет для проведения дальнейших исследований. Представлен пирамидальный алгоритм Маллата, который позволяет решать задачи фильтрации и компрессии сигналов путем отбрасывания вейвлет-коэффициентов на различных масштабах, что в свою очередь требует выбора оптимальных вейвлетов для обеспечения необходимой точности аппроксимации информативных сигналов во вейвлет-области, качественной декомпозиции и полной реконструкции сигналов. Рассмотрено использование критериев на основе погрешности среднеквадратичного от-

клонения, отношения сигнал / шум и коэффициента корреляции между рассматриваемым сигналом и очищенным от шума для оценки эффективности вейвлет преобразования сигналов и алгоритмов фильтрации на его основании.

В третьем разделе рассмотрены существующие и предложены новые методы выбора базисных вейвлетов для обработки одномерных сигналов. Рассмотрены и усовершенствованы методы оценки эффективности выбора вейвлетов по энергетическим, информационным и корреляционным критериям. Приведены примеры исследования эффективности модифицированных критериев выбора вейвлетов для обработки тестовых сигналов, когда применение существующих дает неоднозначные результаты. Предложено решение проблемы неоднозначности выбора оптимальных вейвлетов путем применения многокритериальной оптимизации с использованием средств нечеткой логики. Приведен пример построения модели многокритериальной оптимизации выбора базисных вейвлетов на основе экспертной информации по результатам предыдущих исследований. Предложено использование универсального индекса качества сигнала как нового критерия выбора оптимальных вейвлетов. Получил дальнейшее развитие метод выбора базисных функций на основе максимальной эффективности результатов обработки сигналов по критерию универсального индекса качества сигнала. Усовершенствован метод выбора вейвлетов на основе максимальной эффективности результатов обработки сигналов по критерию среднеквадратичной погрешности MSE и универсального индекса качества сигнала с использованием генетического алгоритма. В четвертом разделе проведено исследование методов выбора базисных функций с использованием тестовых сигналов пакета Matlab. Оценка эффективности методов выбора базисных вейвлетов проводилась на основании результатов реализации алгоритма очистки сигналов от шума.

Ключевые слова: вейвлет область, вейвлеты, дискретное вейвлет преобразование, оптимальные вейвлеты, критерии выбора, многокритериальная оптимизация.