

СИГНАЛ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ -ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ

О.П.Бухало, Б.П.Клим, Г.В.Микитин, Є.П.Почапський, Р.Ф.Федорів

Фізико-механічний інститут НАН України, 79601, Львів, вул.Наукова, 5, тел.(0322) 65-43-51, факс (0322) 64-94-27, E-mail: dep23@ah.ipm.lviv.ua

Викладено методи відбору і вимірювальних перетворень сигналу акустичної емісії (АЕ) матеріалів і конструкцій. Використовуючи запропоновану модель сигналу розглянуто його ймовірнісні характеристики наведено алгоритми фільтрації сигналу, оцінок інформативних параметрів амплітудних розподілів і параметра заникання сигналу АЕ в часі, а також відповідні похибки оцінок.

ВСТУП

Сигнал акустичної емісії, зокрема, його амплітудні, часові, частотні, ймовірнісні та інші характеристики містять інформацію про дефектність матеріалів і конструкцій.

Зв'язок характеристик сигналу АЕ з параметрами досліджуваних об'єктів знаходять використовуючи математичні моделі утворення і поширення дефектів у твердих тілах, результати досліджень розповсюдження різних типів акустичних хвиль, характеристики перетворювачів акустичних хвиль в електричний сигнал, експериментальні дослідження.

Так, наприклад, амплітуда імпульсу сигналу АЕ пропорційна довжині стрибка тріщини, кількість зареєстрованих імпульсів пропорційна сумарному розкриттю тріщини [1], амплітудний розподіл імпульсів сигналу АЕ характеризує тип руйнування [2,3], положення максимуму і ширина частотного спектру визначають стадії деформації [4], інтенсивність потоку імпульсів і функція її зміни в часі характеризують міцність конструкції [1,5,6], реєстрація моментів появи імпульсів на елементах пьезоантени дозволяє локалізувати місце знаходження дефекту [7] і т.д.

Для підвищення достовірності досліджень часто використовують простори інформативних параметрів сигналу, наприклад, медіанна частота – середня енергія, відносна ентропія – середня амплітуда та ін.

Розробка алгоритмів відбору і обробки АЕ з метою визначення його інформативних параметрів і оцінка похибок вимірювальних перетворень мають вирішальне значення для задачі неруйнівного контролю методами АЕ.

1. МОДЕЛЬ СИГНАЛУ ДЕТЕКТОРА АЕ

Пружні коливання, що виникають внаслідок актів АЕ, перетворюють відповідним детектором у випадкову послідовність імпульсів деякої форми, яка залежить від механізму і місця утворення дефекту, характеристик детектора, типу акустичної хвилі і т.д. Сигнал детектора містить також імпульсну і неперервну завади. Тому в загальному випадку імпульсний сигнал детектора АЕ може бути представлений у вигляді моделі

$$X(t) = \sum_i U_i H_i(t-t_i) + \sum_j B_j G_j(t-t_j^*) + s(t) + \gamma(t),$$

де U_i - амплітуда i -го інформаційного імпульсу, що з'явився в момент t_i , $H_i(\bullet)$ - функція форми імпульсу, яка дорівнює одиниці в максимумі; $B_j, G_j(\bullet), t_j^*$ - аналогічні значення для імпульсної завади; $s(t) = s_0 \sin \omega t$ - неперервна синусна завада, де s_0 - її амплітуда, ω - частота; $\gamma(t)$ - стаціонарна неперервна випадкова завада, яка може бути описана в рамках кореляційної теорії; $G(\bullet)$ і $H(\bullet)$ і дорівнюють нулю при від'ємному значенні аргументу.

В даній моделі для вимірювальних перетворень використовують лише інформаційну складову, а завади повинні бути відфільтровані чи скомпенсовані.

Амплітуди інформаційних імпульсів є випадковими, характер слідування імпульсів в часі описується пуассоновою моделлю [7].

Таким чином, інформаційну компоненту сигналу характеризують густиною розподілу амплітуд $p_\alpha(u)$, вектором її параметрів α , моментами \bar{u}, \bar{u}^2 , ентропією L , ймовірністю $P(N)$ появи N імпульсів за

час T $P(N) = (N!)^{-1} \left[\int_0^T n(t) dt \right]^N \exp(-[\bullet])$, де $n(t)$ -

інтенсивність імпульсного потоку, тривалістю імпульсів, часом їх зростання і заникання, частотним спектром $K(\omega)$, який є перетворенням Фур'є функції $H(t)$, спектральною густиною $Q(\omega) = nu^2 |K(\omega)|^2$ (для $n = \text{const}$), значенням чи параметрами функції інтенсивності $n(t)$.

Аналогічним чином може бути характеризувана імпульсна завада. Неперервну синусну заваду характеризують значеннями s_0 і ω , а неперервну випадкову – її густиною розподілу $\eta(\gamma)$ і кореляційною функцією $R_x(\tau)$, де τ - часовий зсув.

2. ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛУ

Виключення імпульсної завади з сигналу $X(t)$ проводять за формою, амплітудою чи тривалістю імпульсів, блокуванням вимірювальних каналів під час ударів, роботи механізмів [8], за співпадінням імпульсів на виходах основного і допоміжного детекторів, які одночасно реєструють електромагнітні завади [9], виключенням неправдивих імпульсів шляхом математичної обробки різниць часів появи імпульсів АЕ на елементах акустичної антени [7] і т.д.

Неперервні завади виключають методами пасивної [10], адаптивної [11] чи прогнозуючої [12] фільтрації. В останньому випадку, наприклад, компенсацію неперервної завади під час дії інформаційного імпульсу тривалістю θ в інтервалі $(t_i, t_i + \theta)$ виконують за алгоритмом

$$X^*(t) = U_i H_i(t - t_i) + s(t) + \gamma(t) - \sum_{k=0}^1 [s^{(k)}(t_i) + \gamma^{(k)}(t_i)](t - t_i)^k,$$

де абсолютне значення завади і її похідної в момент t_i використовують для прогнозу і компенсації завади під час дії імпульсу.

3. ОЦІНКА АМПЛІТУДНИХ РОЗПОДІЛІВ І ЇХ ПАРАМЕТРІВ

Амплітудний розподіл інформаційної імпульсної компоненти визначають за допомогою багатоканального амплітудного аналізатора з l_0 суміжними амплітудними “вікнами” шириною Δu кожна. Гістограма апаратного амплітудного розподілу $q(l)$, а також стандартні оцінки моментів і ентропії L мають вигляд

$$q(l) = N_l \left(\sum_{i=1}^{l_0} N_i \right)^{-1}; \quad \hat{u} = \Delta u \sum_{l=1}^{l_0} l q(l);$$

$$\hat{u}^2 = (\Delta u)^2 \sum_{l=1}^{l_0} l^2 q(l); \quad \hat{L} = - \sum_{l=1}^{l_0} q(l) \log[q(l)];$$

де N_l - кількість відліків в l -му каналі.

Оцінка густини розподілу і моментів за гістограмою дає похибку зміщення [13], а якщо, крім того, амплітудний розподіл імпульсів виходить за межі шкали аналізатора, то гістограма зрізаного апаратного розподілу амплітуд не дає можливості оцінки дійсних значень моментів і ентропії реального розподілу $p(u)$.

Із багатьох експериментальних даних відомо, що на різних етапах руйнування різноманітних

матеріалів густина розподілу амплітуд $p_\alpha(u)$ має конкретний вигляд (Гауса, Релея, експоненційний, показниковий) [14, 15, 16], де невідомими (інформативними) є значення вектора його параметрів α . Тоді у кожному конкретному випадку можна оцінити дійсні значення параметрів густини розподілу навіть за зрізаною гістограмою і тим самим отримати інформацію про реальні амплітудні характеристики сигналу АЕ.

Для цього можна використати метод максимальної правдоподібності, приймаючи до уваги, що відліки N_l в каналах аналізатора є незалежними. Тоді значення сумісної ймовірності $P(N_1, N_2, \dots, N_{l_0} | N_\Sigma)$ розподілу кількості відліків N_l по каналах при умові, що їх сумарна кількість дорівнює N_Σ , має вигляд

$$P(N_1, N_2, \dots, N_{l_0} | N_\Sigma) = [P(N_\Sigma)]^{-1} \prod_{l=1}^{l_0} P(N_l) = N_\Sigma! \prod_{l=1}^{l_0} \left(\frac{\bar{N}_l}{N_\Sigma} \right)^{N_l} \frac{1}{N_l!},$$

$$\bar{N}_l = \bar{N}_\Sigma \int_{(l-1)\Delta u}^{l\Delta u} p_\alpha(u) du \left(\int_0^{l_0\Delta u} p_\alpha(u) du \right)^{-1}, \quad \bar{N}_\Sigma = \int_0^T n_\Sigma(t) dt,$$

T - час вимірювань, $n_\Sigma(t)$ - інтегральна інтенсивність потоку імпульсів.

Прирівнюючи нулю похідні функції правдоподібності $\ln P(\bullet)$ по кожному з параметрів α_r вектора α ($r=1, 2, \dots, r_0$, де r_0 - кількість невідомих параметрів), отримуємо систему рівнянь для оцінок значень α_r , яка в загальному випадку має вигляд

$$\sum_{l=1}^{l_0} N_l \frac{F'_\alpha[l\Delta u] - F'_\alpha[(l-1)\Delta u]}{F_\alpha[l\Delta u] - F_\alpha[(l-1)\Delta u]} - N_\Sigma \frac{F'_\alpha(l_0\Delta u)}{F_\alpha(l_0\Delta u)} = 0,$$

де $N_\Sigma = \sum_{l=1}^{l_0} N_l$; $F_\alpha(z) = \int_0^z p_\alpha(u) du$, а похідна функції

$F_\alpha(\bullet)$ береться по невідомому параметру α_r .

Для практично важливого випадку вузьких амплітудних “вікон” ($\sqrt{D_u} > 5\Delta u$, де D_u - дисперсія амплітудного розподілу) останні рівняння перетворюються до вигляду

$$\sum_{l=1}^{l_0} N_l \frac{p'_\alpha[(l-0,5)\Delta u]}{p_\alpha[(l-0,5)\Delta u]} - N_\Sigma \frac{F'_\alpha(l_0\Delta u)}{F_\alpha(l_0\Delta u)} = 0,$$

$r = 1, 2, \dots, r_0$, а похідна береться по шуканому параметру α_r .

Останні рівняння для всіх практично важливих випадків мають простий вигляд і розв'язуються методом ітерацій, причому на першому кроці ітерацій другий член в цих рівняннях необхідно прийняти рівним нулю.

Так, наприклад, для показникового розподілу Парето $p_m(u) = (m-1)u_0^{-1}(uu_0^{-1})^{-m}$, де u_0 - поріг дискримінації амплітуд, $u > u_0$, $m > 1$, отримуємо рекурентний алгоритм оцінки інформаційного параметра m :

4. ОЦІНКИ ІНТЕНСИВНОСТІ ІМПУЛЬСНОГО ПОТОКУ І ПАРАМЕТРА ЇЇ ЗНИКАННЯ В ЧАСІ

$$\hat{m} = \left[1 - \left(1 + \frac{l_0 \Delta u}{u_0} \right)^{-\hat{m}_{k-1}+1} \ln \left(1 + \frac{l_0 \Delta u}{u_0} \right)^{\hat{m}_{k-1}-1} \right] N_{\Sigma} \times$$

$$\times \left(\sum_{l=1}^{l_0} N_l \ln \left[1 + \frac{(l-0,5)\Delta u}{u_0} \right] \right)^{-1} + 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad \hat{m}_0 = 1.$$

Для експоненційного розподілу амплітуд $p_A(u) = A^{-1} \exp(-A^{-1}u)$, отримуємо, відповідно

$$\hat{A}_k = \left\{ 1 - \frac{l_0 \Delta u}{\hat{A}_{k-1}} \left[\exp \left(\frac{l_0 \Delta u}{\hat{A}_{k-1}} \right) - 1 \right] \right\}^{-1} \frac{\Delta u}{N_{\Sigma}} \sum_{l=1}^{l_0} (l-0,5) N_l,$$

$$k = 1, 2, 3, \dots; \quad \hat{A}_0 = 0.$$

Таким самим чином можуть бути знайдені алгоритми оцінки невідомих параметрів інших законів розподілів (Релея, нормального та ін.)

Процес ітерацій закінчують, коли відносна зміна оцінки параметра α_r стає меншою за відносну статистичну помилку $\delta \alpha_r$. Остання має вигляд

$$\delta \hat{m} = (m-1)m^{-1} N_{\Sigma}^{-0,5}; \quad \delta \hat{A} = N_{\Sigma}^{-0,5}.$$

Підставляючи отримані значення оцінок параметрів α_r у формули відповідних густин розподілів можна визначити їх реальний вигляд, значення моментів і диференціальної ентропії. Враховуючи також похибку $\Delta \hat{\alpha}_r$, оцінки параметра α_r

($\Delta \hat{\alpha}_r = \hat{\alpha}_r \left[(\delta \hat{\alpha}_r)^2 + \delta_{\alpha_r}^2 \right]^{0,5}$, де δ_{α_r} - відносна апаратна систематична похибка оцінки параметра α_r) легко оцінити обумовлену нею похибку визначення форми густини розподілу

$$\Delta p = \int_0^{\infty} |p_{\hat{\alpha}_r}(u) - p_{\hat{\alpha}_r + \Delta \hat{\alpha}_r}(u)| du \approx \Delta \hat{\alpha}_r \int_0^{\infty} \left| \frac{dp_{\hat{\alpha}_r}(u)}{d\hat{\alpha}_r} \right| du,$$

похибку оцінки моментів $\Delta u^k(\hat{\alpha}_r) \approx \left| \frac{du^k(\hat{\alpha}_r)}{d\hat{\alpha}_r} \right| \Delta \hat{\alpha}_r$, а

також похибку оцінки ентропії (еквівалентну втраті інформації за рахунок невизначеності параметра α_r)

$$\Delta L = |L(\hat{\alpha}_r) - L(\hat{\alpha}_r + \Delta \hat{\alpha}_r)| \approx \left| \frac{dL}{d\hat{\alpha}_r} \right| \Delta \hat{\alpha}_r,$$

де $L = - \int_0^{\infty} p_{\hat{\alpha}_r}(u) \log [p_{\hat{\alpha}_r}(u)] du$. Так, наприклад, для

розподілу Парето $\Delta p = \frac{m}{m-1} \sqrt{(\delta \hat{m})^2 + \delta_m^2}$,

$$\overline{u^k(\hat{m})} = \frac{k \hat{m} u_0^k}{(\hat{m} - k - 1)^2} \sqrt{(\delta \hat{m})^2 + \delta_m^2}, \quad \hat{m} > k = 1, 2;$$

$$\Delta L = \left(\frac{m}{m-1} \right)^2 \log e \sqrt{(\delta \hat{m})^2 + \delta_m^2},$$

а для експоненціального розподілу амплітуд

$$\Delta p = \frac{2}{e} \sqrt{(\delta \hat{A})^2 + \delta_A^2}, \quad \overline{u^k(\hat{A})} = (k \hat{A})^k \sqrt{(\delta \hat{A})^2 + \delta_A^2},$$

$$\Delta L = \log e \sqrt{(\delta \hat{A})^2 + \delta_A^2}.$$

Інтенсивність потоку імпульсів сигналу АЕ оцінюють, як правило, на ділянках локальної стаціонарності де $n(t) = n = const$ шляхом накопичення кількості відліків N за час T . Тоді $\hat{n} = NT^{-1}$, $\delta \hat{n} = N^{-0,5}$. Максимальне значення інтенсивності має місце здебільшого на ділянці пластичної деформації [1].

При ступінчастому навантаженні композитних матеріалів [5] чи при попередній витримці металевих виробів в атмосфері водню [6] інтенсивність $n(t)$ потоку імпульсів сигналу АЕ спадає за експоненційним законом $N(t) = n_0 \exp(-tT_0^{-1})$, де n_0 - початкове значення інтенсивності, а інформативним параметром є значення T_0 - постійної часу її зникання. Тоді реєструючи кількість відліків M_l в кожному з l_0 послідовних часових "вікон" тривалістю ΔT отримуємо розподіл чисел M_l по часових вікнах ($l = 1, 2, \dots, l_0$).

Ймовірність $P(M_1, M_2, \dots, M_{l_0} | M_{\Sigma})$ розподілу відліків M_l по каналах ("вікнах") при загальній кількості відліків M_{Σ} має вигляд

$$P(M_1, M_2, \dots, M_{l_0} | M_{\Sigma}) = M_{\Sigma}! \prod_{l=1}^{l_0} \left(\frac{\bar{M}_l}{M_{\Sigma}} \right)^{M_l} (M_l!)^{-1},$$

$$\text{де } \bar{M}_l = \int_{(l-1)\Delta T}^{l\Delta T} n(t) dt; \quad \bar{M}_{\Sigma} = \int_0^{l_0 \Delta T} n(t) dt.$$

Диференціюючи функцію правдоподібності $\ln P(\bullet)$ по параметру T_0 і прирівнюючи результат нулю отримуємо точне трансцендентне рівняння для оцінки значення T_0

$$\left[1 - \exp \left(- \frac{\Delta T}{T_0} \right) \right]^{-1} - l_0 \left[\exp \left(l_0 \frac{\Delta T}{T_0} \right) - 1 \right]^{-1} = M_{\Sigma}^{-1} \sum_{l=1}^{l_0} l M_l,$$

яке можна розв'язати методом табулювання чи ітерацій.

Імітаційне моделювання на ЕОМ роботи описаних вище алгоритмів оцінок параметрів зрізаних густин розподілів амплітуд і параметра зникання сигналу АЕ дало значення систематичних похибок не більше ніж 3-5%.

5. ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА

Згадані вище та інші алгоритми відбору і обробки сигналу АЕ реалізовані в розробленій інформаційно-вимірювальній системі для експериментальних досліджень характеристик конструкційних матеріалів методом АЕ.

Система має різноманітні засоби програмного і ручного керування, самоконтролю, фільтрації сигналу і дозволяє реєструвати сигнал АЕ в реальному масштабі часу. Обробка сигналу проводиться за різними вимірювальними процедурами, включаючи оцінку амплітудних і часових розподілів сигналу та їх параметрів, оцінку частотного спектру сигналу, його автокореляційної функції, визначення координат джерела АЕ, візуалізацію первинної інформації і результатів обробки і т.д.

Для контролю реальних значень систематичних похибок оцінок параметрів α_r і T_0 в інформаційно-вимірювальній системі було використаний метод взірцевої стохастичної міри і відповідні технічні засоби, що описані в [17, 18]. Експериментальна оцінка систематичних похибок визначення величин α_r і T_0 дала значення в межах 3-5%.

ВИСНОВКИ

Дослідження характеристик матеріалів і конструкцій методом АЕ ґрунтується на вивченні ефектів утворення і поширення дефектів у твердих тілах, виборі моделі сигналу, виявленні його інформативних параметрів, створення методів і засобів відбору і обробки інформаційного сигналу, обчисленні похибок вимірювальних перетворень, створенні відповідних вимірювальних систем, а також методів і засобів їх метрологічного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бунина Н.А. *Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии.* -Л.: Изд. ЛГУ, 1990.-156 с.
2. Юдин А.А., Иванов В.И. *К теории акустической эмиссии при пластической деформации металлов // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Ч.1 (1-я Всесоюзная конференция).* - Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета.-1989. - С.138-142.
3. Буйло С.И. *Об интерпретации максимумов и достоверности оценки вида амплитудного распределения АЭ // Техн. диагностика и неразруш. контроль.-1995.-№1. - С.31-38.*
4. *Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии растущей трещины/* А.Е.Андрейкив, Н.В.Лысак, В.Р.Скальский и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль.-1993.-№1. - С.75-84.
5. Надолинный Б.А., Тихий В.Г., Санин Ф.П. *Акустико-эмиссионный метод прогнозирования давления разрушения // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Ч.2. (1-я Всесоюзная конференция).* - Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета.-1989. - С.101-105.

6. Лысак Н.Б., Скальский В.Р., Сергиенко О.Н. *Определение водородной поврежденности сталей котельных труб импульсным прозвучиванием // Техн. диагностика и неразруш. контроль.-1993.-№3. - С.58-65.*
7. *Акустическая эмиссия и ее применения для неразрушающего контроля в ядерной энергетике /* В.И.Артюхов, К.Б.Вакар, В.И.Макаров и др.-М.: Атомиздат, 1980.-216 с.
8. Вакар К.Б. *Приборы и информационные системы регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии материалов и конструкций // Акустическая эмиссия материалов и конструкций (1-я Всесоюзная конференция).*- Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета.-1989. - С.108-114.
9. Патент 2419, Украина, МКИ G01N29/14. *Способ контроля роста трещин в образцах материалов /* Андрейкив А.Е., Скальский В.Р., Лысак М.В. - Оpubл. 26.12.94. Бюл.№5-1.
10. Скальский В.Р. *Прибор для регистрации сигналов акустической эмиссии СВР-4 // Техн. диагностика и неразруш. контроль.-1995.-№1.С.71-79.*
11. *Акустико-эмиссионная система диагностики состояния ответственных металлоизделий /* В.В.Шип, Г.А.Бигус, Е.Г.Дорохова и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль.-1997.-№3. - С.56-59.
12. Бухало О.П. *Подавление непрерывных помех в каналах передачи стохастических импульсных сигналов // Метрология.-1990.-№6. - С.11-19.*
13. Бендат Дж., Пирсол А. *Прикладной анализ случайных данных.-М.:Мир, 1989.-540 с.*
14. Буйло С.И. *Использование статистических моделей для количественной оценки амплитудных распределений сигналов акустической эмиссии и повышения достоверности АЭ метода // Дефектоскопия.-1996.-№5. - С.26-34.*
15. Манохин А.И., Маслов Н.И., Белов А.В. *Энергетический анализ природы сигналов акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Ч.1. (1-я Всесоюзная конференция).* - Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета.-1989. - С.154-161.
16. *Применение метода акустической эмиссии для анализа процессов деформации и разрушения композиционных материалов /* Е.А.Кулешова, В.А.Куликов, О.В.Гусев и др. // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Там же. - С.169-180.
17. *Metrological support of NDT by acoustic emission method /* O.Bukhalo, V.Klym, G.Mukyryn at al // Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics.-Minsk, October 20-23,-1998. - P.305-310.
18. Бухало О.П. *Образцовый импульсный стохастический сигнал - применение, воспроизведение, аттестация // Измерительная техника.-1997.-№6. - С.24-33.*