

В. В. Марасанов¹, О. В. Шарко², А. О. Шарко¹
Херсонський національний технічний університет,
¹ кафедра технічної кібернетики,
Херсонська державна морська академія,
² кафедра експлуатації судових енергетичних
установок та загальної інженерної підготовки

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ТА ЇХ ПАРАМЕТРІВ

© Марасанов В. В., Шарко О. В., Шарко А. О., 2016

Обґрунтовано методологічні принципи обробки сигналів акустичної емісії при неруйнівному контролі металопродукції і спостереженні за динамікою дефектів, що розвиваються. В основу статистичної обробки інформаційних параметрів сигналів АЕ покладено знаходження таких інформаційних ознак: середні значення амплітуди одиничних сигналів, середні значення інтервалів між одиничними актами, дисперсії амплітуд, дисперсії інтервалів, коефіцієнт кореляції між значеннями амплітуд і інтервалів, час спостереження поточної реалізації. Показано визначальну роль вейвлет-перетворень при виділенні корисного сигналу на фоні перешкод.

Ключові слова: акустична емісія, сигнали, статистика, інформаційні параметри, вейвлет-перетворення, корисні сигнали, перешкоди.

The methodological principles of the processing of acoustic emission signals for nondestructive testing of metal and observing the dynamics of developing defects. Statistical analysis of information AE signal parameters is based on search of the following information attributes: the average value of the amplitude of individual signals, the average interval between single acts amplitude variance, the variance of intervals, the correlation coefficient between the values of the amplitudes and intervals, the observation of the current implementation. The determining role of wavelet transforms in the allocation of the desired signal to noise background has been demonstrated.

Key words: acoustic emission signals, statistics, information parameters, wavelet transform, useful signals, obstacles.

Вступ. Загальна постановка проблеми

Метод акустичної емісії (АЕ), оснований на реєстрації хвиль напружень, що виникають в результаті формування, зміни та руйнування структур різних матеріалів, є сьогодні найбільш перспективним і ефективним засобом моніторингу відповідальних об'єктів, що дає змогу отримувати інформацію про динаміку процесів, які відбуваються в реальному масштабі часу. За допомогою методу акустичної емісії можна вимірювати рівень напружень і деформацій матеріалу, виявляти дефекти, що розвиваються, визначати їхні координати, оцінювати ступінь небезпеки під час оцінювання технічного стану конструкцій і споруд [1–4]. Однією з актуальних проблем методу АЕ є складність розшифровки результатів контролю, яка зумовлена накладанням на сигнал АЕ шумів досліджуваного об'єкта, навколишнього середовища, відображених акустичних хвиль.

Аналіз останніх досягнень ті публікацій

Аналіз досвіду впровадження методу акустичної емісії для неруйнівного контролю металопродукції показує, що створюючи нові зразки вимірювальної техніки, прагнуть покращувати характеристики приладів та шукати нові інформативні параметри, розробляти математичні моделі і нові методичні прийоми вивчення явища. Виявлення імпульсів АЕ на фоні

шумів ускладнюється тим, що вони мають близькі спектральні характеристики. Переважно на формування внутрішньої структури сигналу АЕ впливають перетворювальна функція середовища і перехідна функція попередніх ланцюгів прийому і обробки сигналу, що ускладнюють виділення особливостей структури АЕ сигналу у разі руйнування матеріалу. Вивчаючи характеристики дефектів, що розвиваються, для прогнозування руйнування необхідно мати якнайбільше відомостей про джерело акустичної емісії, тобто звести до мінімуму пропуски корисної інформації за наявності флуктуаційних шумів [5–9].

Формулювання мети

Розроблення методологічних принципів обробки сигналів акустичної емісії на основі статистичної теорії виявлення та розпізнавання образів щодо підвищення якості неруйнівного контролю металопродукції.

Викладення основного матеріалу

Під статистичною обробкою сигналу АЕ розуміють формалізований опис реакції матеріалу, викликаній дефектом, що розвивається, який адекватно відображає зміну його внутрішньої структури і забезпечує можливість оцінювання технічного стану об'єкта.

Функціональне призначення методу АЕ має такі особливості:

- джерелом сигналу є сам матеріал, а не зовнішнє джерело;
- за методом акустичної емісії виявляють дефекти, що розвиваються;
- метод є дистанційним і вимагає правильного розміщення датчиків на поверхні об'єкта;
- за методом можна класифікувати дефекти за ступенем їхньої небезпеки;
- за методом можна сигналізувати про розвиток небажаних процесів;
- координати дефектів визначають без сканування поверхні.

Статистична обробка сигналів АЕ в системі неруйнівного контролю передбачає наявність апріорних даних про дефект, який розпізнається, і полягає в оцінюванні фази розвитку дефекту шляхом порівнянням спостережуваних реалізацій процесу з еталонними кривими.

Стандартний набір параметрів, які вимірюються АЕ системи, зображено на рис. 1.

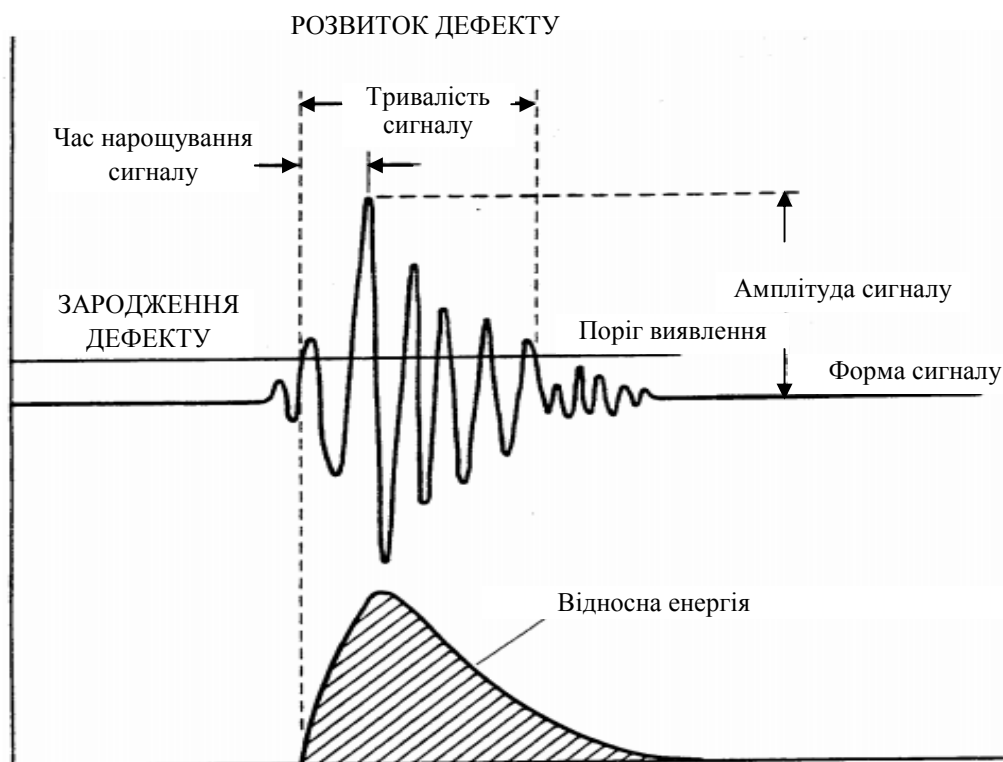


Рис. 1. Відображення інформаційних параметрів сигналів

Послідовність відліків часу, отриману від моменту початку випробувань до повного руйнування конструкції, вважають повною реалізацією процесу. Реалізацію в цьому інтервалі часу – поточної реалізацією, а відрізок повної реалізації, який не має прив'язки до фази руйнування – реалізацією, що спостерігається. Обсяг вибірки фіксується постійним числом осциляцій актив акустичної емісії N .

Максимум амплітуди сигналу формується в результаті інтерференції кількох хвильових компонент. Загасання визначають за зниженням амплітуди сигналу в результаті геометричної розбіжності хвилі і наявності дисипації енергії хвилі в матеріалі.

Завдання локалізації джерел АЕ є одним з центральних в проблемі контролю і вирішується шляхом вимірювання різниці часу приходу сигналів АЕ до рознесеної групи датчиків з урахуванням швидкості поширення хвилі, яка входить до відповідних розрахункових формул [9–11].

Згідно з [15] інтервал спостереження поділяють на k інтервалів оцінки параметрів. Як інформативні параметри сигналів використовують:

- інтенсивність АЕ;
- середню амплітуду імпульсів;
- амплітудний склад сигналу АЕ від рівня дискримінації;
- час наростання переднього фронту імпульсу.

При цьому інтенсивність АЕ визначають за формулою

$$F = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{N_{k+1}}{N_k},$$

$$\frac{N_{k+1}}{N_k} = \begin{cases} 1 & \text{при } N_k = 0 \text{ и } N_{k+1} > 0 \\ 0 & \text{при } N_k > 0 \text{ и } N_{k+1} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, k \end{cases}$$

де N_k – кількість подій в k -му часовому інтервалі оцінювання параметрів АЕ; N_{k+1} – кількість подій в $k+1$ -му часовому інтервалі оцінювання параметрів АЕ; k – номер інтервалу.

Середню амплітуду імпульсів розраховують за формулою

$$A_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i|}{N}.$$

Амплітудний склад сигналу АЕ від рівня дискримінації розраховують за формулою

$$A_t = B_1 U_{пор} + B_2 A_c,$$

де $U_{пор}$ – значення порогу амплітудної дискримінації; A_c – величина перевищення порогу АЕ сигналу; B_1 и B_2 – коефіцієнти, які визначають експериментально.

Класифікують джерела АЕ сигналів так:

- $A_{cp} < A_t$;
- $A_{cp} > A_t$;

– джерело, для якого не розраховують середньої амплітуди імпульсів, тобто за інтервал спостереження отримано менш ніж три імпульси.

Критерієм виявлення дефекту, який зароджується, є виникнення сигналів АЕ з великими амплітудами. Розвиток дефекту відображається у вигляді амплітудного розподілу сигналів АЕ. Встановлюючи певні рівні дискримінації, можна виділити сигнали, пов'язані з розвитком дефекту.

Вимірюванням параметрів акустичних сигналів можна виявити не лише початок дефекту, що розвивається, але і сумарне його збільшення.

Виникнення, формування і виявлення дефекту, що розвивається, породжують стохастичні процеси, які недоступні безпосередньому спостереженню – фіксуються тільки їхні зовнішні прояви. При цьому немінуча початкова невизначеність фази процесу руйнування. Природа такої невизначеності пояснюється спотвореннями сигналу АЕ у разі поширення від місця генерації до точки прийому і залежить від місць розташування перетворювачів, конфігурації виробу і параметрів матеріалу.

Типовий сигнал від дефекту, що розвивається, являє собою складнішу форму [6] (рис. 2).

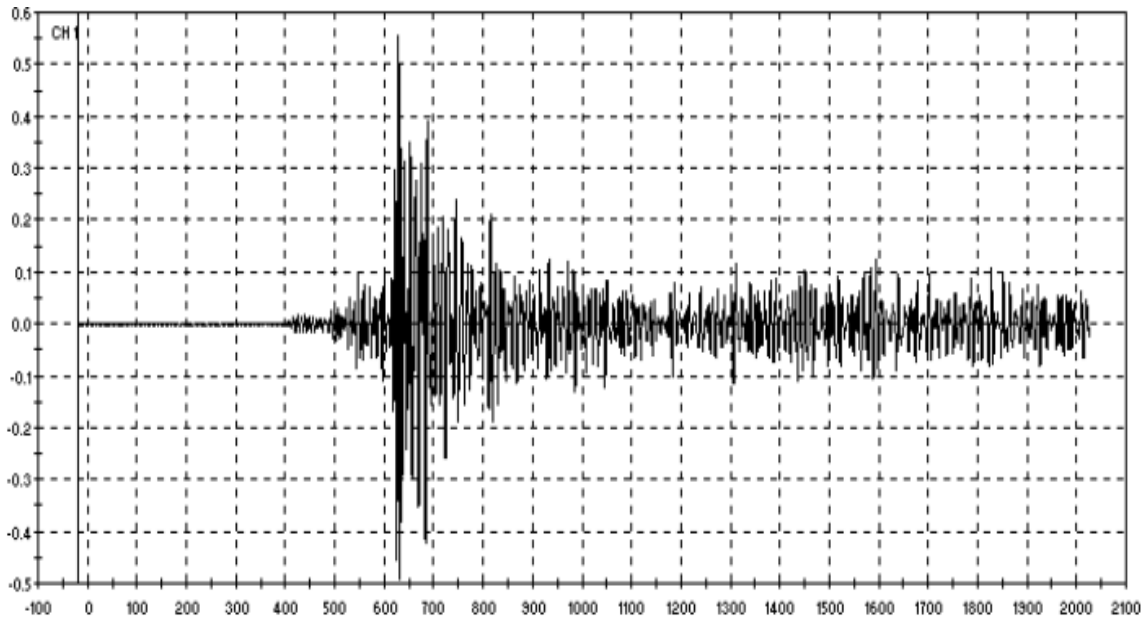


Рис. 2. Типовий вигляд сигналу АЕ

Проблему оптимізації та виділення корисного сигналу на фоні перешкод можна вирішувати з використанням теорії розпізнавання образів [16, 17]. При цьому під оптимальними розуміють такі методи виділення корисного сигналу, які задовольняють заздалегідь обраний статистичний критерій, наприклад, забезпечують мінімальну середньоквадратичну помилку виділення сигналу. Розпізнавання образів передбачає графічне представлення або аналіз відеозображень, вимірювання, перетворення і зіставлення деталей акустичних спектрів з еталонними кривими. Першим етапом статистичного розпізнавання образів є формування простору ознак. Віднесення елемента характеристики АЕ сигналу до еталонної кривої є вирішальним правилом. Для побудови вирішальних правил необхідно проводити попередні експерименти на зразках. Під час статистичної обробки сигналів акустичної емісії їхні параметри подають у вигляді сукупності спостережень і записують так:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} \cdot x_{12} \cdots x_{1n} \\ x_{21} \cdot x_{22} \cdots x_{2n} \\ \dots \dots \dots \dots \\ x_{p1} \cdot x_{p2} \cdots x_{pn} \end{bmatrix},$$

де x_{pn} – інформаційні ознаки акустичного сигналу.

Кожний стовпчик матриці є вектором параметрів сигналів АЕ, які спостерігаються. В теорії статистичних рішень усі види вирішальних правил основані на формуванні критерію L та його порівнянні з певним порогом c

$$L = \frac{f_n(x_1, \dots, x_n | a_2)}{f_n(x_1, \dots, x_n | a_1)} \geq c,$$

де $f_n(x_1, \dots, x_n | a_j)$ – густина ймовірності значень x_1, \dots, x_n за умови їх належності класу a_j .

Значення ознаки об'єкта x , які вимірюються, є реалізаціями випадкової величини з густиною розподілу $f(x, m, \sigma)$, що дорівнює

$$f(x, m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\left(\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)},$$

де m – математичне очікування; σ – дисперсія.

Методи боротьби з шумами та перешкодами передбачають:

- амплітудну дискримінацію порівнянням сигналів, що надійшли, з деяким наперед заданим значенням;
- частотну фільтрацію, яка полягає в обмеженні частоти пропускання підсилювального тракту;
- часову селекцію, яка полягає в запиранні каналів реєстрації сигналів АЕ на час дії перешкод;
- параметричну селекцію, яка полягає у відбракуванні сигналів з певним значенням параметрів.

Кореляцію інформативних параметрів з розвитком дефекту встановлюють при випробуваннях на еталонних зразках, в процесі яких реєструють прикладене навантаження P або деформацію від часу. Приклад таких еталонних вимірювань залежності інтенсивності сигналу АЕ та її амплітуди A від часу t із зростанням прикладеного навантаження для зразка з алюмінієвого сплаву Д16 перетином $(30 \times 4) \text{ мм}^2$ з надрізом глибиною 10 мм наведено на рис. 3.

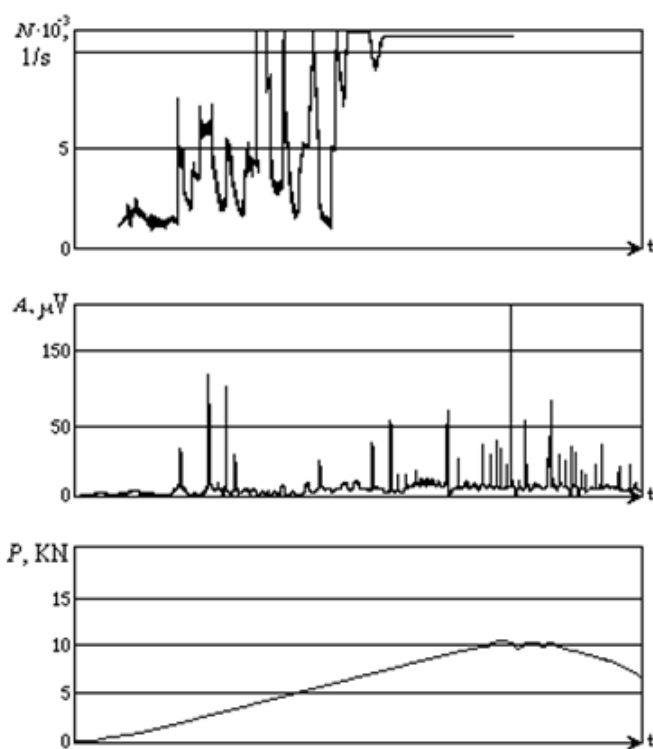


Рис. 3. Часова залежність інтенсивності та амплітуди сигналу АЕ від прикладеного навантаження в еталонному зразку

Перший стрибок тріщини, пов'язаний з релаксацією навантаження, виявляють за появи сигналу, амплітуда якого значно перевищує початкові значення [5]. Їх значення встановлюють експериментально для кожного конкретного матеріалу. Просування тріщини відображають у вигляді амплітудного розподілу сигналів АЕ. Встановлюючи певні рівні дискримінації, можна виділити сигнали, пов'язані з просуванням тріщини.

Розпізнавання корисного сигналу на фоні перешкод та шумів у загальному випадку можна подати схемою (рис. 4).

На вхід схеми надходить сукупність параметрів дефекту, що розвивається, яка сприймається приймачем АЕ сигналу. Після перетворення акустичного сигналу на електричний і порівняння з сигналами, отриманими з еталонними кривими, результат порівняння надходить у блок вибору масштабу і амплітудної дискримінації і далі в блок статистичної обробки, де здійснюється класифікація фази розвитку дефекту.

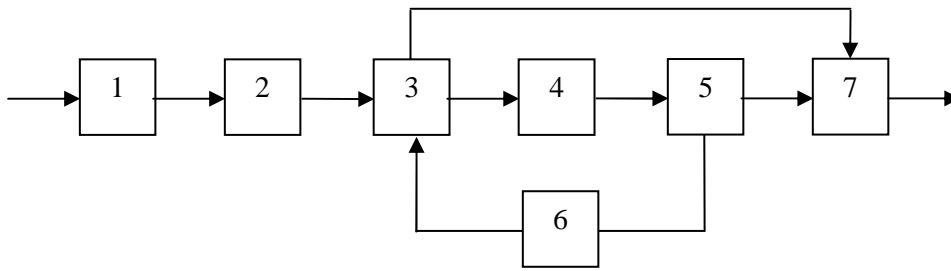


Рис.4. Блок-схема розпізнавання корисного сигналу АЕ на фоні перешкод:

- 1 – приймач АЕ-сигналів;
 2 – пристрій перетворення АЕ-сигналу на електричні імпульси;
 3 – пристрій порівняння; 4 – реєструвальний пристрій;
 5 – блок збереження інформації з еталонних кривих;
 6 – блок масштабу й амплітудної дискримінації;
 7 – блок статистичної обробки інформації

Розпізнавання отриманого сигналу за наявності шуму потребує набагато більше часу, ніж виявлення джерела АЕ [16]. Тому процес контролю за допомогою наданої схеми доцільно поділити на два етапи: на першому – виявлення сигналу від дефекту, що розвивається, а на другому – його ідентифікація.

Результати АЕ-контролю подають у вигляді переліку зареєстрованих джерел АЕ, віднесених до того чи іншого класу залежно від значення її параметрів (рис. 5).

Статистична обробка інформаційних параметрів сигналів АЕ полягає в знаходженні інформаційних ознак, до яких належать:

- середні значення амплітуди одиничних сигналів АЕ

$$M_{A_i} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n};$$

- середні значення інтервалів між одиничними актами АЕ

$$M_{\Delta T_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i}{n};$$

- дисперсії амплітуд

$$D_{A_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - M_{A_i})^2}{n};$$

- дисперсії інтервалів

$$D_{\Delta T_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - M_{\Delta T_i})^2}{n};$$

- коефіцієнт кореляції між значеннями амплітуд і інтервалів

$$R_{(A, \Delta T)_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - M_{A_i})(\Delta T_i - M_{\Delta T_i})}{\sum_{i=1}^n (A_i - M_{A_i})^2 (\Delta T_i - M_{\Delta T_i})^2};$$

- час спостереження поточної реалізації

$$t_i = N \sum_{i=1}^n M_{\Delta T_i} .$$

Часові залежності $M_{A_i}(t)$, $M_{\Delta T_i}$, $D_{A_i}(t)$, $D_{\Delta T_i}(t)$ и $R_{(A,\Delta T)_i}$ цих інформаційних ознак та їхньої стійкості за серією реалізацій є основою вивчення процесу АЕ. Вважають, що тривалість одиничного акту АЕ пов'язана детермінованою залежністю з його амплітудою та інтервалами між її актами [5]. Характеристики нестационарності процесу АЕ в межах повної реалізації описуються функцією густини ймовірності $W_i(A, \Delta T)$, де A – амплітуда, ΔT – інтервал між актами емісії, i – номер поточної реалізації.

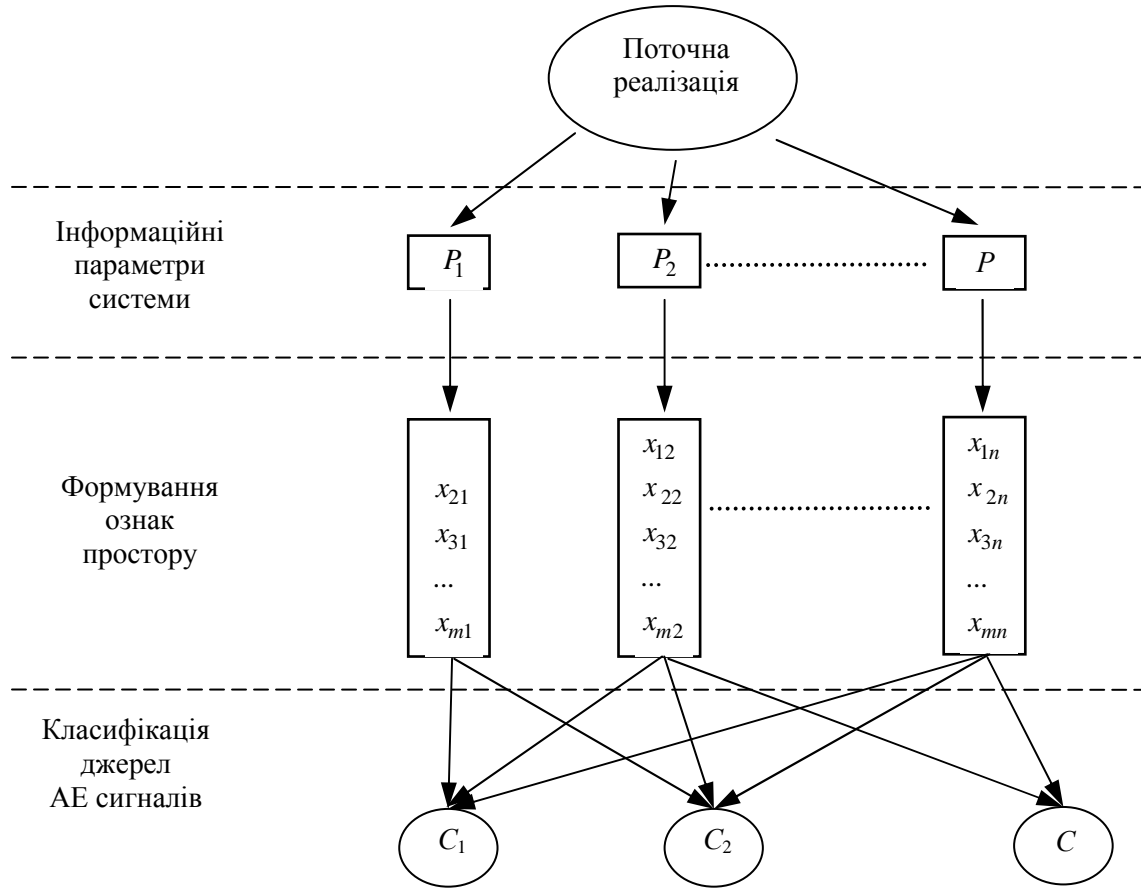


Рис. 5. Структурно-логічна схема класифікації джерел АЕ в системі розпізнавання образів

З цих позицій особливий інтерес представляє такий параметр процесу АЕ, як коефіцієнт кореляції між значеннями амплітуд і інтервалів ΔT_i між актами АЕ. Наявність кореляційного зв'язку можна пояснити тим, що при розвитку тріщин в області крихких руйнувань амплітуда імпульсу АЕ збільшується, однак послідовні кроки приросту амплітуди при стабільному рості тріщин тим менші, чим більший її черговий приріст. $R_{(A,\Delta T)_i} = 0$ означає відсутність зв'язку між A_i і ΔT_i та відповідно між D_{A_i} и $D_{\Delta T_i}$. Кожний акт АЕ зумовлений сукупністю великої кількості дислокаційних зсувів. У випадку монотонності часових залежностей $M_{A_i}(t)$ та $D_{\Delta T_i}(t)$ з'являється можливість побудови еталонної кривої з тими самими особливостями виникнення та стрибкоподібного розвитку дефекту. Тоді спільну густину ймовірності за незалежності A і ΔT описують так:

$$W_i(A, \Delta T) = W_i(A) \cdot W_i(\Delta T).$$

За принципом невизначеності, чим більше функція сконцентрована в часі, тим більше вона розмита в частотній області. Із зміною масштабу функцій добуток густини ймовірностей часового і частотного діапазонів залишається постійним. Це визначає вимоги до побудови системи АЕ-контролю, згідно з якими процес автоматизації контролю складатиметься з моделювання

розвитку дефектів на еталонних зразках, навчання самої системи контролю із запам'ятовуванням отриманої інформації, порівняння зі спостережувальною серією реалізацій сигналів АЕ та видачі висновку про дефектність виробу.

Ефективним засобом аналізу безперервних сигналів є перетворення Фур'є, в якому сигнал розкладається в базис синусів і косинусів різних частот. Коефіцієнти перетворення знаходять, обчислюючи скалярний добуток сигналу з комплексними експонентами

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\Omega t} dt,$$

де $f(t)$ – сигнал; $F(\Omega)$ – перетворення Фур'є.

Однак, стосовно аналізу сигналів АЕ перетворення Фур'є має ряд недоліків, пов'язаних з тим, що окремі особливості сигналу (піки і розриви) спричиняють незначні зміни частотного образу і згладжуються по всій частотній осі.

Частково проблему спектрального аналізу і синтезу сигналів АЕ можна вирішити за допомогою віконного перетворення Фур'є:

$$F(\Omega, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \omega(t-b) \cdot e^{-j\Omega t} dt.$$

При цьому використовують операцію множення сигналу на вікно $(t-b)$, яке є локальною функцією, яка переміщується вздовж часової осі в декількох позиціях b . Тоді перетворення стає залежним від часу, тобто отримуємо частотно-часовий опис сигналу.

Недоліком віконного перетворення Фур'є є те, що для обчислень використовують фіксоване вікно, яке не можна адаптувати до реальних властивостей сигналу. Це завдання здатне вирішити вейвлет-перетворення.

Вейвлет-перетворення дає змогу краще побачити і розкрити деякі властивості сигналу переведенням його з часового уявлення в частотно-часове. Різновидам вейвлет-аналізу, що з'явився в 1980-му році, присвячено велику кількість робіт, проте в області акустичної емісії модифікації цього методу почали застосовувати лише в 1996 році [12–14].

Вейвлет-перетворення є скалярним добутком вейвлета, який аналізує на заданому масштабі, і сигналу АЕ, який аналізується.

У класичному розумінні вейвлети являють собою сімейство функцій, які отримують масштабуванням та зсувами однієї материнської базисної функції $\Psi(t)$. У вейвлет-перетворенні базисні функції мають властивість часової локалізації, тобто мають кінцеву енергію

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt.$$

Графік вейвлет-функції осцилює навколо нуля та має нульову площу

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0.$$

Вибір аналізуючого вейвлета визначається тим, яку інформацію необхідно витягти з сигналу.

Найпоширеніші речові базиси конструюються на основі похідних функції Гаусса. Це зумовлено тим, що функція Гаусса має найкращі показники локалізації як у часовій, так і в частотній областях

$$\Psi(t) = e^{-t^2/2}.$$

Для заданого значення параметра a , який характеризує зміну часового масштабу, тобто збільшене зображення сигналу і параметра b , що характеризує зсув у часі, тобто фокусування

сигналу, функція $\Psi_{ab}(t)$, породжена материнським вейвлетом $\Psi(t)$, що визначає властивості перетвореного сигналу, має вигляд

$$\Psi_{ab}(t) = a^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right).$$

Усі вейвлети сімейства $\Psi_{ab}(t)$ мають ту саму кількість осциляцій, що і базисний вейвлет $\Psi(t)$, оскільки отримані з нього внаслідок масштабних перетворень і зсувів.

Множина функцій $\Psi_{ab}(t)$ є надлишковою, тому необхідна дискретизація параметрів a і b при збереженні можливості відновлення сигналу з його трансформант. Дискретизація, як правило, здійснюється через степінь двійки

$$a = 2^j, \quad b = k2^j;$$
$$\Psi_{jk}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}t - k),$$

де k – ціле число; j – параметр масштабу.

Збільшення a призводить до звуження функції $\Psi_{ab}(t)$. Внаслідок зміни масштабу вейвлети здатні виявляти відмінність у характеристиках сигналів на різних частотах, а внаслідок зсуву – аналізувати властивості сигналу в різних точках на всьому досліджувальному інтервалі. Переваги вейвлет-перетворення полягають у тому, що вони покривають фазову площину осередками однакової площі, але різної форми. Це дає змогу локалізувати низькочастотні деталі сигналу в частотній області, а високочастотні – в часовій.

Такою процедурою можна не лише видалити деякі статистичні флуктуації та підвищити роль динамічних характеристик сигналу, але й істотно знизити вимоги до реєструвальної апаратури сигналів АЕ та їхніх параметрів. Ефективність використання вейвлетів для статистичної обробки сигналів АЕ пояснюється тим, що за допомогою вейвлет-перетворення можна отримати його збільшене зображення і, навпаки, відкинувши несуттєві деталі і виконавши зворотне перетворення, отримати сигнал, очищений від шумів.

Висновки та перспективи подальших наукових розвідок

Статистична обробка сигналів АЕ в своїй реалізації в системі технічної діагностики металопродукції передбачає проходження етапів:

- побудови еталонних кривих, що відображають часовий хід повної реалізації дефекту, що розвивається;
- розбиття її на поточні реалізації з виділенням характерних точок цих залежностей;
- виявлення корисного сигналу на фоні перешкод і вимірювання його параметрів;
- класифікацію сигналів, тобто віднесення прийнятого сигналу або до АЕ, або до перешкод;
- порівняння серії спостережуваних поточних реалізацій з еталонними кривими при тих же форматах розбиття повної реалізації;
- оцінки зв'язку сигналів АЕ з характером виявленого дефекту.

Точність аналітичної апроксимації результатів, отриманих під час обробки статистичного матеріалу, залежить від числа розбиття повної реалізації на поточні, а також від точності оцінок параметрів АЕ сигналу в поточній реалізації. Укрупнення такого розбиття призводить до нестационарності процесу в межах поточної реалізації та пропуску аномальних інформативних особливостей АЕ сигналу. Збільшення кількості точок відліку в поточній реалізації ускладнює вимірювання та подальшу статистичну обробку результатів.

1. Space-time evolution rules study on acoustic emission location in rock under cyclic loading[Text] / Jiang XU, Xiaojun TANG, Shuchun LI, Yunqi TAO, Yongdong JIANG // Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. – 2009. – No. 3(4). – P. 422–427. 2. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т.,

кн. 1, 2: Метод акустической эмиссии [Текст] / В. И. Иванов, И. Э. Власов [Под общ. ред. Клюева В. В.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с. 3. Серьезнов А. Н. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии [Текст] / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев. – М.: Машиностроение. 2004. – 392 с. 4. Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов [Текст] / А. В. Букетов, В. Д. Нигалатий, С. А. Рожков, А. В. Шарко // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ, 2015. – Вип. 48. – С. 220–224. 5. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике [Текст] / [под ред. К. Б. Вакара]. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с. 6. Pollok Adrian. Acoustic Emission Inspection [Text] / Adrian Pollok // Metals Handbook. Ninth Edition ASM International. – 1989. – Vol. 17. – P. 278–294. 7. Абрамов О. В. Излучение нелинейных акустических сигналов областью скопления микротрещин, образующих пластинчатую дефектную структуру [Текст] / О. В. Абрамов, О. М. Градов // Материаловедение. – 2004. – № 4. – С. 2–6. 8. Бигус Г. А. Техническая диагностика опасных производственных объектов [Текст] / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев. – М.: Наука, 2010. – 415 с. 9. Марасанов В. В. Модели обработки данных в системе определения дефектов методом акустической эмиссии [Текст] / В. В. Марасанов, А. А. Шарко // Проблемы информационных технологий. – 2015. – № 2(018). – С. 53–56. 10. Sundaresun M. I. Linear location of acoustic emission sources with a single channel distributed sensor [Text] / M. I. Sundaresun, M. J. Schulz, A. Ghoshol // Journal of intelledent material systems and structures. – 2001. – № 12. – P. 689–699. 11. Об определении координат дефектов в конструкциях с произвольной поверхностью [Текст] / Л. М. Полесская, В. В. Гричук, А. А. Балабанов, В. В. Марасанов // Дефектоскопия. – 1978. – № 7. – С. 50–56. 12. Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals [Text] / Suzuki H., Kinto T., Taketo M., Ono K. [Text] // Journal of Acoustik Emission . – 1996. – Vol. 14, No. 2. – P. 69–84. 13. Golaski I. Diagnostics of rein for concrete bridges by acoustic emission [Text] / Golaski I., Gebski P., Ono K. // Journal of Acoustic Emission . – 2002. – No. 1. – P. 83–98. 14. Оценка возможности метода акустической эмиссии при контроле магистральных трубопроводов [Текст] / Г. Ф. Буденков, О. В. Недзвецкая, В. Н. Сергеев, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2002. – № 2. – С. 29–36. 15. РД-03-131-97 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля судов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://libgost.ru/rd/66514Tekst_RD_03_131_97_Pravila_organizacii_i_provedeniya_akustiko_emissionnogo_kontrolya_sosudov_apparatov_kotlov_i_tehnologicheskikh_truboprovodov.html. 16. Вопросы статистической теории распознавания [Текст] / Ю. Л. Барабаш, Б. В. Варский, В. Т. Зиновьев, В. С. Кириченко, В. Ф. Сапеган. – М.: Советское радио, 1967. – 399 с. 17. Губкин Л. С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах [Текст] / Л. С. Губкин. – М.: Советское радио, 1972. – 448 с.