

УДК 620.179

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ БЕЗКОНТАКТНОГО АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ

Т.Т. Котурбаши, М.О. Карнаш

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел: (03422) 4-20-02, e-mail: koturbash@nung.edu.ua

При реалізації безконтактного акустичного контролю виникають труднощі, пов'язані із значними втратами енергії ультразвукового сигналу та його зашумленням. Застосування традиційних методик для ідентифікації луно імпульсів не дає бажаного результату. В статті здійснено аналіз методів підвищення чутливості безконтактного акустичного контролю, зокрема методів обробки зашумленого ультразвукового сигналу з метою виявлення відбитих від дефектів та поверхонь ультразвукових імпульсів.

Ключові слова: безконтактний акустичний контроль, чутливість, швидке перетворення Фур'є, штучні нейронні мережі, вейвлет–перетворення

При реализации бесконтактного акустического контроля возникают трудности, связанные со значительными потерями энергии ультразвукового сигнала и его зашумления. Применение традиционных методик для идентификации эхоимпульсов не дает желаемого результата. В статье осуществлен анализ методов повышения чувствительности бесконтактного акустического контроля, в частности методов обработки зашумленного ультразвукового сигнала с целью выявления отраженных от дефектов и поверхностей ультразвуковых импульсов.

Ключевые слова: бесконтактный акустический контроль, чувствительность, быстрое преобразование Фурье, искусственные нейронные сети, вейвлет–преобразования

When implementing contactless acoustic control difficulties, associated with significant energy losses of the ultrasonic signal and its noise, appear. The use of traditional methods for identification echo pulses gives no the desired result. In the article an analysis of methods to increase the sensitivity of non-contact acoustic control has been accomplished, in particular, methods of processing the noisy ultrasound signals to identify reflected from defects and surfaces ultrasonic pulses.

Keywords: noncontact acoustic testing, sensitivity, fast Fourier transform, artificial neural network, wavelet–transform

Найбільш широке застосування ультразвуковий метод контролю отримав в галузі дефектоскопії матеріалів та виробів. В загальному, на ультразвуковий контроль припадає велика частина неруйнівного контролю, причому частка ручного контролю залишається найбільшою. Це пов'язано з тим, що переважна частина контролю виконується на об'єктах, що перебувають в експлуатації (трубопроводах, металоконструкціях тощо).

Серійні засоби ультразвукового контролю призначені для вимірювання інформативного параметру дефектів, такого, як амплітуда відбитого чи пройшовшого імпульсу. Значення амплітуди залежить від багатьох факторів, зокрема, від структури виробу, що контролюється (включення, зернистість, композитний склад), від акустичного контакту перетворювача та виробу, від відмінності

акустичних опорів на границях розділу середовищ. Удосконалення ультразвукових дефектоскопів і методик контролю проводиться в рамках вимірювання наведеного інформативного параметру. Тому сучасні наукові дослідження, які спрямовані на розвиток ультразвукових методів та засобів неруйнівного контролю, зосереджені на покращенні технічних характеристик апаратури та розробленні нових способів оброблення вимірної інформації.

На даний час найбільш перспективним напрямком в галузі ультразвукового контролю є розроблення та удосконалення безконтактних методів ультразвукового контролю [1-3]. Використання таких технологій доцільне на протяжних об'єктах контролю, що потребують 100% контролю, автоматизації та прискорення проведення контрольних операцій, або мають

односторонній доступ, наприклад, конвеєрні стрічки, трубопроводи, в тому числі полімерні, резервуари тощо. Актуальність безконтактного ультразвукового контролю пояснюється нижчою вартістю та простішою технічною реалізацією засобів та методик контролю у порівнянні з радіографічним контролем, більшою достовірністю контролю у порівнянні з магнітними та електромагнітними методами, а також можливістю застосування для немагнітних матеріалів.

У закордонній практиці відомі лабораторні установки та несерійні пристрої [4-6], що реалізують безконтактний ультразвуковий контроль для специфічних вузьких задач. Українські вчені також зробили спробу реалізації безконтактного ультразвукового контролю товщини [7, 8]. Їхні зусилля були зосереджені на:

- удосконаленні конструкції первинного п'єзоелектричного перетворювача шляхом введення в його конструкцію багатопарового елемента, що узгоджує акустичні імпеданси повітря та п'єзоелемента;

- розробленні специфічної системи оброблення вимірювальної інформації для виділення сигналів за відношень сигнал/шум, що менші 1.

Проте розроблена система вимагає використання двох спеціально розроблених перетворювачів та забезпечення двостороннього доступу до об'єкта контролю, що досить складно реалізувати у польових умовах.

Аналізуючи досягнення закордонних та вітчизняних вчених у реалізації безконтактного акустичного контролю, можна сформулювати наступні вимоги до методів підвищення чутливості безконтактного ультразвукового контролю:

- можливість реалізації методів на серійних засобах для ультразвукового контролю;

- забезпечення отримання достовірного результату контролю при односторонньому доступі до об'єкта контролю;

- забезпечення функціонування методів на стандартних частотах ультразвукових перетворювачів з метою уникнення необхідності розробки нових приладів та нового нормативного забезпечення контролю.

Апаратне удосконалення безконтактного ультразвукового контролю з метою підвищення чутливості передбачає наступне: удосконалення конструкції первинного перетворювача з метою забезпечення меншого затування та втрат енергії імпульсу на границі розділу середовищ (перетворювач-повітря) [7], фокусування імпульсу перетворювача [9], зменшення власних

шумів перетворювача та покращення шумових характеристик акустичного тракту [10], аналогову фільтрацію, формування імпульсів та згладжування пульсацій [11], демпфування випромінюючого перетворювача, обмеження сигналу, автоматичний контроль амплітуди сигналу та підвищення амплітуди зондуючого імпульсу тощо.

Характерною особливістю безконтактного ультразвукового контролю є відносна стабільність значення амплітуди відбитого імпульсу у порівнянні з традиційним контролем внаслідок постійності акустичного повітряного контакту. При традиційному контактному акустичному контролі часто спостерігається відносна нестабільність значення амплітуди внаслідок впливу контактної речовини, нерівномірності притискання перетворювача, тощо. Проте співвідношення сигнал шум при безконтактному контролі є значно меншим від 1 і, відповідно, виявлення відбитих імпульсів стає значно складнішою задачею. Стандартні методики виявлення відбитих імпульсів та визначення їх амплітуди не можуть бути застосовані для обробки результатів безконтактного акустичного контролю. Вирішення проблеми детектування амплітуди відбитого сигналу є основним критерієм підвищення чутливості безконтактного контролю.

Виходячи з вищесказаного, при контролі виробів за допомогою безконтактних акустичних перетворювачів виникає проблема виявлення імпульсів відбитих від дефектів або поверхонь, що знаходяться нижче рівня шумів. Проте, внаслідок присутності власних шумів перетворювача, теплових шумів підсилювача, інших завод та значних втрат енергії акустичних коливань на границях розподілу (п'єзоматеріал/повітря, повітря/метал та метал/повітря), як правило, не можливо отримати на екрані осцилографа ехо-імпульси та чітко їх локалізувати. Інформаційний сигнал в такому випадку маскується шумом.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що для підвищення чутливості шляхом зменшення впливу шумів та виділення корисного сигналу в основному використовуються наступні методи: метод взаємної кореляції [12], вейвлет-перетворення [13], метод роздільних спектрів (split spectrum processing) [14], кепстральний (power cepstrum) та авторегресійний кепстральний (autoregressive cepstrum) аналіз [15], М-послідовності [12], штучні нейронні мережі [16], коди Баркера та інші методи представлення та обробки дефектоскопічної інформації.

Для виявлення ехо-імпульсів в зашумлених сигналах широко використовують метод взаємної кореляції [12]. Суть методу полягає у розрахунку значень кореляції отриманої вибірки із ідеальним сигналом між двома цифровими послідовностями випроміненого $x_T(nT)$ та отриманого $x_E(nT)$ сигналів:

$$\begin{aligned} x_T(nT) &= s(nT) + v(nT), \\ x_E(nT) &= \alpha \cdot s(nT - D) + n(nT), \end{aligned} \quad (1)$$

де T – інтервал вимірювання, $s(nT)$ – згенерований сигнал, $v(nT)$ та $n(nT)$ – некорельований шум, α – визначений коефіцієнт послаблення сигналу, D – необхідне значення затримки ехо-сигналу. Кореляція цих послідовностей визначається наступною формулою:

$$C(kT) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_T(nT) x_E(nT + kT). \quad (2)$$

На практиці значення необхідної затримки D визначають за піком кореляційної функції (2) а необхідне значення затримки та відстань до дефекту визначають за піком огинаючої ехо-сигналу. Огинаючу ехо-сигналу можна визначити, використовуючи перетворення Гілберта [18]. Тоді знаходять кореляцію випроміненого і перетвореного ехо-сигналу, причому перевагою такого методу є те, що знаходять перехід нуля функції кореляції, а не її максимум.

Метод взаємної кореляції часто поєднують з так званим методом цифрових вікон. За цим методом досліджуваний сигнал поділяють на вікна розміром рівним розміру виконання корисного сигналу, котрі частково перекриваються. Вікно пересувається вздовж сигналу з певним кроком, розраховується кореляція між сусідніми вікнами для визначення затримки сигналу.

Найчастіше для підвищення інформативності та чутливості методу ідеальний сигнал певним чином кодується. Найкращими для цієї задачі є коди Баркера. Такий підхід часто використовують для радіолокації, в цивільній та військовій інженеріях. Використання кодів Баркера для модуляції зондуєчих сигналів ЕМА-перетворювачів при дефектоскопії різьбових з'єднань дає можливість підвищити чутливість та відношення сигнал/шум до 6 дБ. Відношення сигнал/шум також зростає до 17 дБ із збільшенням довжини коду Баркера. Проте для ехо-імпульсного методу збільшення

довжини коду спричиняє збільшення тривалості збуджуючого та ехо-імпульсу, що унеможливає розпізнання донного та поверхневого ехо-імпульсів при малих товщинах, оскільки вони накладаються. Застосування кодів Баркера також обмежене інерційністю пезоперетворювачів, які не можуть достатньо точно відтворювати коди Баркера в імпульсному режимі.

Метод взаємної кореляції не дає очікуваних результатів виявлення ехо-імпульсів при значному зашумленні та спотворенні сигналу внаслідок впливу структури контрольованого матеріалу, структурного шуму, накладання ехо-імпульсів. В польових умовах, коли співвідношення сигнал/шум може значно перевищувати лабораторні значення, метод також не дозволяє однозначно локалізувати ехо-імпульс. Поєднання методів взаємної кореляції та кодування сигналу дозволило в лабораторних умовах локалізувати корисний сигнал при співвідношенні сигнал шум 6 дБ.

Вейвлет-методи пониження шуму та підвищення інформативності ультразвукового сигналу є відносно новим способом обробки ультразвукового сигналу в часовій та частотній областях [19]. Вейвлет-перетворення, на відміну від перетворення Фур'є, дозволяє представити сигнал $s(t)$ як суму елементарних частин – вейвлетів. Вейвлет перетворення являє собою кореляцію між сигналом та набором базових вейвлетів. Дочірні вейвлети $\psi_{a,b}(t)$ отримують з материнського вейвлета $\psi(t)$ шляхом розширення та зсуву. Материнський вейвлет виражається формулою:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (3)$$

Неперервне вейвлет перетворення функції $s(t)$ є таким:

$$CWT_x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (4)$$

Наведений вираз дає в результаті жорстке перетворення, з метою уникнення такої жорсткості параметри зміщення b та розширення a дискретизують. Один з найбільш популярних методів дискретизації полягає в заміні розширення a на 2^j , а зміщення b на $2^j n$. В результаті отримують подвійний вейвлет. Подвійне дискретне вейвлет-перетворення може бути здійснене за формулою

$$DWT_x(j, n) = CWT_x(2^j, 2^j n) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t}{2^j} - n\right) dt, j, n \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

Наведений вираз дозволяє отримати ортогональний статично-невизначений велет розклад. Основна ідея зниження шуму за допомогою вейвлет перетворення полягає в тому, що корисний сигнал з певною хвильовою структурою знаходиться на кількох вейвлет коефіцієнтах, тоді як шум з більш випадковою структурою розміщується на більшій кількості вейвлет коефіцієнтах. В такому простому підході зниження шуму за допомогою вейвлет перетворення може бути здійснено наступним чином: здійснити вейвлет-перетворення зашумленого сигналу, відкинути та/або задати порогові вейвлет коефіцієнтів у перетвореному сигналі, виконати реконструкцію знесумленого сигналу за допомогою інверсного перетворення. Для задання порогові вейвлет коефіцієнтів існує багато методів та підходів, найбільш поширеними є м'яке та жорстке пороговування.

Найбільш часто вейвлет-перетворення застосовується для покращення розпізнавання відкликів від дефектів у зашумлених ультразвукових сигналах. Значним недоліком методу є складний вибір з поміж методів задання порогові вейвлет-перетворення та вибором материнського вейвлету, оскільки кожний з цих факторів може дати різний результат в залежності від умов застосування. Проте перевагою методу є значно швидше здійснення перетворення сигналу, ніж при перетворенні Фур'є. Практична реалізація методу дозволила чітко локалізувати корисний

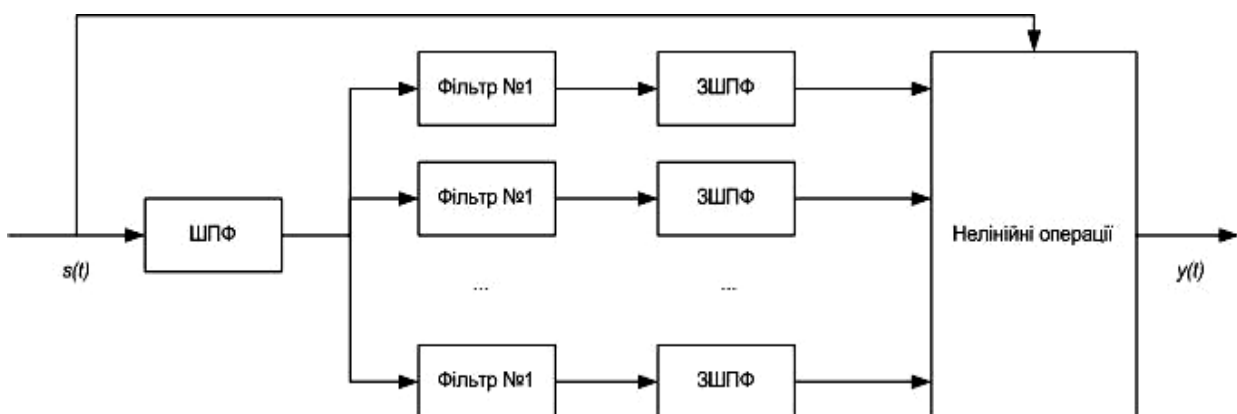
сигнал при співвідношенні сигнал/шум 6 дБ. Відповідно для реалізації методу необхідні значні обчислювальні потужності і достатня підготовка оператора для оцінювання результатів.

Багатообіцяючим способом обробки сигналів в неруйнівному контролі є так званий метод роздільних спектрів [12]. Метод роздільних спектрів дозволяє покращити виявлення ехо-імпульсів в матеріалах, мікроструктура яких створює широкодіапазонний шум з великою амплітудою, що маскує корисний сигнал. Цей метод дозволяє уникнути потреби проведення багатократних вимірювань та отримати частотний розподіл сигналу без перезбору даних. Метод роздільних спектрів складається з двох основних кроків (рис. 1):

1) отриманий сигнал перетворюють в часово-частотний образ за допомогою банку фільтрів;

2) зворотно-трансформований сигнал піддають обробці нелінійними операторами.

Для розділу отриманого сигналу на спектри використовують Гаусівські смугові фільтри з різними центральними частотами але однаковою шириною смуги пропускання. Для кожної спектральної об'єкти сигналу застосовують зворотне перетворення Фур'є. Для подальшої обробки сигналу використовують різні алгоритми [12]: розклад Габора (Gabor decomposition), метод геометричного середнього (geometric mean), полярного пороговування (polarity thresholding), групової затримки рухомої ентропії (group delay moving entropy), нейронні мережі, оптимального детектора (optimal detector).



ШПФ – швидке перетворення Фур'є; ЗШПФ – зворотне швидке перетворення Фур'є

Рисунок 1 – Обробка сигналу за допомогою методу роздільних спектрів

Практичне застосування розкладу Габора має певні обмеження до застосування для коротких високочастотних сигналів, розклади яких включають велети та потребують великого числа циклів обчислення [12]. Методи геометричного середнього та полярного порогоування базуються на фазових характеристиках чистого сигналу без шуму. Тому дуже важко передбачити як ці алгоритми працюватимуть при значно зашумлених сигналах. Це є одним з основних недоліків даних методів обробки при аналізі методом роздільних спектрів. Метод групової затримки рухомої ентропії можна ефективно використовувати для вибору оптимальної області частот для аналізу роздільними спектрами. Метод має потенціал для використання при виявленні дефектів в композитних та багат шарових матеріалах. Ще один метод нелінійної обробки сигналу, метод оптимального детектора, використовується для виявлення луно-сигналів в крупнозернистих матеріалах [20]. Обмеженням цього методу є припущення, що Гаусівський випадковий процес може апроксимувати випадкові шуми в матеріалах.

Кожний з наведених алгоритмів є чутливим до певних впливових чинників, наприклад, кількості та параметрів фільтрів. На даний момент невідомо яким саме чином слід здійснювати оптимізацію методу та вибір алгоритму кінцевої обробки. Широке застосування методу також обмежує значний час обробки сигналу. Названі обмеження показують потребу в розробці нових алгоритмів та/або комбінації існуючих з метою отримання кращих результатів виявлення корисного сигналу в зашумленому.

Метод кепстрального аналізу застосовують в основному для аналізу луно-сигналів, що накладаються, таких як багатократні луно-сигнали в композитних та багат шарових матеріалах. Найбільшого застосування метод здобув при дефектоскопії у тонких композитних матеріалів. Проте недоліком методу є його неефективність для сигналів з співвідношенням сигнал/шум меншим 18 дБ.

Для підвищення інформативності ультразвукового сигналу часто використовують методи штучних нейронних мереж (ШНМ) [8, 12]. Особливістю ШНМ є класифікації і розпізнавання образів, мережа накопичує в процесі навчання знання про основні властивості цих образів, таких як геометричне відображення структури образу, розподіл головних компонентів або інших характеристик. При узагальненні акцентується увага на

відмінностях образів один від одного, які складають основу для вибору класифікаційних рішень. Саме ця особливість ШНМ є важливою для оброблення зашумлених сигналів при безконтактному акустичному контролі геометричних характеристик елементів металоконструкцій.

Суть методу полягає у попередньому тренуванні вибраної структури ШНМ на ідеальному сигналі. Для тренування нейромережі на її вхід подають зашумлені із різним рівнем шуму корисні сигнали та шуми. При подаванні на вхід нейромережі зашумленого корисного сигналу на вихід поступає значення, яке фіксує відсутність корисного сигналу, і навпаки, при подаванні корисного сигналу мережі поступає значення, яке фіксує наявність корисного сигналу.

Використання нейромережевого підходу у комплексі з методом цифрових вікон та попереднім фільтруванням сигналу дозволило чітко визначити прохідний ультразвуковий імпульс у сигналі з співвідношенням сигнал/шум 6 дБ [8].

До характерних переваг зазначеного нейромережевого методу у порівнянні із класичним підходом слід віднести наступне: розпізнавання значно зашумлених сигналів з співвідношенням сигнал/шум меншим 1; незалежність від форми вхідного сигналу і її характеру; можливість удосконалення шляхом зміни в архітектурі ШНМ; застосування більш досконалих методів тренування та згладжування; простота апаратної реалізації методу на базі мікропроцесорної техніки.

ВИСНОВКИ

Аналізуючи розглянуті методи виявлення луно-імпульсів в зашумлених ультразвукових сигналів, можна зробити такі висновки:

- існуючі методи підвищення чутливості акустичного контролю потребують удосконалення для забезпечення їх використання у безконтактному ультразвуковому неруйнівному контролі;

- задля забезпечення найнижчого рівня шумів при створенні акустичного повітряного зв'язку необхідно враховувати конкретні характеристики об'єкта та середовища контролю та удосконалювати конструкції безконтактних акустичних перетворювачів;

- перспективним є комплексування існуючих методів обробки сигналів контролю для підвищення чутливості акустичних методів контролю з метою забезпечення однозначної ідентифікації луно-імпульсу в зашумленому сигналі та можливості їх апаратної реалізації у

сучасних серійних засобах контролю.

Найбільш актуальним є питання безконтактного акустичного контролю для об'єктів, які неможливо або недоцільно контролювати традиційним ультразвуковим контролем та/або іншими методами неруйнівного контролю. Зокрема це стосується протяжних об'єктів, таких як пластикові труби після зварки, елеваторні стрічки тощо. Спрацювання конвеєрних стрічок, зменшення їх товщини і, як результат, розрив стрічки є причиною частой зупинки виробництва. Застосування інших методів неруйнівного контролю для цих об'єктів обмежено внаслідок значних фінансових та часових затрат на їх реалізацію, враховуючи той фактор, що контроль слід проводити по всій довжині об'єкту, не зупиняючи виробництво. Перспективним для вирішення цієї задачі є метод безконтактного ультразвукового контролю.

1. Vinay Dayal. *Air-Coupled Ultrasound: A New Paradigm in NDE* / Vinay Dayal, David K. Hsu, Adam H. Kite // *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2007)*, Vol. 13: *Processing and Engineering Applications of Novel Materials* - 2007. - P. 153-155. 2. David K. Hsu. *Nondestructive testing using air-borne ultrasound* / David K. Hsu. // *Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU)* - 2006 - Vol. 44. - P. 1019-1024. 3. Jayaraman Subash. *Progress in air-coupled ultrasound* / Subash Jayaraman, Dominik Pellkofer, Ian Lucas, Michal Bezdek, Bernhard Tittmann // *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure and Homeland Security* - 2007. - *Proceedings* Vol. 6531. 4. Tat H. *Evaluation of Air Coupled Ultrasound for Composite Aerospace Structure* / H. Tat, G. Georgeson, R. Bossi // *Proceedings of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* - Vol. 1096 - 2009 - P. 912-919. 5. Jinying Zhu. *Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo* / Jinying Zhu, John S. Popovics // *Journal of engineering mechanics ASCE* - 2007 - P. 628-640. 6. F. Lanza di Scalea. *Non-contact ultrasonic inspection of rails and signal processing for automatic defect detection and classification* / F. Lanza di Scalea, P. Rizzo, S. Coccia, I. Bartol, M. Fateh, E. Viola, G. Pascale // *Insight - Non-*

Destructive Testing and Condition Monitoring, Issue: 6. - 2005.. - Vol. 47.- P. 346-353. 7. Рибіцький І.В. *Математична модель узгоджуючого шару н'езоперетворювача та розрахунок втрат енергії акустичних коливань при безконтактному способі вимірювання товщини* / І. В. Рибіцький // *Методи та прилади контролю якості*. - 2007. - № 18. - С. 40 - 45. 8. Карнаш О. М. *Експериментальна перевірка можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для підвищення чутливості безконтактного ультразвукового способу контролю товщини матеріалів* / О.М. Карнаш, І.В. Рибіцький, М.О. Карнаш // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів*. - , 2008. - вип. 13. - С. 152-160. 9. F. Montero de Espinosa. *Spherically Focused Ultrasonic Transducer* / F. Montero de Espinosa, D. E. Chimenti // *International Journal of Applied Science and Engineering*. - 2007. - №4. - P. 15 - 24. 10. A. Turo, *Ultra-low noise front-end electronics for air-coupled ultrasonic non-destructive evaluation* / A. Turo, J. Salazar, J. Chavez, H. Kichou, T. Gomez, F. Espinoza, M. Garcia-Hernandez // *NDT&E International*. - 2003. - № 36. - P. 93 -100. 11. T. Stepinski. *Automatic Defect Characterization in Ultrasonic* / T. Stepinski, F. Ligvall. // *NDT Conference proceedings, 15th WCNDT*. - Roma, 2000. 12. D. Pagodinas. *Ultrasonic signal processing methods for detection of defects in composite materials* / D. Pagodinas // *Ultragarsas*. - 2002. - №4 (45). - P.47-54. 13. Благітко Б. *Виділення сигналу з суміші сигнал-шум за допомогою вейвлет-перетворення* / Б. Благітко, В. Бригілевич, І. Ярмоловський // *Вісник Львів. УН-ТУ; Серія фізична*. - 2006. - Вип. 39. - С. 300-306. 14. A. Khireddine. *Signal Processing Techniques for the Characterization Ultrasound Complex* / A. Khireddine, J.P. Salvestrini // *Materials International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 1. - No. 5. - December, 2009. 15. Wooh S.C. *Cepstrum-based deconvolution of ultrasonic pulse-echo signals from laminated composite materials* / Wooh S.C., Wei C. // *Proceedings of the 12th Engineering Mechanics Conference: A Force for the 21st Century: American Society of Civil Engineers. La Jolla, CA, May 17-20, 1998*. 16. M. Thavasimuthu. *Improving the evaluation sensitivity of ultrasonic pulse echo technique using a neural network classifier* / M.

- Thavasimuthu, C. Rajagopalan, P. Kalyanasundaram, Baldev Raj // *NDT&E International*. – 1996. - Vol. 29. - No. 3. - P. 87-93. 17. Ewa Swiercz. A new method of detection of coded signals in additive chaos on the example of Barker code / Ewa Swiercz // *Signal Processing* 86. – 2006. - P. 153 –170. 18. Grennberg A. Estimation of subsample time delay differences in narrowband ultrasonic echoes using the Hilbert transform correlation./ Grennberg A., Sandell M. // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. - 1994.- Vol.41.- No.5.- P.588-595. 19. Ik Keun Park. *Experimental Wavelet Analysis and Applications to Ultrasonic Non-destructive Evaluation* / Ik Keun Park, Un Su Park, Hyung Keun Ahn, Sook In Kwun, Jai Won Byeon // *PROCEEDINGS 15th World Conference on Non-Destructive Testing*. - Rome, 2000. 20. Kwong Ki Yau. *Split-Spectrum // Processing for Nondestructive Testing: NDTnet - August 1997*, Vol.2. - No.08.

Поступила в редакцію 23.11.2010 р.

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Карпаш О.М.**