

УДК 621.114.32

¹В.С. Єременко, к.т.н., доц.²А.В. Переїденко, асп.³П.А. Шегедін, студ.

КЛАСИФІКАТОР СТАНУ ВИРОБІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ АДАПТИВНОЇ РЕЗОНАНСНОЇ ТЕОРІЇ

Національний авіаційний університет

^{1,3}E-mail: nau_307@ukr.net²E-mail: zoolkis@meta.ua

Досліджено використання модифікованої нейронної мережі Fuzzy-ART в системі неруйнівного контролю стільникових панелей. Описано структуру та принцип дії розробленої системи неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів. Приведено результати використання розробленої системи для діагностики технічного стану стільникових панелей.

Ключові слова: композиційні матеріали, нейронна мережа Fuzzy-ART, нейронні мережі, неруйнівний контроль.

Постановка проблеми

На даний час не існує єдиного універсального фізичного методу діагностики композиційних матеріалів, який би дозволяв виявляти всі можливі типи дефектів. При розробці методик і систем діагностики необхідно базуватися на кількох взаємодоповнюючих фізичних методах, які дають можливість визначити найбільшу кількість найбільш небезпечних для композиційного матеріалу і виробу дефектів.

Вироби з композиційних матеріалів, які широко використовуються в авіаційній та ракетно-космічній техніці, на відміну від виробів із металів формуються з первинної сировини одночасно з формуванням цих матеріалів.

Через складність технології їх виготовлення, особливо це характерно для великогабаритних багаточасових конструкцій, такі вироби дещо відрізняються один від одного за своїми властивостями, параметри яких можна вимірювати та контролювати.

З погляду дефектоскопії це призводить до ряду методичних проблем, зокрема майже неможливо виготовити еталонні зразки для якісних виробів, а через широку номенклатуру можливих дефектів виробів із композитів ще більш складно виготовити атестовані зразки (еталони), за допомогою яких проводиться первинне налаштування дефектоскопів та ідентифікація типів і розмірів дефектів.

Отже, вирішити поставлену задачу в цьому випадку доцільно з застосуванням безеталонних методів діагностики і неруйнівного контролю.

Незважаючи на широке розмаїття методів і систем безеталонної діагностики та класифікації стану об'єктів контролю, не існує єдиного та універсального методу проведення безеталонної діагностики, виробів із композиційних матеріалів.

Серед найбільш перспективних методів безеталонної діагностики та класифікації є методи, засновані на використанні штучних нейронних мереж. Застосування цих методів дозволяє отримати:

- високу завадостійкість;
- незалежність від впливу зовнішніх факторів;

- високу ефективність контролю.

Нейронні мережі дають можливість:

- побудувати складні гіперплощини;
- проводити класифікацію лінійно неподільних об'єктів;
- запам'ятовувати нову інформацію і доповнювати власну базу знань про номенклатуру можливих класів без втрати раніше вивченої інформації.

Використання нейронних мереж при створенні систем безеталонної діагностики дозволяє:

- підвищити вірогідність контролю;

- значно зменшити вартість реалізації системи;

- знизити апаратні та програмні витрати;
- підвищити її швидкодію.

Аналіз публікацій

Існує багато наукових праць, що описують та підтверджують ефективність застосування нейронних мереж для розпізнавання технічного стану об'єктів контролю, розпізнавання можливих дефектів [1], реєстрації сигналів та їх класифікації [2], вирішення задач кластерного аналізу [3; 4].

Для вибору оптимальної архітектури нейронної мережі, що буде використовуватись у складі класифікатора системи неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів, було проаналізовано результати застосування таких нейронних мереж, як мережа Кохонена [3; 4], багатошаровий перцептрон (БШП) [5; 6] та спеціальна гібридна нейронна мережа [1; 2].

Гібридній нейронній мережі [1; 2] потрібен додатковий час для формування нового класу, і фактично відбувається повне її перенавчання.

Застосування системи на основі БШП [5; 6] не можливе при вирішенні задач безеталонної діагностики композиційних матеріалів, оскільки:

- номенклатура можливих дефектів виробів із композитів невідома;
- для БШП необхідна початкова навчальна вибірка;
- БШП не може динамічно розширювати власну базу знань і адаптуватися до появи об'єктів, які відносяться до невідомих раніше класів.

Достовірність роботи системи на основі нейронної мережі Кохонена [3; 4] у ході вирішення задач безеталонної діагностики виробів із композиційних матеріалів не перевищує показника 0,93.

Виходячи з отриманих результатів, було вирішено, застосовувати як ядро класифікатора нейронну мережу Fuzzy-ART [7; 8], оскільки такий підхід дозволяє усунути описані недоліки.

Вирішення задачі

Алгоритм побудови нейромережевого класифікатора виглядає так:

1) робота з даними:

- скласти базу даних із навчальних прикладів, характерних для задачі;

- розбити всю сукупність даних на дві множини: навчальну і тестову;

2) попередня обробка:

- вибрати систему ознак, характерних для задачі, і перетворити дані відповідним чином для подачі на вхід мережі, отримуючи лінійно відокремлюваний простір множини даних;

- вибрати систему кодування вихідних значень;

3) конструювання, навчання і оцінка якості мережі:

- вибрати топологію мережі: кількість шарів, кількість нейронів в шарах тощо;

- вибрати функцію активації нейронів;

- вибрати алгоритм навчання мережі;

- оцінити якість роботи мережі на основі контрольної множини або іншого критерію;

- оптимізувати архітектуру;

- вибрати оптимальний варіант мережі, який забезпечує найкращу здібність до узагальнення;

- оцінити якість роботи за тестовою множиною;

4) застосування та діагностика:

- з'ясувати ступінь впливу різних чинників на прийняття рішення;

- переконатися, що мережа дає необхідну достовірність класифікації;

- за необхідності повернутися на 2-й етап, змінивши спосіб подання об'єктів або базу даних;

- практично використовувати мережу для вирішення поставленої задачі.

Нейронна мережа Fuzzy-ART здатна вирішувати задачі кластерного аналізу та класифікації образів. Такий тип нейронної мережі дозволяє класифікатору динамічно розширювати власну базу знань про можливі типи дефектів контрольованих об'єктів в процесі роботи. Динамічне налаштування мережі Fuzzy-ART можливе за рахунок її архітектури, що містить два шари нейронів (рис. 1).

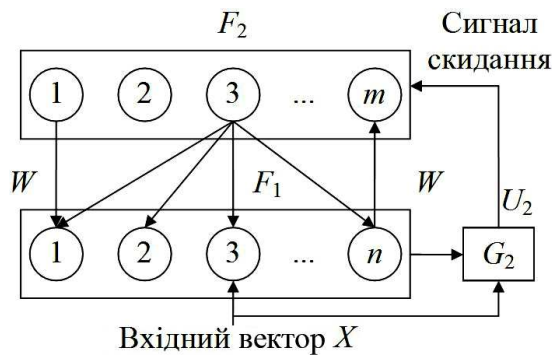


Рис. 1. Архітектура мережі Fuzzy-ART

Характерною особливістю мережі Fuzzy-ART є те, що обидві матриці вагових коефіцієнтів (W та V) об'єднуються в одну матрицю W .

Складові входних векторів X – дійсні числа, нормуються в інтервалі $[0,1]$:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\},$$

причому

$$X \in [0,1].$$

У шарі розпізнавання F_2 містяться нейрони для зберігання інформації про базу класів.

Нейронна мережа Fuzzy-ART працює за алгоритмом (рис. 2) та виконує класифікацію входних даних у кілька етапів.

На початку процесу навчання нейронної мережі кожен клас j встановлюється в неактивний початковий стан.

Між входом і шаром розпізнавання розташована матриця вагових коефіцієнтів W . Усі її елементи (вагові коефіцієнти) спочатку ініціалізуються одиницями, тобто

$$w_{ij} = 1 \text{ для } i = 1, 2, \dots, n \text{ та } j = 1, 2, \dots, m.$$

Індекс i відповідає елементу входного вектору, а індекс j – нейрону (номеру класу) шару розпізнавання.

У мережі Fuzzy-ART встановлюються такі параметри:

- параметр вибору $\alpha > 0$, що визначає вибір класу в момент класифікації;
- коефіцієнт корекції $\eta \in [0,1]$, що суттєво впливає на швидкість нейронної мережі;
- коефіцієнт чутливості класифікатора або рівень подібності входного та еталонного сигналів $\rho \in [0,1]$, що керує процесом формування класів сигналів.



Рис. 2. Алгоритм роботи мережі Fuzzy-ART

Для визначення класу k , до якого належить входний вектор X , визначається спочатку ступінь активації нейронів:

$$y_j = \frac{|X \cap W_j|}{\alpha + |W_j|},$$

де X – входний вектор;

W_j – вектор вагових коефіцієнтів нейрона j , що характеризує еталон у пам'яті нейронної мережі;

α – параметр, що визначає вибір класу в момент класифікації;

\cap – оператор перетину двох нечітких множин (оператор нечіткого "І");

$|\cdot|$ – L_2 -норма вектору в евклідовому просторі.

Вхідний вектор X відноситься до класу y_j , для якого ступінь активації максимальний y_k :

$$y_k = \max_j(y_j).$$

У тих випадках, коли два класи мають однакове максимальне значення ступеня активації, вибирається клас з еталонним сигналом із найменшим індексом. Цим самим забезпечується той факт, що нейрони шару розпізнавання F_2 виділяються для кожного класу вхідних сигналів у послідовності 1, 2, ..., n .

Після першої фази розпізнавання відбувається фаза порівняння. Вона полягає в порівнянні поточного вхідного вектору з прототипом визначеного класу k , який відповідає вектору вагових коефіцієнтів W_k :

$$\frac{|X \cap W_k|}{|X|} \geq \rho,$$

де ρ – коефіцієнт чутливості класифікатора.

У разі виконання цього критерію активується процес адаптації (модифікації) вагових коефіцієнтів. В іншому випадку продовжується пошук альтернативного класу в шарі розпізнавання або виділення нового нейрону для формування нового класу вхідних сигналів.

Корекція вектору вагових коефіцієнтів відбувається за правилом:

$$W_j(t+1) = \eta[X \cap W_j(t)] + (1-\eta)W_j(t),$$

де t – номер поточного етапу навчання;

η – коефіцієнт, що визначає швидкість навчання нейронної мережі.

У класичній мережі Fuzzy-ART є деякі недоліки, що роблять її непридатною для вирішення задачі безеталонної діагностики виробів із композиційних матеріалів. Вирішити поставлену проблему можна заміною певних складових елементів мережі.

Описана класична архітектура [8] мережі чутлива до порядку пред'явлення вхідних векторів під час роботи. Цей недолік проявляється під час виконання другої фази (фази порівняння) у шарі F_1 і пов'язаний із оператором нечіткого «І».

У математичному зображенні цей оператор функціонує так:

$$X \cap Y = \min(X, Y),$$

тобто за певного $x_i \leq y_i$ матиме:

$$x_i \cap y_i = \min(x_i, y_i) = x_i.$$

Таким чином, за умови, що $w_{k,i} \geq x_i$ для всіх $i = \overline{1, n}$ та якщо $X \notin W_k$, операція порівняння матиме результат:

$$\frac{|X \cap W_k|}{|X|} = \frac{|X|}{|X|} = 1,$$

що в свою чергу не активує сигнал скидання і вектор буде класифікований невірно.

Щоб вирішити описаний недолік у роботі модифіковано класичну архітектуру та алгоритм функціонування мережі Fuzzy-ART. Для цього застосовувався додатково оператор нечіткого “АБО” \cup :

$$X \cup Y = \max(X, Y),$$

тобто за певного $x_i \leq y_i$:

$$x_i \cup y_i = \max(x_i, y_i) = y_i.$$

У модифікованій мережі Fuzzy-ART у шарі порівняння на другій фазі визначається коефіцієнт

$$\rho^* = \frac{|(X \cup W_k) - (X \cap W_k)|}{|X|}.$$

Коефіцієнт ρ^* визначає ступінь відмінності вхідного вектору X від еталонного образу W_k в базі даних нейронної мережі.

При $w_{k,i} = x_i$ (для всіх $i = \overline{1, n}$) $\rho^* = 0$ і буде зростати пропорційно збільшенню відмінності між двома сигналами.

Елемент G_2 активує сигнал скидання активності нейрона, якщо не виконається умова:

$$\rho^* \leq 1 - \rho.$$

Такий підхід надає Fuzzy-ART незалежність від порядку пред'явлення вхідних векторів, і таку нейронну мережу можна використовувати для вирішення поставлених задач безеталонної діагностики композиційних матеріалів.

Блок-схему реалізованої модифікованої нейронної мережі Fuzzy-ART, де виділено блоки, що були додані у класичну реалізацію показано на рис. 3.

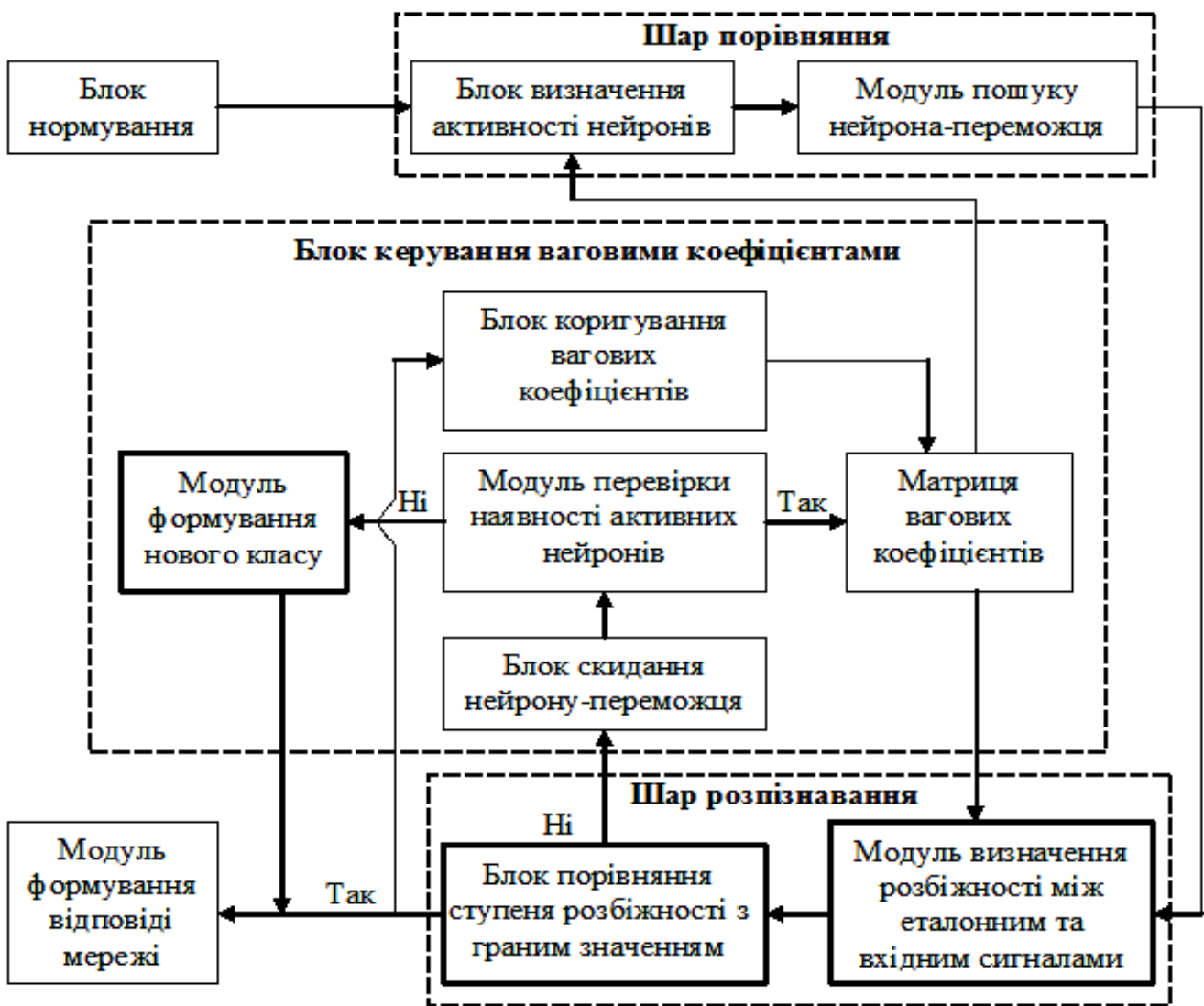


Рис. 3. Структурна схема розробленої модифікованої нейронної мережі Fuzzy-ART

Завдяки використанню нейронної мережі Fuzz-ART у разі появи нового об'єкта в пам'яті системи формується новий клас, який відповідатиме об'єкту, і виконується коригувальна настройка нейромережевого класифікатора.

Отже, існує можливість навчати систему в процесі контролю і відпадає необхідність у формуванні великої кількості еталонних дефектів для первинного налаштування системи.

Така організація роботи системи надає їй універсальний характер і дозволяє використовувати для вирішення широкого кола задач.

Розробка програмного забезпечення блоку класифікації системи безеталонної діагностики композиційних матеріалів із використанням

нейронної мережі Fuzzy-ART проводилася в середовищі графічного програмування LabVIEW 2010.

Використання версії LabVIEW 2010 дозволяє реалізувати паралельне виконання програми, що підвищує швидкість і ефективність роботи системи в цілому.

Інтерфейс користувача (рис. 4) розроблено-го класифікатора у складі системи неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів містить ряд елементів керування:

Вибір параметрів нормування за інформаційними ознаками дозволяє привести вхідні дані до заданого діапазону значень і є необхідним для належної роботи системи контролю.

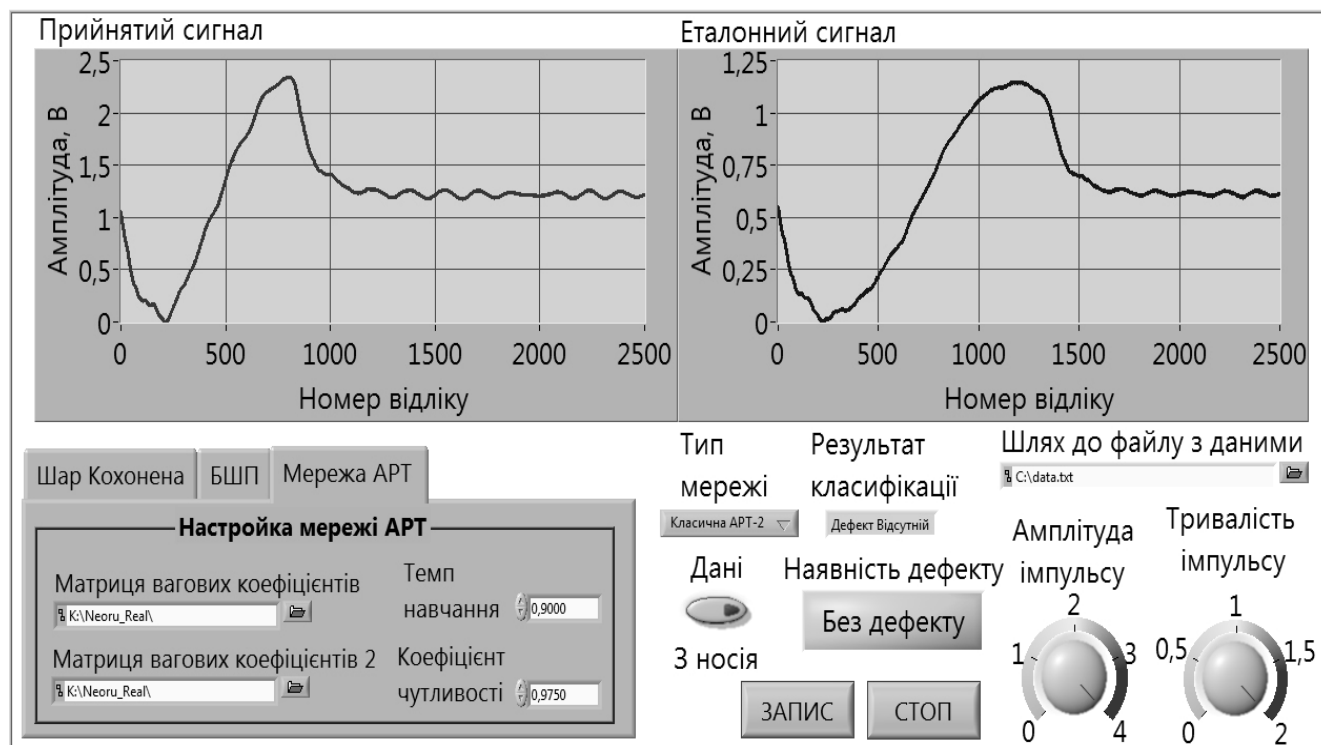


Рис. 4. Інтерфейс користувача класифікатора

Вибір матриці вагових коефіцієнтів нейронів мережі дозволяє вибирати матриці вагових коефіцієнтів, що зберігаються у вигляді файлів на фізичному носії даних (жорсткий диск, flash-пам'ять, CD/DVD носії даних тощо).

Подібний підхід є зручним, оскільки дає можливість використовувати розроблену архітектуру нейронної мережі для вирішення широкого кола задач діагностики та неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів.

Таким чином, сформувавши відповідну матрицю вагових коефіцієнтів для розв'язку конкретної задачі (класифікації, прогнозування, розрахунок необхідних параметрів та характеристик тощо), перенастройка розробленої мережі на новий режим роботи буде полягати тільки в підключенні відповідної матриці вагових коефіцієнтів, а не в повній зміні архітектури мережі та її перепрограмуванні.

Керування швидкістю навчання мережі дозволяє встановлювати швидкість зміни значень вагових коефіцієнтів нейронів мережі під час навчання. Засоби індикації відображають візуалізований інформаційний сигнал з датчика, наявність дефекту та його тип, горизонтальну та вертикальну прокрутку зображення по екрану, вибір типу джерела отримання діагностичної інформації та режиму роботи системи неруйнівного контролю.

Результати дослідження

Для дослідження використовували експериментальні дані, отримані шляхом проведення контролю зразків стільникових панелей методом низькошвидкісного удару [9].

Як зразки використовувались п'ять композитних панелей (рис. 5) зі стільниковим заповнювачем типа ІСП-1 і обшивкою на основі склотканини Т42/1-76.

Товщина панелі становила 12 мм, товщина обшивки – 1,5 мм.

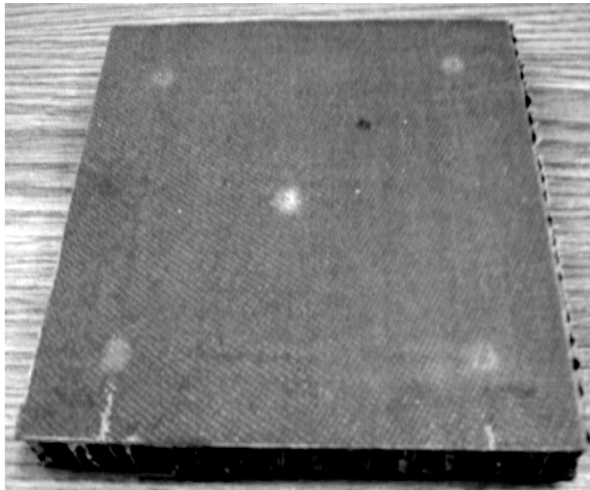


Рис. 5. Зразок композитної панелі

Дослідний зразок мав п'ять характерних ділянок – бездефектну і чотири ділянки з різним ступенем пошкодженості.

Моделями дефектів служили ділянки, на які попередньо за допомогою сталеві кульки було завдано точковий удар із нормованою енергією, який спричиняв руйнацію зразка в області контакту,

$$A_{\text{уд}} = 2,30 \text{ кДж (дефект 1);}$$

$$A_{\text{уд}} = 2,81 \text{ кДж (дефект 2);}$$

$$A_{\text{уд}} = 3,24 \text{ кДж (дефект 3);}$$

$$A_{\text{уд}} = 5,11 \text{ кДж (дефект 4).}$$

Видимі розміри діаметру ділянки руйнування не перевищували 5 мм.

Глибина залягання дефектів відповідає товщині вуглепластика – 3 мм (рис. 6).

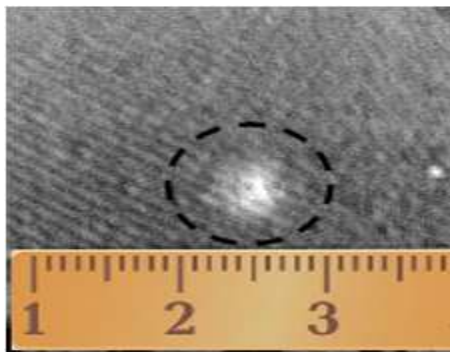


Рис. 6. Модель дефекту

Для кожного з чотирьох отриманих зразків із дефектами та бездефектного зразка було отримано по 100 реалізацій імпульсів ударної взаємодії. Як діагностичні ознаки використовувалися такі параметри:

- амплітуда;
- тривалість імпульсу;
- форма інформаційного сигналу.

Зміна вказаних параметрів дає можливість визначати наявність дефекту стільникової панелі і класифікувати його тип за ступінню пошкодженості.

У процесі контролю на вхід системи у випадковому порядку подавався один з отриманих сигналів. Після цього він видалявся з вибірки і на вхід системи подавався новий сигнал з вибірки. Ця процедура повторювалася, поки всі сигнали з вибірки не були пред'явлені системі.

Перед початком роботи системі не було відомо ніякої попередньої інформації про об'єкти контролю та номенклатуру їх дефектів.

Система в процесі роботи автоматично формувала власну базу класів.

Сформувавши базу класів, для дослідження достовірності формування класів та результатів неруйнівного контролю системі було пред'явлено по 100 нових сигналів, характерних для кожної ділянки досліджуваних зразків.

Після пред'явлення всієї контрольної вибірки сигналів було проаналізовано отримані результати роботи розробленого класифікатора (рис. 7).

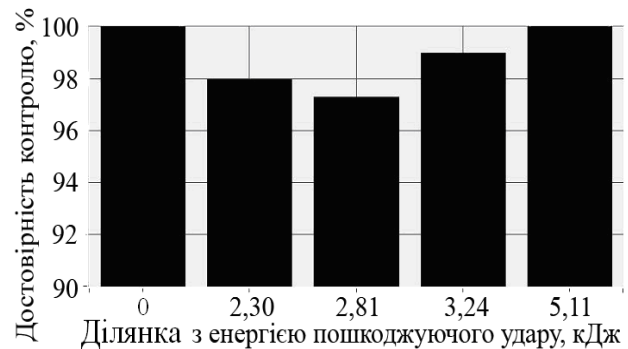


Рис. 7. Достовірність роботи класифікатора

Достовірність контролю стільникових панелей із застосуванням описаного класифікатора на основі нейронної мережі Fuzzy-ART у складі системи неруйнівного контролю становить 97–98 %.

Для реалізованої архітектури АРТ-мережі було визначено оптимальний рівень коефіцієнту чутливості ρ .

За часом аналізу 2,1 с, обсягом пам'яті на диску 115 кБ достовірність контролю становила:

0,97..... $\rho = 0,90$;

0,98..... $\rho = 0,92$;

0,96..... $\rho = 0,93$.

Аналізуючи результати дослідження основних характеристик розробленої нейронної мережі Fuzzy-ART, можна відзначити, що для такої архітектури нейронної мережі необхідно вибирати значення коефіцієнту чутливості мережі ρ в діапазоні $0,90 \leq \rho \leq 0,92$.

Розроблена модифікована архітектура нейронної мережі Fuzzy-ART має такі переваги:

- стабільність запам'ятованої інформації;
- можливість динамічно розширювати власну базу знань;
- високу роздільну здатність при класифікації даних;
- добру завадозахищеність;
- інваріантність відносно порядку пред'явлення вхідних даних;
- можливість змінювати швидкість навчання мережі;
- здатність мережі самостійно при повторному пред'явленні навчальної вибірки виправляти помилки, які були допущені на попередньому етапі роботи;
- можливість працювати з аналоговими сигналами.

Висновки

Розроблено нейромережевий класифікатор, який є основою системи безеталонної діагностики виробів із композиційних матеріалів та забезпечує гнучку і стабільну базу класів можливих дефектів, ефективно оперує з векторами даних великої розмірності, має

здатність адаптувати архітектуру сформованої нейронної мережі до вирішення нових задач і дає можливість отримати високу достовірність контролю.

Розроблено систему безеталонної діагностики та класифікації стану виробів із композиційних матеріалів, яка дозволяє визначати дефектні ділянки об'єкта контролю та проводити їх класифікацію за ступенем пошкодженості.

Застосування нейронної мережі Fuzzy-ART для обробки отриманих експериментальних даних дає можливість автоматизувати цей процес та процес прийняття рішень за результатами неруйнівного контролю.

Використання розробленого класифікатора у складі системи безеталонної діагностики є доцільним і дає можливість отримати високу достовірність контролю – 97–98 %. Проведені експерименти та отримані результати показали перспективність застосування нейронної мережі Fuzzy-ART як ядра інформаційно-діагностичної системи для проведення неруйнівного контролю та класифікації дефектів виробів із композиційних матеріалів. Визначено, що для вирішення поставленої задачі безеталонної діагностики стільникових панелей найкраще підходить модифікована нейронна мережа Fuzzy-ART з коефіцієнтом чутливості $\rho = 0,92$.

Література

1. *Переєденко А.В.* Применение нейронных сетей при неразрушающем контроле композиционных материалов / А.В. Переєденко, Ю.В. Куц, В.С. Еременко // Дни на безразрушительный контрол 2010: материалы XXV Национальной конференции с международного участия «Дефектоскопия'10», 13-17 июня 2010 г. – София, 2010. – С. 469–475.

2. *Система безэталонной диагностики композиционных материалов на основе гибридной нейронной сети* / А.В. Переєденко, В.С. Еременко, С.Ф. Суслов, П.А. Шегедин // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: материалы 9-й междунар. науч.-практ. конф., 3-4 дек. 2010 г. – М., 2010. – С. 207–212.

3. *Переїденко А.В.* Дослідження алгоритмів проведення кластерного аналізу для вирішення задач неруйнівного контролю / А.В. Переїденко, В.С. Єременко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1/5(43). – С. 40–43.
4. *Переїденко А.В.* Система кластерного аналізу результатів неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів / А.В. Переїденко, В.С. Єременко, В.О. Роганьков // Наукоємні технології. – 2010. – № 3.– С. 73–77.
5. *Побудова* вирішальних правил при багатопараметровому неруйнівному контролю / А.В. Переїденко, В.С. Єременко, О.О. Гільова, Є.Ф. Суслов // Современные методы и средства НК и ТД: матеріали 18-ї Міжнар. конф., 5–9 жовт. 2010 р. – Ялта, 2010. – С. 78–81.
6. *Переїденко А.В.* Система класифікації дефектів на основі штучних нейронних мереж / А.В. Переїденко, В.С. Єременко, Ж.О. Павленко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер. Приладобудування. – 2010. – № 40. – С. 72–80.
7. *Carpenter, G.A.; Grossberg, S.* 1987. A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine. – *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. N 37: 54–115.
8. *Carpenter, G.A.; Grossberg, S.; Rosen, D.B.* 1991. Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system. – *Neural Networks*. N 4: 759–771.
9. *Єременко В.С.* Обнаружение ударных повреждений сотовых панелей методом низкоскоростного удара / В.С. Єременко, В.М. Мокийчук, А.М. Овсянкин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 1. – С. 24–27.

Стаття надійшла до редакції 08.07.2011.