

УДК 621.794.052.08

О.Бухало, канд. техн. наук; Б.Клим, канд. техн. наук;

Г.Микитин, канд. техн. наук; Є.Почапський, канд. техн. наук;

Р.Федорів, канд. техн. наук

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України

МЕТОДИ ОБРОБКИ СИГНАЛУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Розглянуто методи відбору і обробки сигналу акустичної емісії з метою оцінки характеристик конструкційних матеріалів.

Умовні позначення:

U_i - амплітуда i -го інформаційного імпульсу;

$H_i(.)$ - функція форми імпульсу, що дорівнює одиниці в максимумі;

t_i - момент появи імпульсу;

$B_j, G_j(.), t_j$ - аналогічні значення для імпульсної завади;

$s(t) = s_0 \sin \omega t$ - неперервна синусна завада;

s_0 - її амплітуда;

ω - частота;

$\gamma(t)$ - стаціонарна неперервна випадкова завада;

$G(.), H(.)$ - дорівнюють нулеві при від'ємному значенні аргументу;

$n(t)$ - інтенсивність імпульсного потоку;

N_l - кількість відліків у каналі з номером l ;

α - вектор параметрів густини розподілу $p_\alpha(u)$;

T - час вимірювань;

$n_\Sigma(t)$ - інтегральна інтенсивність потоку імпульсів, що реєструють.

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

Так, амплітуда імпульсу сигналу АЕ пропорційна довжині стрибка тріщини; кількість імпульсів пропорційна сумарному розкриттю тріщини [1]; амплітудний розподіл, ширина і положення максимуму частотного спектру визначають стадії руйнування [2,3,4]; інтенсивність потоку імпульсів і функція її зміни в часі характеризують міцність конструкції [5,6,7]; моменти появи імпульсів у часі на елементах п'єзоантени дозволяють локалізувати дефектну ділянку [8] та ін.

Одночасне використання комплексу характеристик сигналу АЕ дозволяє підвищити достовірність оцінки стану досліджуваного об'єкта [9,10,11]. Загалом імпульсний сигнал АЕ $X(t)$ можна подати у вигляді

$$X(t) = \sum_i U_i H_i(t - t_i) + \sum_j B_j G_j(t - t_j^*) + s(t) - \gamma(t). \quad (1)$$

Амплітуди U_i є випадковими, імпульсний потік - пуасоновим [8], форма імпульсів залежить від механізму і координат утворення сигналу АЕ. Таким чином, інформаційну складову в (1) характеризують густиною розподілу амплітуд $p(u)$, її моментами \bar{u}, \bar{u}^2 , ентропією, ймовірністю $P(N)$ появи N імпульсів за час T

$$P(N) = (N!)^{-1} \left[\int_0^T n(t) dt \right]^N \exp(-[\cdot]), \quad (2)$$

а також тривалістю імпульсів, часом їх зростання і згасання, частотним спектром $H^*(\omega)$, що є перетворенням Фур'є функції $H(t)$, спектральною густиною $G(\omega) = nu^2 |H^*(\omega)|^2$, значенням чи параметрами функції $n(t)$.

Імпульсна завада в (1) фільтрується за формою, амплітудою чи тривалістю імпульсів, блокуванням вимірювального каналу (під час ударів, роботи механізмів) [12], за збігом імпульсів на основному і допоміжному детекторах, що одночасно реєструють електромагнітні завади [13] шляхом виявлення хибних імпульсів на приймачах акустичної антени [8] та ін.

Неперервні завади виключають шляхом пасивної [14], адаптивної [15] чи прогнозної фільтрації [16]. В останньому випадку, наприклад, компенсацію неперервної завади під час дії інформаційного імпульсу тривалістю θ в інтервалі $(t_i, t_i + \theta)$ виконують за алгоритмом

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

де абсолютне значення завади та її похідної на момент t_i використовують для прогнозу і компенсації завади під час інформаційного імпульсу.

Амплітудний розподіл інформаційної імпульсної компоненти сигналу $X(t)$ оцінюють за допомогою багатоканального амплітудного аналізатора з кількістю каналів l_0 і шириною амплітудного "вікна" в каналі Δu . Гістограма апаратурного амплітудного розподілу, а також оцінки відповідних моментів і ентропії L виглядають:

$$\hat{q}(l) = N_l \left(\sum_{l=1}^{l_0} N_l \right)^{-1}, \hat{u} = \Delta u \sum_{l=1}^{l_0} l \hat{q}(l), \quad (3)$$

$$\hat{u}^2 = (\Delta u)^2 \sum_{l=1}^{l_0} l^2 \hat{q}(l), \hat{L} = - \sum_{l=1}^{l_0} \hat{q}(l) \ln[\hat{q}(l)].$$

Оцінка густин розподілів і моментів за гістограмами дає похибку зміщення [17], а якщо, крім того, амплітудний розподіл імпульсів виходить за межі шкали аналізатора, то гістограма зрізаного апаратурного розподілу амплітуд не дозволяє оцінити дійсні значення моментів і ентропії реального розподілу $p(u)$ згідно з рівняннями (3).

Із багатьох експериментальних даних відомо, що на різних стадіях руйнування різноманітних матеріалів густина розподілу амплітуд має конкретний вигляд (Гаусів, Релея, експоненційний, показниковий, Вейбула) [18,19,20], де невідомими (інформативними) є значення вектора його параметрів. Тоді у кожному конкретному випадку можна оцінити дійсні значення параметрів розподілу навіть за зрізаною гістограмою і тим самим отримати інформацію про дійсні амплітудні характеристики сигналу АЕ.

Використовуючи розподіл (2) і пам'ятаючи, що відліки N_l є статистично незалежними, значення сумісної ймовірності $P(N_1 N_2, \dots, N_{l_0} | N_\Sigma)$ розподілу кількості відліків N_l на каналах при умові, що їх сумарна кількість в усіх каналах дорівнює N_Σ , виглядає:

$$P(N_1, N_2, \dots, N_{l_0} | N_\Sigma) = [P(N_\Sigma)]^{-1} \prod_{l=1}^{l_0} P(N_l) = N_\Sigma! \prod_{l=1}^{l_0} \left(\frac{\bar{N}_l}{\bar{N}_\Sigma} \right)^{N_l} \frac{1}{N_l!}, \quad (4)$$

де $\bar{N}_l = \bar{N}_\Sigma \int_{(l-1)\Delta u}^{l\Delta u} P_\alpha(u) du \left(\int_0^{l_0\Delta u} P_\alpha(u) du \right)^{-1}$, $\bar{N}_\Sigma = \int_0^T n_\Sigma(t) dt$, $l = 1, 2, \dots, l_0$.

Прирівнюючи до нуля похідні функції правдоподібності $Q=\ln P(.)$ для кожного з параметрів α_r , вектора α ($r=1,2,\dots,r_o$, де r_o - кількість невідомих параметрів) отримуємо систему рівнянь для оцінок α_r , що загалом виглядає:

$$\sum_{l=1}^{l_o} N_l \frac{F'_{\alpha_r}[l\Delta u] - F'_{\alpha_r}[(l-1)\Delta u]}{F_{\alpha_r}[l\Delta u] - F_{\alpha_r}[(l-1)\Delta u]} - N_{\Sigma} \frac{F'_{\alpha_r}(l_o\Delta u)}{F_{\alpha_r}(l_o\Delta u)} = 0, \quad (5)$$

де $N_{\Sigma} = \sum_{l=1}^{l_o} N_l$, $F_{\alpha}(z) = \int_0^z P_{\alpha}(u)du$, а похідна функції F_{α} береться за параметром α_r .

Для практично важливого випадку вузьких амплітудних вікон ($\sqrt{D_u} > (5-10)\Delta u$, де D_u - дисперсія амплітудного розподілу) рівняння (5) перетворюється до вигляду

$$\sum_{l=1}^{l_o} N_l \frac{P'_{\alpha_r}[(l-0,5)\Delta u]}{P_{\alpha_r}[(l-0,5)\Delta u]} - N_{\Sigma} \frac{F'_{\alpha_r}(l_o\Delta u)}{F_{\alpha_r}(l_o\Delta u)} = 0, r=1,2,\dots,r_o. \quad (6)$$

Останнє рівняння для всіх практично важливих випадків розв'язується методом ітерацій, причому на першому кроці ітерації другий член у (6) слід прирівняти до нуля. Так, наприклад, для показникового розподілу (Парета), що виглядає $P_m(u) = (m-1)u_o^{-1}(uu_o^{-1})^{-m}$, де u_o - поріг дискримінації амплітуд, $u > u_o$, $m > 1$, із (6) отримуємо рекурентний алгоритм

$$\hat{m}_k = \left[1 - \left(1 + \frac{l_o\Delta u}{u_o} \right)^{-\hat{m}_{k-1}+1} \ln \left(1 + \frac{l_o\Delta u}{u_o} \right)^{\hat{m}_{k-1}-1} \right] N_{\Sigma} \left(\sum_{l=1}^{l_o} N_l \ln \left[1 + \frac{(l-0,5)\Delta u}{u_o} \right] \right)^{-1} + 1, \\ k=1,2,3,\dots; \hat{m}_0 = 1,$$

а для експоненційного розподілу

$$\hat{A}_k = \left\{ 1 - \frac{l_o\Delta u}{\hat{A}_{k-1}} \left[\exp \left(\frac{l_o\Delta u}{\hat{A}_{k-1}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1} \frac{\Delta u}{N_{\Sigma}} \sum_{l=1}^{l_o} (l-0,5)N_l, \quad (7)$$

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

Процес ітерацій припиняють, коли відносна зміна параметру $\hat{\alpha}_k$ стає меншою за відносну статистичну похибку $\delta\hat{\alpha}_r$, яка для згаданих випадків становить $\delta\hat{m} = (m-1)m^{-1}N_{\Sigma}^{-0,5}$, $\delta\hat{A} = N_{\Sigma}^{-0,5}$.

Інтенсивність потоку імпульсів сигналу АЕ оцінюють, як правило, на ділянках локальної стаціонарності, де $n(t)=n=const$ шляхом підрахунку кількості імпульсів N за час T : $\hat{n} = NT^{-1}$, $\delta\hat{n} = N^{-0,5}$.

Максимум інтенсивності є на ділянці пластичної деформації [1,5].

При ступінчастому навантаженні композитних матеріалів [6] чи при попередній витримці металевих зразків у атмосфері водню [7] інтенсивність $n(t)$ спадає в час за законом $n(t)=n_o \exp(-tT_o^{-1})$, де n_o - початкова інтенсивність, а T_o - стала часу затухання. Тоді, реєструючи кількість відліків M_l у кожному з l_o послідовних часових вікон тривалістю ΔT , отримуємо розподіл чисел M_l за часовими вікнами ($l=1,2,\dots,l_o$). Для оцінки параметра T_o можна використати розподіл (4), де позначення N треба замінити на M , причому

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

Прирівнюючи до нуля похідну функції правдоподібності по параметру T_o отримуємо алгоритм його оцінки у вигляді трансцендентного рівняння

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

що розв'язується методом табуляції чи ітерацій. Для вузьких вікон ($T_o > (5-10) \Delta T$) алгоритм оцінки T_o аналогічний (7) із заміною позначень \hat{A} на \hat{T}_o і Δ на ΔT .

Імітаційне моделювання роботи алгоритмів оцінки параметрів густин розподілів за зрізаними гістограмами пуасонових відліків дало систематичні похибки не більше, ніж 5 %.

Частотні і часові характеристики імпульсів АЕ вимірюють відомими методами [12,14], правда, зсув частотного спектру у низькочастотну ділянку свідчить про наближення критичної точки руйнування [4].

The methods of selection and processing acoustic emission signal for estimation of the construction materials characters is considered.

Література

1. Бунина Н.А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии.- Л., 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,1989. с. 138-142.
3. Буйло С.И. Об интерпретации максимумов и достоверности оценки вида амплитудного распределения АЭ // Техн. диагностика и неразруш. контроль. - 1995.- N 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 неразрушающий контроль .- 1993.- N 1.- с.75-84.
5. Неразрушающий контроль. Кн.2. Акустические методы контроля: Практическое пособие / И.Н.Ермолов,Н.П.Алешин, А.И.Потапов.- М.: Высшая школа, 1991.- 283 с.
6. Надолинный Б.А.,Тихий В.Г.,Санин Ф.П. Акустико-эмиссионный метод прогнозирования давления разрушения деталей из композиционного материала // Акустическая эмиссия материалов и конструкций.Ч.2. (1-я Всесоюзная конференция).- Ростов-на-Дону, 1989, с.101-105.
7. Лысак Н.Б., Скальский В.Р., Сергиенко О.Н. Определение водородной поврежденности сталей котельных труб импульсным прозвучиванием //Техн. диагностика и неразруш. контроль.- 1993.-N 3.- С. 58-65.
8. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / В.И. Артюхов, К.Б.Вакар, В.И. Макаров и др.- М.: Атомиздат,1980.- 216 с.
9. Муравин Г. Б., Симкин Я.В., Мерман А.И. Идентификация механизма разрушения материалов методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия.- 1989.-N 4.- С.8-15.
10. Бигус Г. А., Дорохова Е.Г. Идентификация источника АЭ на основе параметров распределения вероятности амплитуды сигнала АЭ / Техн. диагностика и неразрушающий контроль.- 1998.- N3.- С.25-31.
11. Петерсен Т.Б. Разработка и использование автоматической системы классификации для идентификации сигналов акустической эмиссии /Техн. диагностика и неразрушающий контроль.- 1993.- N 3. - С.3-9.
12. Вакар К.Б. Приборы и информационные системы регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии материалов и конструкций. Ч.1 (1-я Всесоюзная конференция).- Ростов-на-Дону, 1989, с.108-114.

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

13. Патент 2419, Україна, МКВ G01N29/14. Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів / Андрейків О.І., Скальський В.Р., Лисак М.В. - Опубл. 26.12.94. Бюл. N 5-1.
14. Скальський В.Р. Прибор для регистрации сигналов акустической эмиссии СВР-4 // Техн. диагностика и неразрушающий контроль.- 1995. - N1. -С. 71-79.
15. Акустико-эмиссионная система диагностики состояния ответственных металлоизделий / В.В.Шип, Г.А.Бигус, Е.Г.Дорохова и др. //Техн. диагностика и неразрушающий контроль.- 1997 .-N 3. с..56-59.
16. Бухало О.П. Подавление непрерывных помех в каналах передачи стохастических импульсных сигналов // Метрология.- 1990. N 6.-С.11-19.
17. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных .-М.: Мир,1989.- 540 с.
18. 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. Ч.1 (1-я Всесоюзная конференция).- Ростов- на –Дону, 1989, с.169-180.
19. Манюхин А.И., Маслов И.И., Белов А.В. Энергетический анализ природы сигналов акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Ч.1 (1-я Всесоюзная конференция).- Ростов-на-Дону, 1989, с.154-161.
20. Буйло С.И. Использование статистических моделей для количественной оценки искажений амплитудных распределений сигналов акустической эмиссии и повышения достоверности АЭ метода //Дефектоскопия.- 1996.- №5.- С.26-34.

Одержано 08.02.2000 р.