



## ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ

М. О. КАРПАШ, канд. техн. наук (Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу)

*Проведено короткий аналіз існуючих методів підвищення чутливості неруйнівного контролю на прикладі акустичного методу, результати якого вказали на їх недоліки та дозволили встановити напрямки подальших досліджень. Запропоновано новий метод підвищення чутливості неруйнівного контролю, що полягає у застосуванні штучних нейронних мереж до вимірювальної інформації за відношення сигнал/шум, що є значно меншими одиниці. Проведено моделювання запропонованого методу на теоретичних даних, а також приведено результати його експериментальної апробації за умов безконтактного ультразвукового контролю геометричних параметрів сталевих виробів.*

*Brief analysis of available methods of improvement of NDT sensitivity was performed for the case of an acoustic method, the results of which revealed their drawbacks and allowed establishing the directions of further research. A new method is proposed to improve NDT sensitivity that consists in application of artificial neural networks to measurement data based on signal/noise ratio that is much lower than a unity. Simulation of the proposed method was performed on theoretical data, and the results of its experimental verification under the conditions of contactless ultrasonic control of geometrical parameters of steel products are given.*

Зростання рівня існуючих технологій НК в переважній більшості галузей промисловості ґрунтується на поглибленні знань щодо використання нових матеріалів при виготовленні первинних перетворювачів і методів оброблення вимірювальної інформації. Останній напрямок є особливо актуальним стосовно тих методів НК, що застосовуються для контролю напружено-деформованого стану, визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, оцінки структури матеріалів, розпізнавання типів дефектів, дослідження кінетики початкової стадії руйнування взірців та виробів під час випробувань.

Слід зазначити, що за проведення наведених вище видів НК, як правило, відсутні або складні у відтворенні взірці для налаштування апаратури, а також складно встановити критерії відбракування.

Характерною особливістю оцінки результатів контролю під час визначення вказаних вище параметрів є складність інтерпретації інформаційних сигналів, оскільки одержувана інформація про результати контролю не завжди однозначна, інформаційні сигнали зашумлені, або у кращому випадку їх амплітуда співрозмірна з рівнем завод.

Особливо актуальна ця проблема під час використання акустичних методів контролю, що надзвичайно широко використовуються в промисловості. Основними перевагами акустичного методу є його висока чутливість, проникна здатність та здатність щодо миттєвої індикації дефектів.

Проілюструємо актуальність описаної проблеми на прикладі, що характерний і для інших застосувань — контроль геометричних параметрів безконтактним ультразвуковим (УЗ) методом. До обмежень фізичного характеру цього методу на-

лежить те, що значна частина енергії УЗ коливань на границях розділу (п'єзоелемент/повітря, повітря/метал та метал/повітря) втрачається. На частоті коливань в межах 1 МГц відношення сигнал/шум значно перевищуватиме 1. Компенсування значної частини втрат енергії на першій границі розділу може бути забезпечене завдяки використанню нових матеріалів, які б дали змогу узгодити акустичні імпеданси п'єзоелементу та повітря. Проте завади, що створюються на межі розділу повітря/метал, можливо частково подолати виключно завдяки застосуванню нових способів оброблення сигналів.

Існує значна кількість достатньо розвинутих методів підвищення точності та подолання завод при УЗ НК. Серед них слід згадати метод випробувальної методології за калібрувальними чинниками завод, що базується на вимірюванні відкликів приладу при поданні на нього каліброваних заважаючих збуджень в зоні випробувань [1]. Аналіз записаних відкликів забезпечує можливість розрахунку коригувань результатів вимірювань, підібрати відповідні методики оброблення даних [2] та визначити невизначеності вимірювань [3]. Проте даний підхід суттєво залежить від конкретного об'єкта контролю, оскільки калібрування відбувається за місцем, а також потребує суттєвої попередньої підготовки [4].

Також відома методика адаптивного подавлення шуму при обстеженні об'єктів із анізотропною різнозернистою структурою УЗ методом [5]. Методика базується на використанні адаптивного фільтру методу найменших квадратів у поєднанні із еталонним та довідковим сигналами, отриманими із двох суміжних положень перетворювача. Серед переваг даного методу слід виділити



відносно покращення відношення сигнал/шум майже у 1,5 рази порівняно із початковим сигналом.

Відомий метод [6] виділення детермінованих складових сигналів, який полягає у тому, що вибирають оптимальний низькочастотний фільтр шляхом аналізу сигналу за паралельними каналами, в кожному з яких двічі виконується фільтрація шляхом одно- та двократного пропускання вихідного сигналу через фільтр низьких частот із подальшим виділенням енергії різниці сигналів двох фільтрацій визначають канал із максимальною енергією зі сторони низькочастотних каналів, який і містить оптимальний фільтр низьких частот. Детерміновану складову визначають як суму двох сигналів, перший із яких є реакцією оптимального низькочастотного фільтра на вихідний сигнал, а другий пропорційний різниці першого сигналу і реакції двократного проходження через оптимальний фільтр вихідного сигналу з коефіцієнтом пропорційності. Після цього різницю між вихідним сигналом і детермінованою його складовою приймають за новий сигнал і цикл операцій повторюють до співпадіння місця положення максимуму на спектрі енергій із положення на попередньому циклі.

До недоліків даного методу слід віднести необхідність виконання великої кількості обчислень, що унеможлиблює його використання в умовах реального часу. Іншими недоліками вказаного методу є чутливість до наявності гаусового шуму в сигналі, який буде спричиняти суттєві спотворення енергетичного спектру, а також призводити до виникнення похибок даного методу.

Відомий також спосіб [7] виділення характеристик форми сейсмічних сигналів. Даний метод призначений для розпізнавання сигналів за їх формою. Вважається, що кожен вхідний сигнал є комбінацією основного сигналу із певної групи та шуму. Основний сигнал для кожної групи отримується шляхом виділення форм сигналів із ортонормальними основами. Таким чином, основний сигнал репрезентує окрему групу сигналів. Метод реалізується шляхом використання так званого плаваючого вікна — спосіб аналізування сигналів із одиничним кроком по вибірці в межах обраного розміру сигналу, який необхідно детектувати.

Даний метод характеризується високою імовірністю невірної класифікації сигналу, оскільки вплив розміру шуму (відношення сигнал/шум) не врахований.

Існує також метод, який передбачає використання гібридної системи на базі нейронних мереж [8–10] та вейвлет-перетворення [11] для класифікації сигналів або зображень, представлених сигналом в системі даних. Система класифікації складається із одного або більше здавачів для прийняття сигналів, засобів вейвлет-перетворення вхідних сигналів, засобів класифікації сигналів згідно кількох визначених категорій і генерування

вихідних класифікаційних сигналів. Як засіб вейвлет-перетворення використовують модуль розрахунку заданої кількості коефіцієнтів вейвлет. Як засіб класифікації використовують набір гібридних нейронних мереж, кожна із яких складається із нейромережі визначення місця розташування, нейромережі визначення величини сигналу та класифікаційної нейромережі.

До суттєвих недоліків вказаного методу слід віднести вплив вибору кількості коефіцієнтів вейвлет-перетворення (обирається оператором) та точності визначення місця положення та величини сигналу на похибку вірного детектування, яка може бути достатньо значною для сигналів із значними рівнями шуму.

Достатньо поширеним та перспективним є кореляційний метод детектування із використанням кодів Баркера [12–14]. Суть зазначеного методу полягає у розрахунку значень кореляції отриманої вибірки зашумленого сигналу із ідеальним сигналом. Найчастіше для підвищення інформативності та чутливості методу ідеальний сигнал певним чином кодується. Найкращими для вирішення цієї задачі є коди Баркера.

Проте зі всіх кодів Баркера найбільш придатним для застосування при дослідженні ультразвуком є код типу «+1 –1», який може бути представлений звичайною синусоїдою (рис. 1) і є найкоротшою послідовністю. Це слід вважати найсуттєвішим недоліком застосування послідовності кодів Баркера в акустичному контролі матеріалів та пояснюється специфікою роботи реальних п'єзоелектричних елементів [15] — коди із більшою кількістю елементів не можуть бути правильно відтворені з огляду на певну інерційність в роботі п'єзоелементів.

В даній роботі запропоновано спосіб детектування сигналів із високими значеннями шуму шляхом використання штучних нейронних мереж, аналізу значень виходів нейронів у прихованому шарі мережі при подаванні на її вхід зашумленого корисного сигналу, причому, кількість входів і ви-

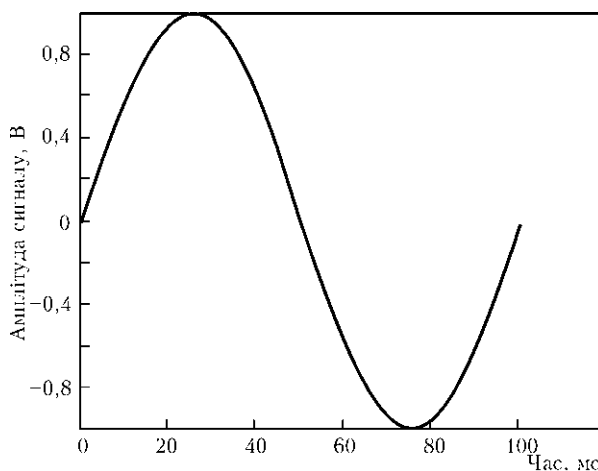


Рис. 1. Зразок ідеального сигналу



ходів мережі повинна дорівнювати тривалості корисного сигналу, поділений на крок його квантування, що дозволить використовувати даний спосіб в галузі НК для виявлення дефектів у матеріалах та виробках при їх УЗ дослідженні, в радіолокації для виявлення об'єктів на фоні значних завад, а також у інших сферах техніки, які пов'язані із обробкою сигналів з високими значеннями шуму.

Суть запропонованого способу полягає у виконанні певної послідовності обчислювальних операцій, описаних у патенті [16]. По вибірці із сигналами (рис. 2) реалізується так званий метод плаваючого вікна. Тобто, аналізується весь сигнал частинами, розмірність яких відповідає розмірності корисного сигналу (рис. 1), який необхідно виявити — із кроком 1 таке вікно пересувається вздовж всього сигналу.

В такому разі задача зводиться до аналізу вибірки із сигналу, яка може містити корисний сигнал або шум. Іншими словами, необхідно розпізнати

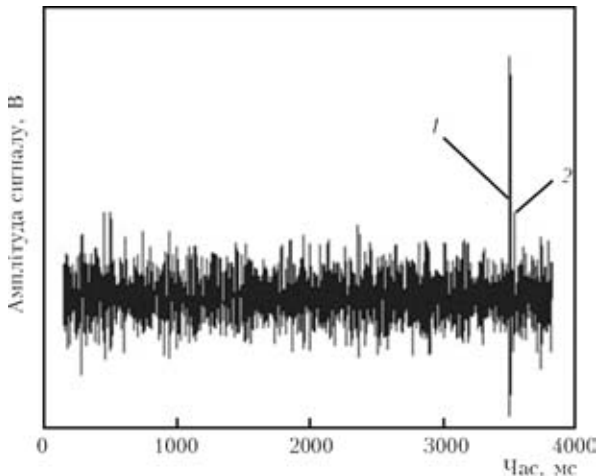


Рис. 2. Вибірка аналізованого акустичного сигналу: 1 — УЗ імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні на екрані осцилографа; 2 — УЗ імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні на екрані осцилографа, рівень якого близький до рівня шуму

в зашумленому сигналі корисний, що може вважатись синусоїдально-подібним (див. рис. 1).

Для вирішення означеної задачі розпізнавання образів використовується нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки, яка тренується шляхом подавання на її вхід і на вихід ідеального корисного сигналу. В мережі передбачається один прихований шар із довільною кількістю нейронів в межах 5–13. Наприклад, для пояснення реалізації способу було обрано 11 нейронів.

Процедура тренування полягає у налаштуванні вагових коефіцієнтів у вузлах (нейронах) мережі. Мережа із одним прихованим шаром тренується із заданим рівнем похибки (не більше 1...2 %) шляхом подавання на її вхід та вихід корисного сигналу без шуму, причому, кількість входів і виходів мережі дорівнює тривалості корисного сигналу, поділений на крок його квантування [8, 9].

Таким чином, якщо розмір плаваючого вікна (відповідає кількості нейронів на вході та виході) рівний 101, а кількість нейронів у прихованому шарі складає 11, а похибка тренування 3 %, можна стверджувати, що у виходах 11 нейронів міститься інформація про всі 101 значень вхідного образу із похибкою 3 %.

Натренована таким чином нейронна мережа може розглядатись як інструмент виділення характеристик із досліджуваного сигналу, за якими можна однозначно здійснювати класифікацію досліджуваних сигналів.

Після тренування згідно вказаних критеріїв мережа придатна для роботи із новими даними. При цьому на вхід нейромережі можуть подаватись сигнали загалом двох типів — зашумлений корисний сигнал і просто шум. Якщо сигнал, поданий на вхід нейромережі, буде розпізнано як корисний і це відповідатиме дійсності, то це означатиме, що корисний сигнал виявлено. Встановлено, що значення виходів нейронів, близьке до

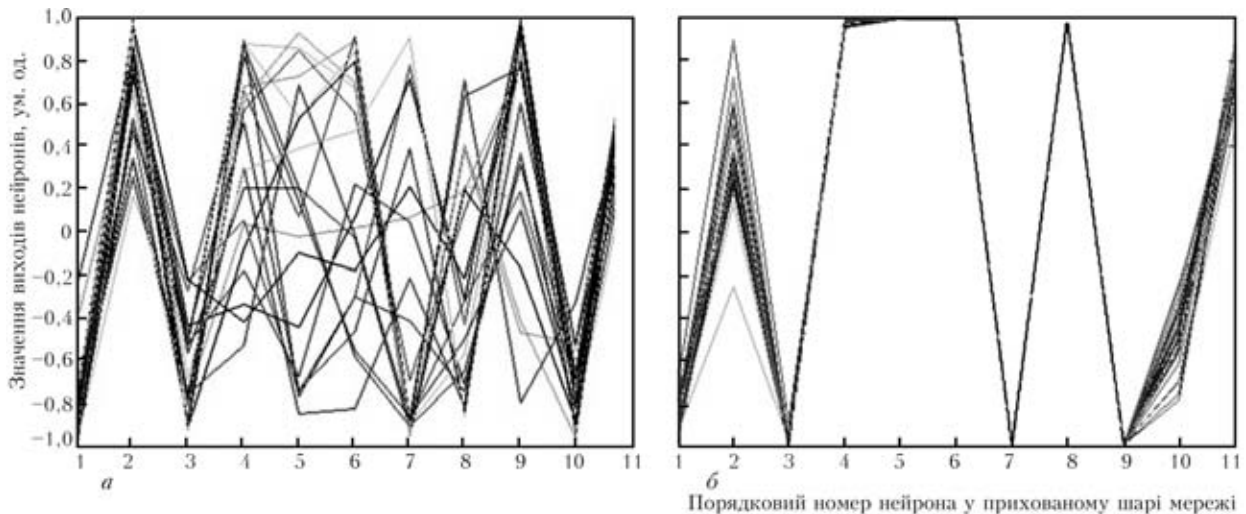


Рис. 3. Виходи нейромережі за відсутності у вхідному масиві корисного сигналу (а) та за різного рівня відношення сигнал/шум (б)



одиниці, вказує на те, що поданий сигнал є корисним, значення, близькі до нуля або  $-1$  вказують на те, що поданий сигнал не є корисним, або що рівень шумів надто великий.

Для того, щоб розрізнити між двома вказаними класами сигналів, достатньо провести розрахунок виходів нейронів внутрішнього (прихованого) шару. На рис. 3 зображені виходи нейронів прихованого шару нейромережі при поданні на її вхід шумових сигналів, які не містять корисного сигналу. На рис. 4 зображені виходи нейронів прихованого шару нейромережі при поданні на її вхід зашумлених сигналів за різних рівнів шуму.

Як видно із рис. 3, б, виходи прихованих нейронів за різних рівнів шуму для корисного сигналу повторюються на 4, 5, 6 та 8 нейронах. Наприклад, виходи нейрону 2 суттєво змінюються в залежності від рівня шуму. На рис. 3, а для жодного із нейронів у прихованому шарі повторюваності не може бути помічено.

Отже, при поданні на вхід нейронної мережі зашумленого корисного сигналу на виходах окремих нейронів у прихованому шарі мережі будуть спостерігатись однакові значення із невеликими відхиленнями, а при поданні «білого» (гаусового) шуму — ці значення будуть суттєво відрізнятись. Експериментально перевірено, що в межах кількості прихованих нейронів 5–13 (за кількості нейронів на вході і виході рівній 100) така тенденція зберігається.

На рис. 5 показані виходи даних нейронів для корисного сигналу в залежності від рівня шуму. При цьому середнє значення суми виходів вказаних нейронів складає при подачі на вхід нейромережі зашумлених корисних сигналів — 3,98 в межах рівня шуму 0...20 дБ.

Виходи тих же нейронів при подачі на нейромережу шумових сигналів, які не містять корисного сигналу зображені на рис. 5. Середнє значення суми виходів вказаних нейронів складає 0,31.

Відомо [8], що максимальне значення виходу прихованого нейрона в мережі рівне 1, а мінімаль-

не  $-1$ . Максимальне значення суми виходів обраних прихованих нейронів (4–6 та 8) дорівнює 4, а мінімальне —  $-4$ . Виходи нейронів, рівні 1, відповідають подачі на вхід мережі незашумленого корисного сигналу. Для надійного виявлення корисного сигналу за високих рівнів шуму встановлено як бракувальний критерій правильності детектування корисного сигналу — сума виходів обраних нейронів повинна бути не меншою 2, що становить 75 % абсолютного значення суми виходів обраних нейронів.

Таким чином, можемо стверджувати, що шляхом оцінки виходів нейронів прихованого шару отриманої нейронної мережі можна розрізнити між зашумленим сигналом та просто «білим» (гаусовим) шумом.

Показано, що запропонований спосіб дозволяє детектувати корисні сигнали навіть за відношення сигнал/шум рівному 0,3. Зашумлений сигнал за такого рівня шуму в порівнянні з ідеальним зображено на рис. 6. Сума виходів 4-, 5-, 6- та 8-го нейронів склали 3,45.

Експериментальну перевірку запропонованого методу було здійснено на розробленій експериментальній установці для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом відповідно до запропонованої в роботі [17] методики експериментальних досліджень. Зокрема, дослідження були проведені на сталевому зразку товщиною 3,93 мм.

Додатково в роботі [18] було виконано більш широке експериментальне перевіряння запропонованого методу у порівнянні з взаємкореляційним методом — за допомогою безконтактного УЗ контролю проводили вимірювання сталевих зразків різної товщини. Запропонований метод, що базується на використанні нейронних мереж, дозволив забезпечити вимірювання товщини в діапазоні від 0,55 до 9,53 мм, а взаємкореляційний — від 0,55 до 5 мм. Для статистичного аналізу функціонування методу було отримано по

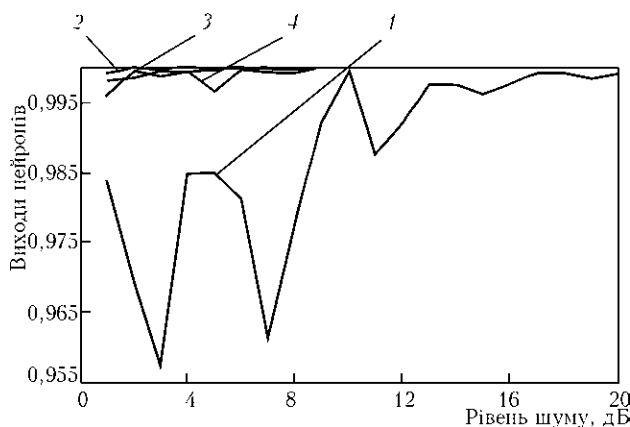


Рис. 4. Виходи нейронів залежно від рівня шуму: 1–4 — виходи 4-, 5-, 6- та 8-го нейрона прихованого шару відповідно

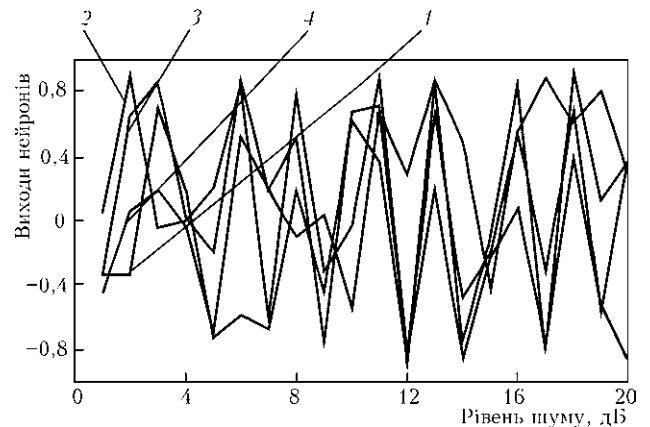


Рис. 5. Виходи нейронів при поданні шумових сигналів без корисного сигналу: 1–4 — виходи 4-, 5-, 6- та 8-го нейрона прихованого шару

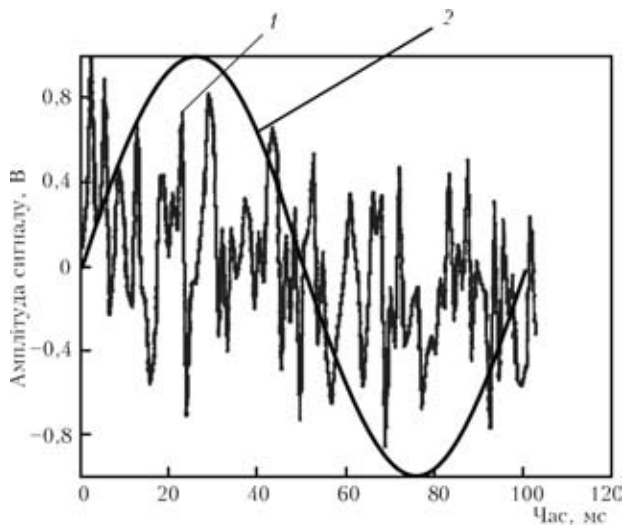


Рис. 6. Зашумлений корисний сигнал за відношенням сигнал/шум 0,3 (1) в порівнянні з ідеальним незашумленим сигналом (2)

1000 зашумлених корисних сигналів (відношення сигнал/шум рівне 0,5) та 1000 сигналів шуму.

Реалізація запропонованого методу для розглянутих наборів даних дозволяє стверджувати, що за вказаних рівнів шуму похибка правильного детектування корисного сигналу складає не більше 1,2 % (12 випадків із 1000, коли значення суми виходів нейромережі складало менше 2). В ході аналізу набору шумових сигналів кількість випадків помилкового розпізнання шуму як корисного сигналу дорівнювала 0,8 % (8 випадків із 1000).

## Висновки

Експериментально доведено можливість реалізації запропонованого методу детектування корисних сигналів за умов високих значень шуму. Даний метод може бути використаний для вирішення ряду задач НК, пов'язаних із виділенням характеристик складних сигналів, зокрема для підвищення чутливості дефектоскопії та товщинометрії, підвищення імовірності виявлення дефектів та удосконалення алгоритмів функціонування засобів НК.

*Приведен краткий анализ существующих методов повышения чувствительности НК на примере акустического метода, результаты которого указали на их недостатки и позволили определить направления следующих исследований. Предложен новый метод повышения чувствительности НК, состоящий в применении искусственных нейронных сетей к обработке измерительной информации при отно-*

*шении сигнал/шум, значительно меньшим единицы. Выполнено моделирование предложенного метода, а также описаны результаты его экспериментальной апробации в условиях бесконтактного УЗ контроля геометрических параметров стальных изделий.*

1. *Matiss I.* New possibilities of increasing accuracy for non-destructive testing. Pt 1. Basic principles and application examples // NDT&E International. — 1999. — № 32. — P. 397–401.
2. *Matiss I., Rotbakh Y.* New possibilities of increasing accuracy for nondestructive testing. Pt 2. Data processing algorithms // Ibid. — P. 403–408.
3. *Matiss I., Rotbakh Y.* New possibilities of increasing accuracy for nondestructive testing. Pt 3. Approximation algorithms and accuracy tests // Ibid. — P. 409–413.
4. *Бархатов В. А.* Распознавание дефектов с помощью искусственной нейронной сети специального типа // Дефектоскопия. — 2006. — № 2. — С. 28–39.
5. *Kim J., Udpa L., Udpa S.* Multi-stage noise cancellation for ultrasonic NDE // NDT&E International. — 2001. — № 34. — P. 319–328.
6. *Пат. 2028629 РФ, МПК G01R23/16.* Способ выделения детерминированных составляющих сигнала / Е. Л. Кулешов, Н. В. Никитина, В. А. Смолин; Заявл. 04.04.90; Опубл. 09.02.95.
7. *Pat. 6105015 US.* Wavelet-based hybrid neurosystem for classifying a signal or an image represented by the signal in a data system / K. Gong, C. Nguyen, S. Hammel; Опубл. 03.02.1997.
8. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. — М.: Вильямс, 2006. — 1104 с.
9. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 344 с.
10. *Барский А. Б.* Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 176 с.
11. *Смоленцев Н. К.* Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. — М.: Изд-во ДМК, 2005. — 304 с.
12. *Варакин Л. Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.
13. *Мальгин И. В.* Коды, коды, коды... // Технология и средства связи. — 1999. — № 3. — С. 53–57.
14. *Качанов В. К.* Использование радиолокационных сигналов и методов их обработки в ультразвуковой дефектоскопии композиционных материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1995. — № 2. — С. 3–17.
15. *Кажис Р.* О формировании псевдослучайных кодовых последовательностей пьезоэлектрическими преобразователями // Радиоэлектроника. — 1976. — 12, № 1. — С. 130–140.
16. *Пат. на винахід UA 87910 Україна, МПК G 01 R 23/16.* Спосіб детектування сигналів із високими значеннями шуму / М. О. Карпаш, О. М. Карпаш; Заявл. 07.07.2008; Опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
17. *Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О.* Експериментальна установка для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом // Методи та прилади контролю якості. — 2008. — № 20. — С. 7–12.
18. *Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О.* Обгрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 31–35.

Надійшла до редакції  
14.04.2011