

УДК 621.114.32(043.2)

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПІД ЧАС РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ БЕЗЕТАЛОННОЇ ДІАГНОСТИКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**В. С. Єременко**, канд. техн. наук, доц., **А. В. Переїденко**, **П. А. Шегедін**

Національний авіаційний університет

vermat@i.ua

У статті описано методику розв'язання задачі синтезу імпульсних сигналів дефектоскопа при неруйнівному контролі виробів з композиційних матеріалів авіаційного призначення. Розглянуто спосіб зменшення кількості складових спектра сигналу. Досліджено алгоритм визначення функції розподілу значень коефіцієнтів спектрального розкладу. Наведено результати експериментальних досліджень.

Ключові слова: синтез сигналів, неруйнівний контроль, композиційні матеріали.

This paper describes the method of solving the problem of pulse signals' synthesis during NDT of products from composite materials. The way of reducing the number of the signal' components is reviewed. Also the algorithm of determining the distribution function coefficients of the spectral decomposition is described in the article. The results of the experiments are published.

Keywords: signals' synthesis, non-destructive testing, composite materials.

Постановка проблеми

Вироби з композиційних матеріалів, які широко використовуються в авіаційній та ракетно-космічній техніці, на відміну від виробів з металів, формуються з первинної сировини одночасно з формуванням самих матеріалів. Через складність технології їх виготовлення стає неможливим побудова апріорних моделей, що описують вимірювання інформативних параметрів контрольованих об'єктів, а незнання законів розподілу ймовірностей значень інформативних параметрів не дозволяє сформувати вирішальне правило діагностики.

Достовірність діагностики в такому разі визначається не тільки вживаними фізичними методами отримання інформації про технічний стан виробу, але й математичними моделями, покладеними в основу методів діагностики, методиками обробки одержуваної інформації з метою формування просторів параметрів і прийняття діагностичних рішень. Імітаційне моделювання, не потребуючи значних коштів, відкриває можливість отримання суттєвої інформації. Використання такої інформації дає можливість скоригувати імітаційну модель інформаційного сигналу та адаптувати її з урахуванням нової отриманої інформації, дозволяє дослідити методи обробки інформаційних сигналів та методи виділення діагностичних ознак, а також дослідити алгоритми роботи інформаційно-вимірювальної системи.

У задачах безеталонної діагностики композиційних матеріалів, а також у випадку використання нейронних мереж як ядра класифікатора, наявність адекватної моделі інформаційних сигналів дефектоскопа, які характерні для об'єктів з різними типами дефектів або ступенями пошкодженості, має велике значення, оскільки дає змо-

гу розв'язати одночасно декілька задач. По-перше, існування такої моделі дозволяє побудувати базу інформаційних сигналів, які характеризують можливі дефекти композитів, а отже, можуть бути використані для навчання та налагодження нейронної мережі та інформаційно-діагностичної системи в цілому без фізичного виготовлення подібних зразків. По-друге, розроблена модель інформаційного сигналу може використовуватись для формування та прийняття вирішального правила діагностики, а також класифікації вхідних даних нейронною мережею, для вибору найбільш вдалої архітектури та типу мережі, оцінки ефективності навчання та роботи мережі, вибору граничного значення чутливості інформаційно-діагностичної системи, її валідації, перевірки вірогідності контролю і, у випадку необхідності, коригування параметрів системи тощо.

Основні цілі

Задача синтезу інформаційного сигналу із заданими параметрами найбільш адекватно розв'язується за допомогою його спектрального представлення. І, якщо в разі неперервного гармонічного сигналу в багатьох випадках перевагу має тригонометричне перетворення Фур'є, то для імпульсних сигналів постає завдання вибору відповідного спектрального базису (результати дослідження описано в праці [1]), який забезпечує мінімальну кількість інформативних спектральних складових, що будуть суттєво змінюватись залежно від зміни ступеня пошкодження об'єкта контролю. В праці [1] розглядається побудова власного базису для спектрального представлення інформаційних сигналів дефектоскопа, що реалізує метод низькошвидкісного удару, при контролі стільникових панелей з ударними пошкодженнями [2].

Кожен з досліджуваних зразків характеризувався п'ятьма ділянками: бездефектною та чотирма ділянками з пошкодженнями, які були нанесені з різною енергією удару (2,30 кДж; 2,81 кДж; 3,24 кДж та 5,11 кДж).

Для вибору методу побудови імітаційної моделі інформаційного сигналу дефектоскопа в праці [3] було проведено статистичне оцінювання отриманих значень коефіцієнтів спектрального розкладу.

Розмірність простору ознак, а отже, й кількості коефіцієнтів розкладу було зведено до значення $P = 5$.

Серед статистичних оцінок розглядалися такі оцінки, як математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення. Гіпотеза щодо гауссівського закону розподілу значень коефіцієнтів спектрального розкладу перевірялася з використанням χ^2 — критерію Пірсона. Результати обчислення описаних оцінок та χ^2 -статистики для одновимірних розподілів з 7 ступенями вільності наведено в табл. 1.

Для одновимірних розподілів з 7 ступенями вільності при рівні значущості $\alpha = 0,99$ значення $\chi_{\text{ад}}^2 = 3,49$.

Таблиця 1

Статистичні оцінки коефіцієнтів спектрального розкладу

Номер коефіцієнта	Показник	Енергія пошкоджуючого удару, кДж				
		без дефекту	2,30	2,81	3,24	5,11
1	Математичне сподівання	35,44	10,32	9,69	3,06	-0,14
	Середньоквадратичне відхилення	4,18	1,58	2,00	0,55	0,08
	Статистика χ^2	3,07	3,08	3,19	3,35	3,16
2	Математичне сподівання	-0,04	14,95	12,86	9,18	2,55
	Середньоквадратичне відхилення	1,37	2,57	3,45	1,67	0,35
	Статистика χ^2	3,29	3,12	2,99	3,13	2,94
3	Математичне сподівання	0,012	0,01	2,31	-2,58	-1,66
	Середньоквадратичне відхилення	0,88	0,31	0,38	0,45	0,23
	Статистика χ^2	3,39	3,27	3,11	3,45	3,11
4	Математичне сподівання	0,03	0,01	0,01	5,50	3,82
	Середньоквадратичне відхилення	0,14	0,16	0,06	0,96	0,51
	Статистика χ^2	3,21	3,05	2,95	3,12	3,34
5	Математичне сподівання	-0,006	-0,005	-0,004	-0,003	4,02
	Середньоквадратичне відхилення	0,07	0,03	0,03	0,07	0,52
	Статистика χ^2	3,37	3,01	3,35	3,40	3,18

За отриманими даними зроблено висновок, що гіпотеза про нормальний закон розподілу значень коефіцієнтів спектрального розкладу не суперечить наявним даним. Оскільки встановлено, що функція розподілу значень спектральних коефіцієнтів має гауссів закон розподілу, вони повністю характеризуються власними математичними сподіваннями та кореляційною функцією. Отже, очевидно, що діагностичні параметри для побудови інформаційної моделі сигналів дефектоскопа слід вибирати на основі аналізу цих характеристик.

Розв'язання поставленої задачі

Інформаційні сигнали дефектоскопів характеризуються детермінованою та випадковою складовою.

Випадкова складова інформаційного сигналу описує такі невраховані чинники, як неоднорідність зміни фізичних характеристик у дефектних ділянках, зміна ступеня пошкоженості контрольованого зразка, наявність шумів у вимірювальних каналах, випадкових похибок датчиків, просторової неоднорідності композитів тощо.

Отже, для побудови адекватної імітаційної моделі таких сигналів необхідно враховувати обидві складові.

Фізичні моделі, що описують перетворення інформаційних сигналів залежно від дефектності виробу, мають ряд істотних недоліків, які не дають змогу їх застосовувати при розрахунках і формуванні простору діагностичних ознак. До цих недоліків можна віднести залежність податливості дефектної області та її механічного імпедансу від фізичних характеристик крайових зон дефектів та їх форми, неможливість урахування впливу всієї номенклатури дефектів композиційних матеріалів на їх механічні характеристики, значні труднощі при розрахунку частотозалежних механічних імпедансів зон з реальними дефектами. Тому доцільним є побудова стохастичних моделей інформаційних сигналів, які дозволяють врахувати їх випадкові зміни в часі, застосувати методи статистичної обробки, таким чином підвищуючи достовірність діагностики та розширюючи простір діагностичних ознак.

Отже, імітаційну модель інформаційного сигналу дефектоскопа можна подати таким виразом:

$$S_i = \sum_{j=0}^{n-1} [a_{i,j} + \eta_j] g_j, \quad i = \overline{0, L-1},$$

де $a_{i,j}$ — детермінована складова сигналу, яка розраховується за алгоритмом, описаним раніше через функцію розподілу значень коефіцієнтів спектрального розкладу залежно від ступеня пошкоженості об'єкта контролю; η_j — випадкова складова, обчислювана на основі власних чисел та власних векторів коваріаційної матриці інформаційного сигналу; g_j — ортогональний базис; L — обсяг генерованої вибірки інформаційних сигналів; n — кількість складових у спектрі сигналу.

На основі проведених досліджень інформаційних сигналів дефектоскопа [1; 3] перший комплекс діагностичних ознак моделі формується з п'яти складових ($n_1 = 5$) спектра сигналу. Моделювання певного ступеня пошкодження зразка відбувається за алгоритмом [4] зміни значень необхідних складових спектра сигналу до значень, що характерні для ділянки з відповідним ступенем пошкодження.

Другий комплекс діагностичних ознак, що характеризує випадкову складову моделі, визначається на основі перетворення Карунена–Лоева. Перетворення Карунена–Лоева має фундаментальне значення, тому що воно призводить до побудови некорельованих ознак. Таким чином, матиме місце вираз:

$$\eta_j = \sum_{k=0}^{n-1} \xi_k \varphi_k(j), \quad j = \overline{0, n-1},$$

де $\xi_k = \sum_{j=0}^{n-1} \eta_j \varphi_k(j)$ — коефіцієнти розкладу, які є незалежними гауссівськими випадковими величинами з дисперсіями $D_{\xi_k} = \sigma_k^2$, $k = \overline{0, n-1}$; $\{\varphi_k(j), k, j = \overline{0, n-1}\}$ — ортонормований базис, елементи $\varphi_k(j)$ якого є власними векторами коваріаційної матриці R реального сигналу. Причому дисперсії $D_{\xi_k} = \sigma_k^2$, $k = \overline{0, n-1}$, дорівнюють власним числам λ_k , $k = \overline{0, n-1}$ коваріаційної матриці R , що відповідають власним векторам $\varphi_k(j)$, $k = \overline{0, n-1}$. Елементи матриці R знаходяться за виразом:

$$r_{i,j} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} (v_{k,i} - m_i)(v_{k,j} - m_j)}{n-1},$$

де v_{ij} — елементи матриці V коефіцієнтів спектрального розкладу інформаційних сигналів X ; m_i — елементи матриці M математичних сподівань кожного коефіцієнта спектрального розкладу сигналу дефектоскопа. Матриці V та M формуються таким чином:

$$V = \begin{pmatrix} v_{0,0} & v_{0,1} & \cdots & v_{0,n-1} \\ v_{1,0} & v_{1,1} & \cdots & v_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N-1,0} & v_{N-1,1} & \cdots & v_{N-1,n-1} \end{pmatrix},$$

$$M = \{m_0, m_1, \dots, m_{n-1}\},$$

де N — кількість реалізацій інформаційних сигналів; n — кількість коефіцієнтів спектрального розкладу однієї реалізації; $m_i = \sum_{k=0}^{N-1} v_{k,i} / N$.

Повна енергія вектора $\eta = \{\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_{n-1}\}$ визначається як

$$\sum_{i=0}^{n-1} R_{ii} = \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k.$$

Множина власних чисел λ_k і власних векторів $\varphi_k(j)$ однозначно характеризує коваріаційну матрицю R (а отже, і вектор η), тому доцільним буде вибрати як другий комплекс ознак $n_2 = n_1 = 5$ власних чисел та відповідних до них власних векторів коваріаційної матриці вектора η . Таким чином, для здійснення імітаційного моделювання сигналів дефектоскопа при контролі виробів із композиційних матеріалів було вибрано:

— п'ять коефіцієнтів ортогонального розкладу інформаційного сигналу у сформованому базисі g_j ;

— п'ять власних чисел та відповідних їм власних векторів коваріаційної матриці R вектора η , які характеризують випадкову складову змодельованого сигналу.

Моделювання інформаційного сигналу виконується за алгоритмом, зображеним на рис. 1.

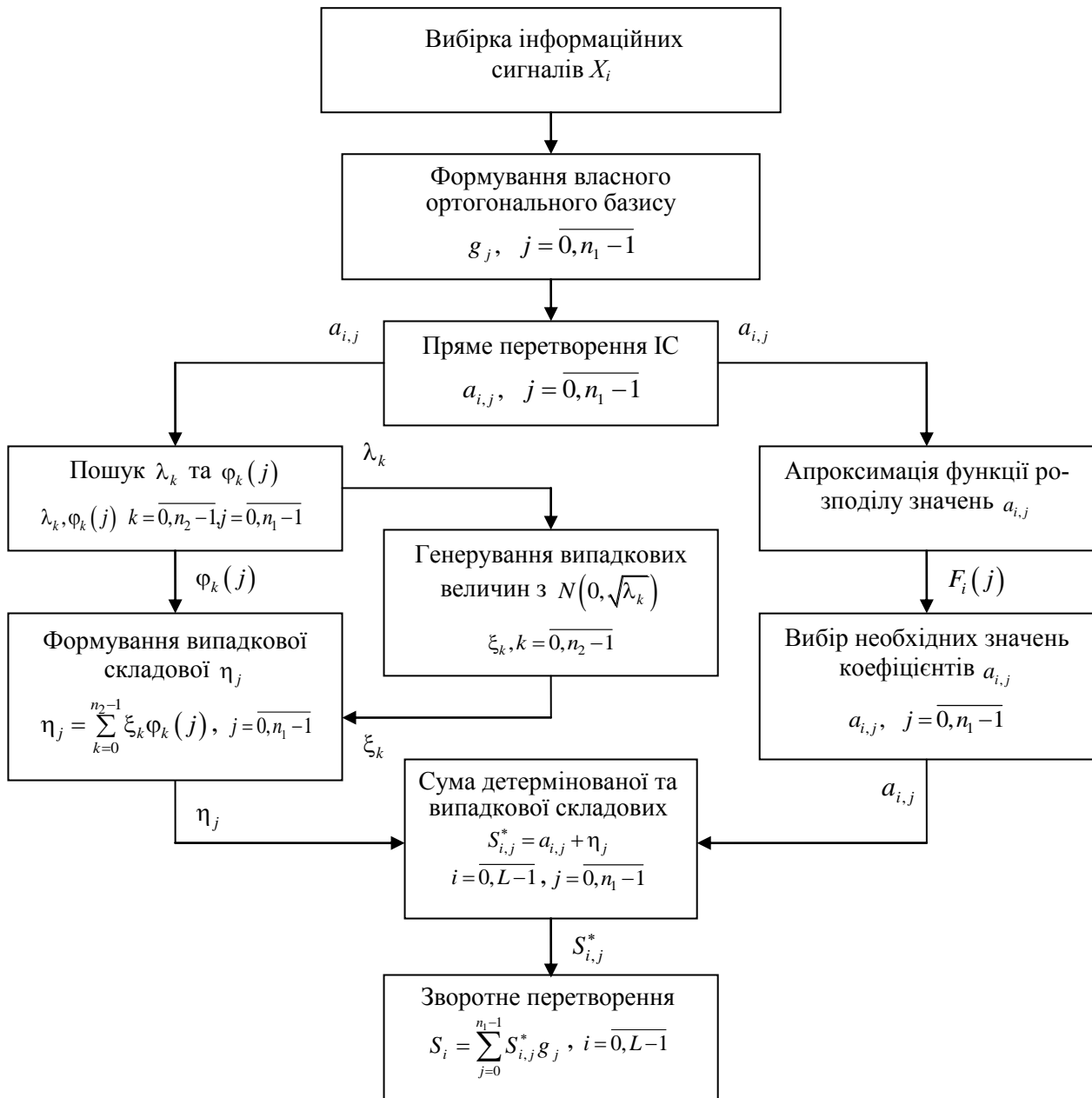


Рис. 1. Алгоритм проведення імітаційного моделювання сигналів дефектоскопа при контролі виробів з композиційних матеріалів

Оскільки кожна складова (коефіцієнт) спектрального розкладу характеризується різним значенням розсіяння залежно від ступеня пошкодження зразка та порядкового номера, то в процесі імітаційного моделювання відповідно для кожного коефіцієнта матимуть місце різні за значенням власні числа λ_k та власні вектори $\varphi_k(j)$. Таким чином, кожна зі спектральних складових буде в різній степені зазнавати вплив випадкових факторів, що й відбувається при аналізі реальних сигналів дефектоскопа отриманих при неруйнівному контролі виробів з композиційних матеріалів. Отже, можна відзначити, що описаний підхід дозволяє в найбільш повному обсязі описати ре-

альний інформаційний сигнал та побудувати його адекватну модель.

Вибір коефіцієнтів ортогонального розкладу a_{k_1} , $k_1 = \overline{0, n_1 - 1}$, власних чисел λ_{k_2} та власних векторів $\varphi_{k_2}(j)$, $k_2 = \overline{0, n_2 - 1}$, $j = \overline{0, n - 1}$ здійснювався з використанням реалізацій оцінок цих характеристик, отриманих при аналізі реальних сигналів з дефектоскопа під час контролю композиційних матеріалів

На основі описаних теоретичних відомостей було проведено генерування за 250 реалізаціями інформаційних сигналів для кожної з ділянок досліджуваного зразка [2].

На рис. 2 подано реальні та змодельовані сигнали, що характерні для бездефектної ділянки та ділянок з різним ступенем пошкодження, крива S_1 — реальний сигнал, який було отримано при діагностиці стільникових панелей методом низь-

кошвидкісного удару, а крива S_2 — змодельований сигнал. Аналізуючи отримані сигнали, було визначено середньоквадратичне значення розбіжності змодельованих сигналів від реальних. Відповідні значення наведено в табл. 2.

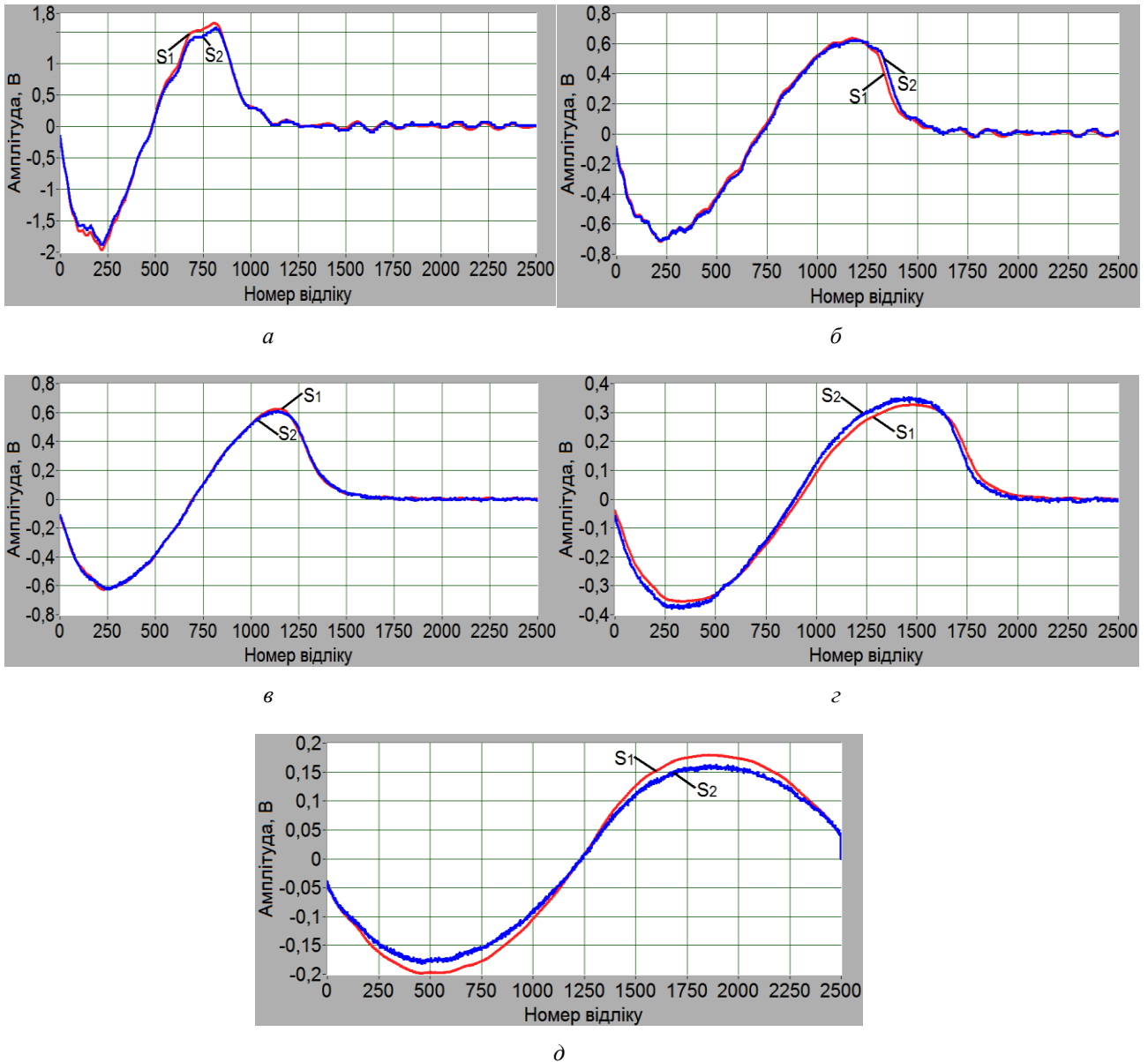


Рис. 2. Сигнал з ділянки без пошкодження (а) та ділянок із пошкодженням 2,30 кДж (б), 2,81 кДж (в), 3,24 кДж (г), 5,11 кДж (д)

Таблиця 2

Значення середньоквадратичної похибки для кожного типу ділянки досліджуваного зразка

Тип ділянки	Середньоквадратична похибка
Без дефекту	$3,59 \cdot 10^{-3}$
З енергією пошкодження 2,30 кДж	$2,42 \cdot 10^{-3}$
З енергією пошкодження 2,81 кДж	$2,00 \cdot 10^{-3}$
З енергією пошкодження 3,24 кДж	$2,57 \cdot 10^{-3}$
З енергією пошкодження 5,11 кДж	$1,78 \cdot 10^{-3}$

Висновки

На основі отриманих експериментальних сигналів при неруйнівному контролі виробів з композиційних матеріалів було побудовано імітаційну модель сигналів, яка враховує детерміновану та випадкову складові реальних сигналів. Розроблено алгоритм проведення імітаційного моделювання інформаційних сигналів.

Досліджено метод імітаційного моделювання сигналів, отриманих при контролі стільникових панелей методом низькошвидкісного удару з використанням їх ортогональних розкладів. На його основі проведено серію комп'ютерних імітаційних експериментів з моделювання зазначених сигналів.

Перевірено якість імітаційної моделі та встановлено відповідність характеристик створеної моделі властивостям реальних сигналів, що свідчать про адекватність отриманих результатів.

Розроблена методика забезпечує потреби тестування та навчання діагностичних систем розпізнавання технічного стану виробів з композиційних матеріалів про можливу номенклатуру можливих дефектів того чи іншого матеріалу та характер їх розвитку, дозволяє аналізувати перетворення інформаційних сигналів у реальних технічних системах.

Практична значущість такої імітаційної моделі полягає в тому, що виключає потребу проведення експериментів на реальних зразках, а це призводить до зменшення великих часових, технічних та економічних витрат.

Отримані моделі, що за параметрами та характеристиками відповідають реальним інформаційним сигналам, можуть бути використані в подальшому при формуванні навчальної вибірки для налаштування класифікатора під час розв'язання задач неруйнівного контролю.

Також отримані моделі сигналів можна використовувати з метою формування контрольної вибірки для перевірки достовірності роботи класифікатора та його валідації.

Особливо це стосується систем, які призначені для безеталонної діагностики об'єктів та систем, що як ядро класифікатора використовують штучні нейронні мережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Переїденко А. В.* Методика моделювання інформаційних сигналів низькочастотних акустичних дефектоскопів / А. В. Переїденко, В. С. Єременко // «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2011»: матеріали 16-ї міжнародної науково-технічної конференції, 21–26 лютого 2011 р.: тези доп. — Славське Львівської обл., 2011. — С. 32–36.

2. *Єременко В. С.* Обнаружение ударных поврежденных сотовых панелей методом низкоскоростного удара / В. С. Єременко, В. М. Мокийчук, А. М. Овсянкин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2007. — № 1. — С. 24–27.

3. *Переїденко А. В.* Методика проведення імітаційного моделювання сигналів дефектоскопа при контролі виробів з композиційних матеріалів / А. В. Переїденко, В. С. Єременко, Ж. О. Павленко // «Приладобудування 2011: стан і перспективи»: 10-а міжнародна науково-технічна конференція, 19–20 квітня 2011р.: тези доп. — К., 2011. — С. 198–199.

4. *Переїденко А. В.* Моделювання інформаційних сигналів при неруйнівному контролі стільникових панелей / А. В. Переїденко, П. А. Шегедін // «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011)»: 5-та міжнародна науково-технічна конференція, 19–21 травня 2011 р.: тези доп. — Вінниця, 2011. — С. 83–84.

Стаття надійшла до редакції 30.06.2011.