

III МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 004.021

- Дейнега Л. Ю. ст. викладач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: deynega.larisa@gmail.com*;
- Бережний О. Ю. студент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: 8357238@gmail.com*;
- Козлов В. В. студент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: kozlovvaleriy.zp@gmail.com*;
- Судаков В. Р. студент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: sudakov0.w@gmail.com*

ОЦІНКА ЯКОСТІ ОБРОБКИ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

Мета роботи. Проаналізувати ефективність використання вейвлет-аналізу для оцінки якості поверхонь металів. Дослідити можливість використання вейвлет-аналізу при ультразвуковій дефектоскопії. Визначити оптимальні вейвлет-сімейства та їх критерії для оцінки якості обробки металевих поверхонь.

Методи дослідження. Розглянуто ортогональні вейвлети: вейвлет Добеші, вейвлет Сімлета та вейвлет Койфлета, які забезпечують можливість здійснення процедури дискретного вейвлет-перетворення. Розглянуто критерії, які впливають на результативність фільтрації ультразвукового сигналу методами з використанням вейвлет-аналізу. Проведено фільтрацію ультразвукових сигналів за допомогою вейвлет функцій.

Отримані результати. З'ясовано, що для успішної фільтрації сигналів обраний вейвлет-метод повинен забезпечувати дискретне вейвлет-перетворення, і мати схожість форми вейвлет-функції до локальних особливостей сигналів ультразвукового дефектоскопа. При проведенні роботи обрано жорсткий поріг обмеження коефіцієнтів деталізації вейвлет аналізу, оскільки він є найкращим для задач фільтрації. Ефективність фільтрації підтверджено відносно великим показником відношення сигналу до переешкоди, а також тим фактом, що форма імпульсу, відбитого від дефекту, залишилася майже без зміни.

Наукова новизна. При використанні в якості базисних функцій вейвлетів Добеші і Койфлета в результаті вейвлет-фільтрації вдалося збільшити відношення сигналу до переешкоди на 20 дБ і впевнено виділити корисний сигнал на тлі переешкод, що свідчить про перспективність використання подібного роду перетворень в завданнях фільтрації.

Практична цінність. Отримані рішення можна використовувати для впровадження в алгоритми фільтрації сигналів у блоках цифрової обробки автоматизованих систем неруйнівного ультразвукового контролю.

Ключові слова: вейвлет, дискретне вейвлет-перетворення, розкладання сигналу, видалення шумів, дефектоскопія, неруйнівний ультразвуковий контроль, *ruthon*.

Вступ

Безперервно підвищуються вимоги до якості продукції металургійних виробництв, оскільки якість продукції є запорукою конкурентоспроможності і прибутковості виробництва. Через це виникає необхідність розробки і впровадження ефективних методів і засобів контролю якості металопродукції.

Однією з характеристик якості металу є якість поверхні. Вона підлягає першочерговому контролю як при випуску продукції на підприємстві виробника так і при «вхідному контролі» споживача. Вивчення якості поверхні – важлива інженерна задача [1]. Найчастіше для оцінки поверхні металу використовують пристрої та апаратні комплекси, принцип яких засновано на застосуванні ультразвукових хвиль.

Під час ультразвукового аналізу крім сигналів, що несуть корисну інформацію, таких як імпульси хвиль, які відбиті від дефектів і поверхні, на екрані УЗ

комплексів (дефектоскопів) або у будь-якому іншому форматі виводу результатів, нерідко присутні шуми і переешкоди. Вони погіршують ймовірність виявлення дефектів і правильної оцінки якості, тим самим знижують об'єктивність контролю. При обробці сигналів однією з проблем є облік шумів, що спотворюють їх [2].

Зменшити кількість шумів, а, відповідно, підвищити якість ультразвукового аналізу можна покращенням алгоритмів фільтрації, серед яких одним з найперспективніших є метод вейвлет-аналізу.

Аналіз досліджень і публікацій

Вейвлет – це математична функція, яка дозволяє аналізувати різні частотні компоненти даних. Сучасна теорія вейвлет-аналізу в значній мірі розроблена І. Добеші [3]. Вейвлет-перетворення одновимірного сигналу – це представлення його у вигляді узагальненого ряду по системі базисних функцій (1), які сконструйовано з материнського вейвлета $\psi(t)$, що володіє

певними властивостями за рахунок операцій зсуву в часі b і зміни тимчасового масштабу a . Для заданих значень параметрів a і b функція $\psi_{ab}(t)$ є вейвлет, що породжується материнським вейвлетом $\psi(t)$.

$$\Psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (1)$$

Однією з характеристик вейвлета є порядок, який визначає гладкість відновленого сигналу. Вейвлети вищого порядку дозволяють аналізувати більш тонку (високочастотну) структуру сигналу, пригнічуючи його повільно через мінливі складові.

При дослідженні сигналів доцільно їх представляти у вигляді сукупності послідовних наближень апроксимуючої $A_m(t)$ і деталізуючої $D_m(t)$ складових (2) з подальшим уточненням ітераційним методом.

$$S(t) = A_m(t) + \sum_{j=1}^m D_j(t). \quad (2)$$

Кожен крок уточнення відповідає певному масштабу a_m аналізу декомпозиції і синтезу сигналу. Таке представлення кожної складової сигналу вейвлетами можна розглядати як в часовій так і в частотних областях.

Більшість типів вейвлетів не мають аналітичного опису у вигляді однієї формули, а задаються ітераційними виразами, точніше коефіцієнтами h_i , які однозначно визначають материнський $\psi(t)$ і батьківський $\phi(t)$ вейвлети. Вейвлет-функція $\psi(t)$ відповідає за деталі сигналу $s(t)$, а скейлінг-функція $\phi(t)$ – за апроксимацію.

У статті [1] розглядається можливість застосування математичного апарату вейвлет-перетворень для делінеації сигналу складної форми на незалежні компоненти, а саме профілі хвилястості і шорсткості профілограм металевих поверхонь. При реалізації даного методу використовується відновлення сигналу за вейвлет-коефіцієнтами оптимального рівня декомпозиції сигналу при визначенні компонент сигналу.

У статті [2] розглядається застосування вейвлет-аналізу для розширення можливостей атомно-емісійного спектрального аналізу металів та сплавів латуні. Пропонується використання процедури вейвлет-фільтрації (дискретного вейвлет-перетворення) сигналу для зниження шумів при дослідженні.

В розглянутих статтях доводиться ефективність використання вейвлет-аналізу для оцінки якості поверхонь металів, проте не розглядається можливість його використання при УЗ дефектоскопії та причини вибору використовуваних сімейств вейвлет-перетворень.

Мета роботи

Для збільшення ефективності алгоритмів вейвлет-фільтрації необхідно провести додаткові дослідження, оскільки обсяг вейвлет-функцій досить широкий. Практичним завданням є підвищення шумостійкості ультразвукових систем контролю металопр-

кату за рахунок застосування вейвлет-перетворення і виділення корисного сигналу на тлі перешкод. Це можна звести: до вибору оптимальних параметрів вейвлет-перетворення і перевірки застосовності алгоритмів вейвлет-перетворення до сигналів ультразвукових дефектоскопів.

Основний матеріал та аналіз отриманих результатів

Критерії відбору типу вейвлета для аналізу сигналів ультразвукових дефектоскопів повинні враховувати вимоги, що висуваються до автоматизованих систем неруйнівного контролю. Зважаючи на те, що сигнал, який пройшов аналого-цифрове перетворення, представлено в цифровому вигляді, то для ефективного обробки дискретних відліків сигналу вейвлет-перетворення повинно бути дискретним.

Для успішного розкладання на апроксимуючі cA_j і деталізуючі cD_j коефіцієнти, вейвлет-сімейство має володіти скейлінг функцією, яка визначає грубу апроксимацію сигналу і породжує коефіцієнти апроксимації, а також вейвлет-функцією $\psi(t)$, яка визначає деталі сигналу і породжує коефіцієнти деталізації [4].

Варто відзначити, що скейлінг-функцією $\psi(t)$ можна описати не всі вейвлети, а тільки ті, які відносяться до ортогональних, тобто тих, що ґрунтуються на ортогональних базисних функціях. Ортогональні вейвлети надають можливість відновлення не тільки локальних особливостей довільного сигналу $S(t)$, а й всього сигналу в цілому.

Таким чином, можна істотно звузити коло вейвлетів, які розглядаються, до сімейств ортогональних вейвлетів, оскільки вони мають можливість розкладання сигналу на коефіцієнти апроксимації та деталізації і подальшого відновлення сигналу з даного рівня, тобто здійснення процедури дискретного вейвлет-перетворення.

З представлених в пакеті PyWavelets ортогональних вейвлетів можна виділити групу ортогональних вейвлетів з компактним носієм (кінцевою довжиною): вейвлет Добеші – «db», вейвлет Сімлета – «sym» та вейвлет Койфлета – «coif».

Ці типи вейвлетів мають такі основні параметри: скейлінг-функція $\psi(t)$ існує, функції $\psi(t)$ і $\phi(t)$ мають компактний носій, функція $\psi(t)$ має кілька нульових моментів.

Важливу роль в процедурі вибору параметрів фільтрації грає схожість вейвлет-функції $\psi(t)$ з локальними особливостями сигналу. Велика ступінь схожості форми вейвлет-функції та сигналу відбитого від дефекту підвищує роздільну здатність вейвлет-перетворення, дозволяючи впевнено виділити корисні сигнали на тлі перешкод. Схожість розглядають з точки зору ідентичності форми вейвлет-функції і її симетричності.

Особливостями прийнятих дефектоскопами сигналів є гладка форма (відсутність різких стрибків або розривів) і відносна симетрія (рис. 1) [5].

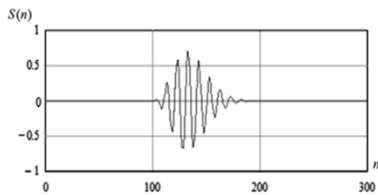


Рис. 1. Приклад сигналу ультразвукового дефектоскопу, який відбито від дефекту

З обраних ортогональних вейвлетів з компактним носієм найменшу симетрію мають вейвлети Добеші. Наступні за ступенем симетрії слід розглядати вейвлети Сімлета. При $N = 2$ вони однотипні і розрізняються лише знаком вейвлет-функції $\psi(t)$. При підвищенні порядку місце локалізації $\varphi(t)$ і $\psi(t)$ функцій вейвлетів Сімлета практично збігається, а симетричність $\psi(t)$ функції збільшується. Найбільш симетричними з ортогональних вейвлетів з компактним носієм є вейвлети Койфлета.

Провівши аналіз ступеня схожості розглянутих вейвлет функцій з локальними особливостями сигналу, отримано розуміння про перспективність використання вейвлета Добеші восьмого порядку в алгоритмах вейвлет-фільтрації. Вейвлет-функція $\psi(t)$ Добеші, незважаючи на асиметрію, найбільше схожа за формою з сигналом, що досліджується (рис. 2), отже, очікуваним ефектом буде підвищення роздільної здатності вейвлет-декомпозиції.

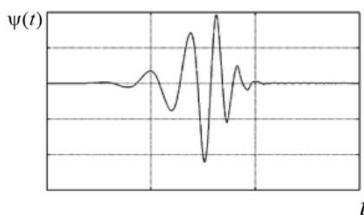


Рис. 2. Вейвлет-функція Добеші 8-го порядку

Окрім цього, важливою перевагою розглянутих типів вейвлетів є можливість реалізації процедури швидкого вейвлет-перетворення. Для практичних розрахунків використовують не самі вейвлети, а їх вагові коефіцієнти h_l .

Наведені сімейства ортогональних вейвлетів мають відповідний набір високочастотних і низькочастотних фільтрів декомпозиції і реконструкції, за допомогою яких реалізуються алгоритми швидкого вейвлет-перетворення.

Враховуючи отримані результати, зроблено висновки про перспективність використання вейвлета Добеші 8-го порядку в алгоритмах вейвлет фільтрації акустичних сигналів. Однак остаточний тип вейвлета можна вибрати, лише спираючись на чисельні дані, отримані в результаті програмної обробки реальних сигналів ультразвукових дефектоскопів.

У всіх конструкціях дефектоскопів використовується частотна фільтрація прийнятого сигналу. Оскільки корисні сигнали в ультразвуковій дефектоскопії, як правило, мають ширину спектра, яку можна порів-

няти з центральною частотою, то ширину смуги пропускання фільтра також вибирають досить великою. Тому такий фільтр ефективно послаблює тільки деякі види шумових сигналів.

Модель перешкоди сигналу зазвичай приймають адитивною (3).

$$S(n) = f(n) + \sigma e(n), \quad (3)$$

де $f(n)$ – корисний сигнал; σ – рівень шуму; $e(n)$ – гаусів білий шум.

Назва «білий шум» показує, що такий сигнал $e(n)$ має постійний спектр на всіх частотах. Мета полягає в тому, щоб придушити шумову частину $e(n)$ сигналу і відновити $f(n)$.

При використанні вейвлет-аналізу сигнал розкладають на апроксимуючі коефіцієнти, які представляють згладжений сигнал, і деталізуючі коефіцієнти, що описують коливання. Відповідно шумовий компонент більше відбивається в деталізуючих коефіцієнтах cD_j . Тому при вейвлет-фільтрації зазвичай обробляють деталізуючі коефіцієнти. Один з найпростіших способів видалення шуму полягає в тому, щоб зробити нульовими значення коефіцієнтів, які менше деякого порогового значення. Ця процедура називається пороговою обробкою, або «трешолдінгом» коефіцієнтів.

Сутність трешолдінга полягає в тому, що в векторах, які деталізують вейвлет-коефіцієнти $cD_1, cD_2, \dots, cD_{i_{max-2}}, cD_{i_{max-1}}$, обнуляють всі додатні (від'ємні) значення, що мають амплітуду, меншу (більшу) деяких додатних (від'ємних) порогів, які встановлюються симетрично відносно нульового рівня. Якщо при цьому інші елементи векторів залишаються без зміни, то реалізується так званий жорсткий поріг, який найкращим чином підходить для задач фільтрації. Крім нього на практиці також використовується м'який поріг, коли елементи послідовностей, що знаходяться поза обмеженою порогами смугою, зсуваються у напрямку до нульового рівня на величину висоти порога. Пороги для векторів вейвлет-коефіцієнтів cD_j встановлюються симетрично щодо нульового рівня.

Від вибору порогового рівня фону (оцінки дисперсії шуму) залежить якість шумозаглушення сигналу, що оцінюється у вигляді відношенні сигналу до шуму.

Установка малих значень порога зберігає фон в коефіцієнтах деталізації, тому призводить лише до незначного збільшення відношення сигналу до шуму. При великих значеннях порога можна втратити коефіцієнти, що несуть істотну інформацію.

З точки зору шумоприглушення, однією з найбільш ефективних стратегій визначення порогових рівнів при вейвлет-фільтрації сигналів є метод фіксованого порога. Він застосовується для виділення корисного сигналу на тлі шуму, який має нормальний або близький до нормального закон розподілу.

При застосуванні методики вибору величини фіксованого порога без перемасштабування, рівні порогів для відповідних векторів вейвлет-коефіцієнтів

розраховуються як зазначено в формулі (4).

$$T = \pm S_{i_{\max}-1} \sqrt{2 \ln N}, \quad (4)$$

де $i = i_{\max} - 1, i = i_{\max} - 2, \dots, 1, 0$; $S_1 = \text{med}(|cD_1|)/0,6745$, $\text{med}(|cD_1|)$ – медіана числової послідовності.

Медіана числової послідовності є наближеною оцінкою середнього відхилення абсолютних значень елементів чисельної послідовності від нуля. Вона малочутлива до наявності у виборці окремих елементів, значення яких набагато перевершують середній рівень. Таким чином, пороги на всіх рівнях визначаються на підставі оцінки вектора вейвлет-коефіцієнтів на рівні $i_{\max} - 1$.

Така стратегія дає хороші результати в тих випадках, коли шум білий. Якщо ж енергія шуму нерівномірно розподілена по частотному діапазону, то використовується методика вибору фіксованого порога з перемасштабуванням (5).

$$T = \pm S_i \sqrt{2 \ln N^{(i)}}, \quad (5)$$

де $N^{(i)}$ – довжина вектора вейвлет-коефіцієнтів cD_j на рівні i .

Отже, величини порогів на різних рівнях роздільності обчислюють з урахуванням оцінок векторів вейвлет-коефіцієнтів на відповідних рівнях.

При очищенні сигналів від шумів і стисненні використовується швидке вейвлет-перетворення. При цьому завжди враховується, що якщо повний розмір сигналу становить M відліків, а максимальний рівень розкладання дорівнює N , то для нормальної роботи швидкого вейвлет-перетворення відношення $M/2N$ має бути цілим числом, що може бути забезпечено цілим числом коефіцієнтів на останньому рівні розкладання. Якщо ця умова не виконується, то масив відліків доповнюють іншими значеннями [6].

Зменшення числа відліків відбувається тому, що при розрахунку коефіцієнтів на рівні i враховують тільки парні апроксимуючі коефіцієнти рівня $i+1$. Отже, кількість відліків апроксимуючих коефіцієнтів і деталізуючих коефіцієнтів скорочується вдвічі при переході на рівень з роздільністю з меншим на одиницю номером.

Важливим при реалізації вейвлет-фільтрації є вибір оптимального рівня розкладання N . При малому значенні рівня розкладання локальні особливості можуть бути не виявлені на тлі шумів, що значно погіршить якість фільтрації. З іншого боку, велика кількість рівнів розкладання також небажана, бо це вимагає великих обчислювальних потужностей.

Мірою оптимальності рівня розкладання зазвичай служить концентрація числа вейвлет-коефіцієнтів для обробки і реконструкції сигналу із заданою точністю. Оцінка інформативності набору коефіцієнтів виконується за критерієм ентропії. Будь-яке усереднення коефіцієнтів збільшує ентропію. При аналізі дерева вейвлет-розкладання обчислюють ентропію його вузлів, якщо при поділі вузла ентропія не зменшується, то подальше розгалуження з цього вузла не має сенсу.

Для остаточного твердження про доцільність застосування вейвлет-перетворення необхідно розглянути алгоритми вейвлет-фільтрації стосовно реальних сигналів ультразвукових дефектоскопів.

Сигнали, які використано для дослідження, отримано шляхом зондування металевого об'єкту (а саме – паралелепіпеда) на ультразвуковому дефектоскопі «Північ» імпульсом з частотою 4,7 МГц. Подальша обробка сигналів виконувалася за допомогою програмного пакету PyWavelets.

На рисунку 3 показана розгортка, що показує процес зміни амплітуди поздовжніх пружних хвиль до певної точки на поверхні зразка. По осі абсцис – номери відліків вибірки n , які відповідають різним моментам часу, а цифри по осі ординат – амплітуда сигналу $S(n)$, виражена в умовних одиницях.

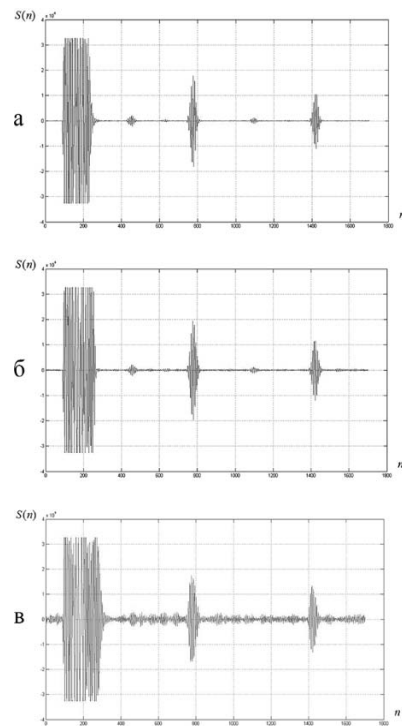


Рис. 3. Зашумлений вихідний сигнал: а – без проміжку; б – проміжок 1 мм між дефектоскопом і зразком; в – проміжок 2,5 мм між дефектоскопом і зразком

Сигнали, що досліджуються, є послідовністю рівновіддалено розташованих радіоімпульсів, що складаються з декількох періодів, які згасають під час коливань. На початку розгортки можна спостерігати обмежені за амплітудою високочастотні коливання – це сигнал, утворений в результаті впливу широкопasmового імпульсу генератора ударного збудження на кристалічну структуру досліджуваного зразка («зондуючий» сигнал).

На рисунку 3 чітко видно радіоімпульс (в момент часу $n \sim 750$), який відповідає сигналу, що пройшов через зразок один раз («перший донний» сигнал), а також менший за розміром імпульс ($n \sim 1400$) – сигнал, що послідовно відображався від двох поверхонь зразка, тобто який пройшов шлях в три рази довше,

ніж перший (відповідно «другий донний» сигнал).

Найбільш значимі з точки зору проведення контролю сигнали, відбиті від дефектної ділянки ($n \sim 450$ і $n \sim 1100$). Вони є радіоімпульсами згасаючих в часі коливань значно меншої амплітуди в порівнянні з «зондуючим» і «донними» сигналами. За присутності даного типу імпульсів в сигналі судять про наявність дефекту на контрольованій ділянці. Тому особливо важливою є можливість виділення «корисних» віддзеркалень від дефекту сигналів на тлі шумів і перешкод за допомогою фільтрації.

Ефективність прийому ультразвуку по експоненті зменшується зі збільшенням відстані між перетворювачем і об'єктом контролю. Так, якщо при відсутності проміжку сигнали від дефекту можуть бути легко знайдені на тлі перешкод (рис. 3а), то при збільшенні проміжку до 2,5 мм (рис. 3б) потрібні сигнали від дефектів повністю приховані перешкодами, і їх візуальне виявлення не представляється можливим.

Як числовий критерій оцінки ступеня фільтрації сигналу використано відношення сигналу до шуму (6).

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_c}{A_u} \right), \quad (6)$$

де A_c – амплітуда корисного сигналу; A_u – середньоквадратичне значення шуму.

До розглянутих сигналів була застосована процедура вейвлет-фільтрації. Були обрані основні параметри вейвлет-фільтрації: сімейство і тип вейвлета: Добеші – db8, Сімлета – sym8 та Койфлета – coif5; параметри граничного порогу – фіксований жорсткий поріг обмеження коефіцієнтів з їх перемасштабуванням на кожному рівні декомпозиції.

Найбільш простий випадок – це відсутність проміжку між перетворювачем і об'єктом. На рисунку 4 наведені початковий зашумлений сигнал і сигнали після фільтрації.

Найбільший інтерес при дослідженні можливостей вейвлет-фільтрації являють сигнали, якщо є робочий проміжок (рис. 5, 6). Оскільки робочі проміжки при реалізації безконтактного методу збудження ультразвуку становлять від 0,5 до 2 мм, то особливо важливе впевнене виділення корисних сигналів саме в таких випадках.

Розглянемо фільтрацію сигналу для випадку, коли немає проміжку між перетворювачем і об'єктом дослідження (рис. 4).

Для вихідного сигналу (рис. 4а) відношення сигналу до шуму склало 26,8 дБ. Сигнал, відбитий від дефекту, добре фіксується на тлі перешкод тому що його рівень значно перевершує рівень високочастотних перешкод.

Після проведення фільтрації з використанням вейвлета Добеші (db8) відношення сигналу до перешкод збільшилось майже в 2 рази і склало 49,7 дБ (рис. 4б). Для сигналу, відфільтрованого з використанням вейвлета Сімлета (sym8, рис. 4в) та вейвлета Койфлета (coif5, рис. 4г) відношення сигналу склало 54,5 дБ.

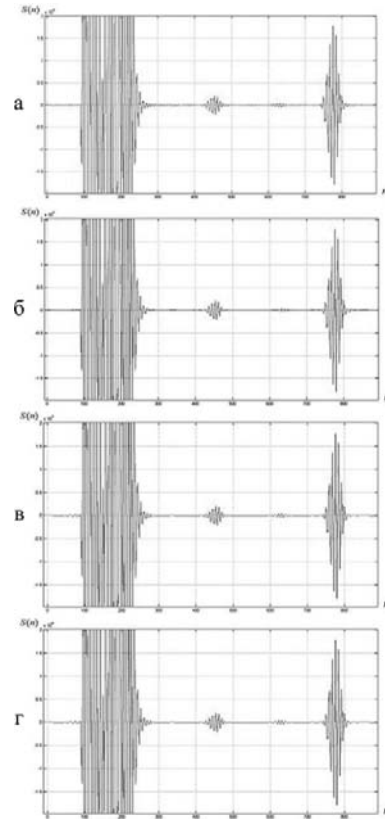


Рис. 4. Сигнал УЗ дефектоскопу (без проміжку): а – вхідний сигнал; б – використання вейвлета db8; в – використання вейвлета sym8; г – використанням вейвлета coif5

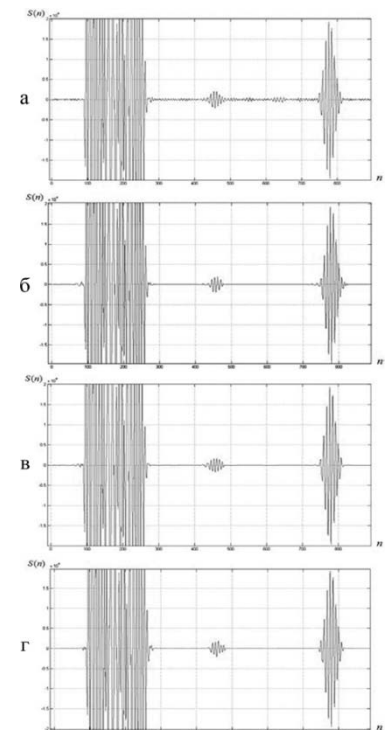


Рис. 5. Сигнал УЗ дефектоскопу (проміжок 1 мм): а – вхідний сигнал; б – використання вейвлета db8; в – використання вейвлета sym8; г – використання вейвлета coif5

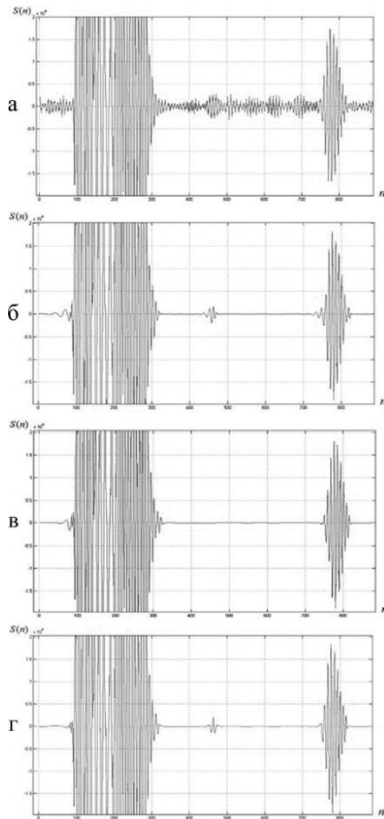


Рис. 6. Сигнал УЗ дефектоскопу (проміжок 2,5 мм):
a – вхідний сигнал; *б* – використання вейвлета db8; *в* – використання вейвлета sym8; *г* – використання вейвлета coif5

Оскільки для вихідного сигналу відношення сигналу до шуму досить велике, результати фільтрації майже не вплинули на параметри ультразвукового контролю. Імпульс може бути впевнено помічений на тлі шумів і перешкод, при цьому його форма, амплітуда і тривалість залишилися без зміни.

Розглянемо фільтрацію сигналу для випадку, коли відстань між перетворювачем і об'єктом складає 1 мм (рис. 5).

В результаті вейвлет-фільтрації вдалося прибрати всі види шумів, які присутні у вихідному сигналі. Для вихідного сигналу відношення сигналу до шуму склало 22 дБ. В процесі фільтрації найбільш високий показник відношення сигналу до шуму було отримано при використанні вейвлета Добеші (db8) – 53 дБ. Для сигналів, відфільтрованих з використанням вейвлетів Койфлета (coif5) і Сімлета (sym8), показники відношення сигналу до перешкоди склали 45 і 52 дБ відповідно.

Граничний випадок, коли сигнал повністю прихований на тлі шумів (рис. 6) спостерігається при збільшенні проміжку між перетворювачем і об'єктом до 2,5 мм.

Для вихідного сигналу показник відношення сигналу до шуму складає 11 дБ. Мале значення відношення сигналу до перешкоди пояснюється тим, що рівень корисного сигналу можна порівняти з рівнем перешкод, що робить його детектування неможливим. Після застосування вейвлет-фільтрації з використанням вейвлета Добеші (db8) відношення сигналу до шуму знач-

но зросло і склало 45 дБ. В результаті фільтрації вдалося відкинути всі високочастотні шуми, присутні у вихідному сигналі, і з достатньою точністю виділити імпульс, відбитий від дефекту.

На наведеній осцилограмі (рис. 6б) можна спостерігати, що форма сигналу, відбитого від дефекту, в точності повторює форму вейвлет-функції Добеші. Це підтверджує теорію про перспективність використання вейвлетів Добеші в задачах фільтрації сигналів.

Оскільки за формою функція Добеші максимально схожа з сигналом, який досліджується, в процесі вейвлет-розкладання корисний сигнал виділяється у вигляді вейвлет-коефіцієнтів, які значно перевищують за амплітудою коефіцієнти, отримані в результаті перетворення шумової складової. При пороговій обробці коефіцієнти, що несуть істотну інформацію (великі за амплітудою), залишаються без зміни, а деталізуючі коефіцієнти меншої амплітуди, що відображають шумову компоненту, обнуляються.

При фільтрації з використанням вейвлета Сімлета (sym8) відношення сигналу до шуму не розраховано, бо в результаті фільтрації не вдалося виділити корисний сигнал на тлі перешкод (рис. 6в). Після порогової обробки деталізуючих коефіцієнтів величини порогів на різних рівнях дозволю обчислюють з урахуванням оцінок векторів вейвлет-коефіцієнтів на відповідних рівнях. При використанні вейвлетів Сімлета не вдалося виділити характерні особливості сигналу (в даному випадку імпульси, відбиті від дефекту), тому при пороговій обробці коефіцієнти, що містять корисний сигнал, були обнулені разом з коефіцієнтами, отриманими вейвлет-перетворенням шумової складової, відповідно до загального алгоритму визначення порогових рівнів з використанням методу фіксованих порогів.

При фільтрації вихідного сигналу з використанням вейвлета Койфлета (coif5) вдалося приглушити всі присутні у вихідному сигналі високочастотні перешкоди і виділити корисний сигнал, відбитий від дефекту (рис. 6г). Відношення сигналу до перешкоди при цьому склало 52 дБ.

В даному випадку ефективність шумозаглушення пов'язана з однією важливою особливістю вейвлет-базисів Койфлета – великим числом нульових моментів і відносно великою симетричністю вейвлет-функції Койфлета. При малих масштабах деталізуючі коефіцієнти добре наближаються до вибірок сигналу, при цьому порядок наближення зростає з ростом нульових моментів. Тому при проведенні вейвлет-декомпозиції більш помітно виділяються особливості сигналу на малих масштабах, що підвищує роздільну здатність вейвлет-розкладання, і, відповідно, якість вейвлет-фільтрації.

Висновки

При виконанні роботи розглянуто критерії, які впливають на результативність фільтрації УЗ сигналу методом вейвлет-аналізу. Було з'ясовано і підтверджено, що для успішної фільтрації сигналів обраний вейвлет-метод повинен забезпечувати дискретне вей-

влет-перетворення і мати схожість форми вейвлет-функції до локальних особливостей сигналів УЗ дефектоскопа. При проведенні роботи обрано жорсткий поріг обмеження коефіцієнтів деталізації вейвлет аналізу, оскільки він є найкращим для задач фільтрації.

Було проведено порівняльний аналіз сигналів Добеші (db), Сімлета (sym) і Койфлета (coif). При фільтрації сигналу у випадку, коли проміжок між дефектоскопом і зразком для дослідження становив 1 мм, більш ефективною виявилася фільтрація сигналу з використанням вейвлета Добеші 8-го порядку. Ефективність фільтрації підтверджено відносно великим показником відношення сигналу до перешкоди (53 дБ), а також тим фактом, що форма імпульсу, відбитого від дефекту, залишилася майже без зміни. При збільшенні відстані між перетворювачем і об'єктом контролю до 2,5 мм в результаті вейвлет-фільтрації було отримано найкращий результат в відношенні сигналу до шуму надав вейвлет Койфлета.

При використанні функцій вейвлетів Добеші (db) і Койфлета (coif) як базисних в результаті вейвлет-фільтрації вдалося збільшити відношення сигналу до перешкоди в середньому на 20 дБ і впевнено виділити корисний сигнал на тлі перешкод, що свідчить про перспективність використання подібного роду перетворень в завданнях фільтрації.

Отримані рішення можна використовувати для впровадження в алгоритми фільтрації сигналів у бло-

ках цифрової обробки автоматизованих систем неруйнівного УЗ контролю.

Список литературы

1. Дубровин В. И. 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. – 2015. – № 1. – С. 26–31.
2. Конюшенко И. О. Применение вейвлет-анализа для расширения возможностей спектрального анализа металлов и сплавов / И. О. Конюшенко, В. М. Немец, А. С. Носов // Вестник СПбГУ, 2014. – № 4. – С. 479–490.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
4. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 338 с.
5. Петров Г. А. Практика использования вейвлет-анализа в дефектоскопии : учебное пособие / Г. А. Петров, Е. В. Шуранов. – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2012. – 65 с.
5. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов / Н. К. Смоленцев. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 304 с.

Одержано 08.04.2021

Дейнега Л. Ю. Бережной А. Ю. Козлов В. В. Судаков В. Р. Оценка качества обработки металлических поверхностей методом вейвлет-анализа

Цель работы. Проанализировать эффективность использования вейвлет-анализа для оценки качества поверхностей металлов. Исследовать возможность использования вейвлет-анализа при ультразвуковой дефектоскопии. Определить оптимальные вейвлет-семейства и их критерии для оценки качества обработки металлических поверхностей.

Методы исследования. Рассмотрены ортогональные вейвлеты: вейвлет Добеши, вейвлет Симлета и вейвлет Койфлета, которые обеспечивают возможность осуществления процедуры дискретного вейвлет-преобразования. Рассмотрены критерии, которые влияют на результативность фильтрации ультразвукового сигнала методами с использованием вейвлет-анализа. Проведена фильтрация ультразвуковых сигналов с помощью вейвлет функций.

Полученные результаты. Определено, что для успешной фильтрации сигналов выбранный вейвлет-метод должен обеспечивать дискретное вейвлет преобразование, и иметь сходство формы вейвлет-функции в локальных особенностях сигналов ультразвукового дефектоскопа. При проведении работы выбран жесткий порог ограничения коэффициентов детализации вейвлет анализа, поскольку он является лучшим для задач фильтрации. Эффективность фильтрации подтверждена относительно большим показателем отношения сигнала к помехе, а также тем фактом, что форма импульса, выделенного от дефекта, осталась почти без изменения.

Научная новизна. При использовании в качестве базисных функций вейвлетов Добеши и Койфлета в результате вейвлет-фильтрации удалось увеличить отношение сигнала к помехе на 20 дБ и уверенно выделить полезный сигнал на фоне помех, что свидетельствует о перспективности использования подобного рода преобразований в задачах фильтрации.

Практическая ценность. Полученные решения можно использовать для внедрения в алгоритмы фильтрации сигналов в блоках цифровой обработки автоматизированных систем неразрушающего ультразвукового контроля.

Ключевые слова: вейвлет, дискретное вейвлет преобразование, разложение сигнала, удаление шумов, дефектоскопия, неразрушающий ультразвуковой контроль, python.

Deineha L., Berezhnyi O., Kozlov V., Sudakov V. Quality evaluation of metal surfaces treatment by wavelet analysis

Purpose. Analyze the effectiveness of using wavelet analysis to assess the quality of metal surfaces. Investigate the possibility of using wavelet analysis in ultrasonic flaw detection. Determine the optimal wavelet families and their criteria for assessing the quality of metal surface processing.

Research methods. Orthogonal wavelets are considered: Daubechies wavelet, Simlet wavelet and Coiflet wavelet, which provide the possibility of performing a discrete wavelet transform procedure. The criteria influencing the effectiveness of ultrasonic signal filtering by methods using wavelet analysis are considered. Ultrasonic signals were filtered using wavelet functions.

Results. It has been determined that for successful signal filtering, the selected wavelet method must provide a discrete wavelet transformation and have a similarity in the wavelet function shape in the local features of the ultrasonic signals flaw detector. During the work, a rigid threshold for limiting the detail coefficients of wavelet analysis was chosen, as it is the best for filtering tasks. The filtering efficiency is confirmed by the relatively high signal to noise ratio, as well as by the fact that the shape of the pulse extracted from the defect remained almost unchanged.

Scientific novelty. When using the Daubechies and Coiflet wavelets as basic functions, as a result of wavelet filtering, it was possible to increase the signal to noise ratio by 20 dB and confidently isolate the useful signal against the background noise, which indicates the prospects of using this kind of transformations in filtering problems.

Practical value. The obtained solutions can be used for implementation in signal filtering algorithms in digital processing units of automated non-destructive ultrasonic control systems.

Key words: wavelet, discrete wavelet transform, signal deconstructing, removing noise, flaw detection, non-destructive ultrasonic contro, python.