

Акустические приборы и системы

УДК 519.22:681.2.08

О.В. Гармаш, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03057, Україна.

Модель та імовірнісні характеристики сигналів акустичної емісії

На основі фізики виникнення сигналів акустичної емісії (АЕ) запропонована модель у вигляді суміші неперервної та дискретної акустичної емісії. Досліджені основні імовірнісні характеристики дискретної, неперервної акустичної емісії та їх суміші. Показана інформативність кумулянт, кумулянтних коефіцієнтів для задачі підвищення достовірності виявлення сигналів дискретної акустичної емісії на фоні неперервної. Досліджені закони розподілу наведених сигналів, встановлено, що для аналізу законів розподілу запропонованої моделі доцільно використовувати характеристичні функції, параметрами якої є пуассонівські спектральні функції. Бібл. 11, рис. 1, табл. 2.

Ключові слова: акустична емісія; імовірнісні характеристики; кумулянти; кумулянтні коефіцієнти; закон розподілу.

Вступ

Пасивні методи неруйнівного контролю, до яких відноситься метод акустичної емісії, широко використовується для надійної експлуатації різних технічних систем та об'єктів. Основними причинами виникнення акустичної емісії являються пластична деформація та розвиток тріщин, які виникають внаслідок термодинамічних, гідродинамічних та інших фізичних явищ.

Аналіз відомих методів та систем акустико-емісійної діагностики та контролю [1] показав, що в їх основі лежить вимірювання диференціальних параметрів сигналів акустичної емісії (тривалість, амплітуда, кількість імпульсів і т.п.). Основним недоліком використання диференціальних параметрів є застосування порогових пристроїв, що знижує чутливість та достовірність акустико-емісійної діагностики.

Для підвищення чутливості та достовірності акустико-емісійної діагностики доцільним є використання інтегральних параметрів сигналів акустичної емісії. У зв'язку з чим, метою роботи є вибір моделі сигналу акустичної емісії, яка враховувала їх фізику виникнення, та дослідження найбільш інформативних імовірнісних характеристик.

Модель сигналів акустичної емісії

Явище акустичної емісії [1-4] пов'язане з генерацією та розповсюдженням пружних хвиль в твердих тілах, та являються наслідком локальної динамічної перебудови їх структури, яка здійснюється на мікро- та макрорівнях.

З аналізу фізики виникнення сигналів акустичної емісії (АЕ)[1-4] випливає, що розвиток тріщин супроводжується пластичною деформацією, тобто дискретна акустична емісія з'являється на фоні неперервної, тому приймемо загальну модель сигналу акустичної емісії в наступному вигляді:

$$\xi(t) = \xi_n(t) + \xi_d(t), \quad (1)$$

де індексами «н» та «д» позначені сигнали неперервної та дискретної акустичної емісії, відповідно. Слід відмітити, що на сьогоднішній день при дослідженні акустичної емісії обмежуються, як правило, аналізом тільки дискретної складової виразу (1) та не враховується вплив неперервної складової.

Дискретна акустична емісія виникає незалежно від неперервної, тому складові моделі (1) є незалежними випадковими процесами. Дотримуючись робіт [2, 3] розглянемо задачу в рамках стаціонарної моделі.

Модель сигналів $\xi_n(t)$ та $\xi_d(t)$ обґрунтована в роботі [5] та має вигляд

$$\begin{aligned} \xi_n(t) &= \sum_{k=1}^{v_n(t)} \eta_{kn} h_n(t - t_k), \\ \xi_d(t) &= \sum_{k=1}^{v_d(t)} \eta_{kd} h_d(t - t_k), \end{aligned} \quad (2)$$

де $v_n(t)$, $v_d(t)$ – однорідні процеси Пуассона з параметрами розподілу λ_n та λ_d , відповідно; t_k – момент появи імпульсів; $h_n(t)$, $h_d(t)$ – форми елементарного імпульсу; амплітуди імпульсів η_{kn} , η_{kd} є взаємно незалежними однаково розподіленими випадковими величинами, що не залежать від t_k .

Конкретизуємо параметри моделей (2). Дотримуючись відомих робіт [1, 5] будемо вважати, що форма елементарних імпульсів у неперервної та дискретної емісії однакова і різниться лише параметрами, тоді прийемо для опису форми імпульсів наступну модель [1]:

$$h(t) = (t / \tau_0)^{b-1} e^{-t/\tau_0} E(t), \quad (3)$$

де $b > 0$ – параметр форми імпульсу; τ_0 – ефективна тривалість імпульсу.

Параметр форми b визначається властивостями середовища і характеризує зміну форми імпульсу при його поширенні. Значення $b = 1$ відповідає імпульсу поблизу джерела виникнення акустичного імпульсу, значення $b > 1$ – імпульсу віддаленого від джерела випромінювання [1].

Згідно роботи [6] при неперервній емісії величина τ_0 лежить в діапазоні $5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ с, а при дискретній емісії, викликаній утворенням мікротріщини в металі – належить діапазону $10^{-3} \dots 10^{-2}$ с. Випадкові величини $\eta_{кн}$ та $\eta_{кд}$ моделей (2), визначаються своїми законами розподілу, які можуть бути різними для неперервної та дискретної емісії. Згідно з результатами роботи [1], закон розподілу випадкових амплітуд є показниковим з різними параметрами розподілу β_n та β_d , які в свою чергу обернено пропорційні середнім значенням амплітуд імпульсів. Крім того, при дискретній емісії спостерігається [1, 3] збільшення амплітуд $\eta_{кн}$. В роботі [1] для сталі ОХ18Н10Т наведені значення амплітуд сигналів неперервної і дискретної акустичної емісії, які, відповідно, приймають значення з діапазонів: 50...160 мкВ, 80...5000 мкВ, тобто амплітуди відрізняються не менше ніж на порядок.

Аналіз законів розподілу [7] сигналів з формою імпульсів (3) показав, що при $\lambda \tau_0 < 1$ закон розподілу може істотно відрізнитися від гаусівського, особливо при малих значеннях параметра b . При $\lambda \tau_0 > 1$ відбувається нормалізація процесу, що не суперечить відомому факту [8, 9] про те, що при $\lambda \tau_0 \rightarrow \infty$ пуассонівські імпульсні процеси нормалізуються. Ефект нормалізації пояснюється [8] тим, що при збільшенні $\lambda \tau_0$ відбувається перекриття великої кількості елементарних імпульсів.

В роботі [7] показано, що закон розподілу процесу з формою імпульсів (3) може лише приблизно вважатися гаусівським при одночасному виконанні наступних умов 1) $b \gg 1$; 2) $\lambda \tau_0 \gg 1$.

Виходячи з вищезазначеного, можна стверджувати, що для неперервної акустичної емісії параметр $\lambda_n \tau_{0н} \gg 1$, а для дискретної акустичної емісії $\lambda_d \tau_{0д} < 1$.

Імовірнісні характеристики сигналів акустичної емісії

Проаналізуємо імовірнісні характеристики сигналів акустичної емісії - кумулянти і закони розподілу. Відомо [9], що характеристична функція і первинна функція кумулянт можуть бути представлені у вигляді

$$f_\xi(u) = \exp \left[\sum_{s=1}^{\infty} \frac{\kappa_s}{s!} (iu)^s \right],$$

$$\phi_\xi(u) = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\kappa_s}{s!} (iu)^s,$$

де $i = \sqrt{-1}$; $\phi_\xi(u) = \ln f_\xi(u)$.

Так як сигнали неперервної і дискретної емісії незалежні, то кумулянти κ_s процесу (1) пов'язані з кумулянтами окремих складових формулою $\kappa_s = \kappa_{сд} + \kappa_{сн}$.

В роботі [7] отримано вираз для знаходження кумулянт пуассонівських імпульсних процесів з формою імпульсів (3):

$$\kappa_s = \kappa_{сн} \tau_0 \Gamma(sb - s + 1) / s^{sb-s+1}, \quad (4)$$

де $\kappa_{сн} = \lambda \alpha_s$, α_s – s -і початкові моменти амплітуд η_k , $\alpha_s = \mathbf{M}\{\eta_k^s\}$; $\Gamma(x)$ – гама-функція.

Очевидно, що формула (4) для сигналів неперервної і дискретної акустичної емісії будуть відрізнятися тільки множником $\kappa_{сн} \tau_0$, який містить інформацію про відповідні складові процесу (1). Визначимо співвідношення сигнал/перешкода в такий спосіб:

$$C/P = \frac{\sqrt{\kappa_2[\xi_d(t)]}}{\sqrt{\kappa_2[\xi_n(t)]}} = \frac{\sqrt{\kappa_2[\eta_{кд}] \tau_{0д}}}{\sqrt{\kappa_2[\eta_{кн}] \tau_{0н}}}.$$

З урахуванням показникового закону розподілу випадкових амплітуд $\eta_{кн}$ та $\eta_{кд}$ з параметрами β_n і β_d , відповідно, останній вираз прийме вигляд

$$C/P = (\beta_n / \beta_d) \sqrt{\lambda_d \tau_{0д} / (\lambda_n \tau_{0н})}. \quad (5)$$

В табл. 1 наведені числові значення кумулянт $\kappa_s, s = \overline{1,6}$, для неперервної, дискретної акустичної емісії та їх суміші в залежності від

співвідношення сигнал/перешкода, в відносних одиницях (при $\lambda_d \tau_{0d} = 0,1$ та $\lambda_n \tau_{0n} = 10$).

Таблиця 1. Кумулянти сигналів АЕ в залежності від С/П при $b = 1$

Вид сигналу		κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6
Неперервна АЕ		10	10	20	60	240	$1,2 \cdot 10^3$
С/П=0,1	Дискр. АЕ	0,1	0,1	0,2	0,6	2,4	12
	Суміш	10,1	10,1	20,2	60,6	242,4	$1,212 \cdot 10^3$
С/П=1	Дискр. АЕ	1	10	200	$6 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$
	Суміш	11	20	220	$6,06 \cdot 10^3$	$2,402 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$
С/П=5	Дискр. АЕ	5	250	$2,5 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^8$	$1,875 \cdot 10^{11}$
	Суміш	15	260	$2,502 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^8$	$1,875 \cdot 10^{11}$

У практичних задачах часто зручно оперувати безрозмірними кумулятивними коефіцієнтами γ_s , які з урахуванням формули (3) рівні [7]

$$\gamma_s = \gamma_s[\eta] \tau_0^{1-s/2} \frac{22^{s(2b-1)} \Gamma(sb-s+1)}{s^{sb-s+1} [\Gamma(2b-1)]^{\frac{s}{2}}}. \quad (6)$$

В табл. 2 наведені числові значення кумулянтних коефіцієнтів сигналів неперервної, дискретної акустичної емісії та їх суміші, в залежності від співвідношення С/П (при $\lambda_d \tau_{0d} = 0,1$ та $\lambda_n \tau_{0n} = 10$).

Таблиця 2. Значення кумулянтних коефіцієнтів сигналів АЕ в залежності від С/П

Вид сигналу ($b = 1$)		γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
Неперервна АЕ		0,632	0,6	0,759	1,2
Дискретна АЕ		6,325	60	758,947	$1,2 \cdot 10^4$
Суміш	С/П=0,1	0,629	0,594	0,748	1,176
	С/П=1	2,46	15,15	134,298	$1,5 \cdot 10^3$
	С/П=5	5,968	55,474	688,063	$1,067 \cdot 10^4$

На відміну від кумулянт, кумулянтні коефіцієнти не мають властивість адитивності, однак, як випливає з аналізу результатів табл. 2, при $C/P \rightarrow \infty$ значення кумулянтних коефіцієнтів суміші наближаються до значень відповідних кумулянтних коефіцієнтів дискретної акустичної емісії.

Як відомо [10], щільність імовірностей суми двох незалежних стаціонарних випадкових процесів, в даному випадку моделі (1), являє собою згортку щільності імовірностей складових, тобто $p_\xi(x) = p_n(x) \otimes p_d(x)$.

Характеристична функція моделі (1) для незалежних процесів $\xi_n(t)$, $\xi_d(t)$ виражається через добуток характеристичних функцій складових, тобто

$$f_\xi(u) = f_n(u) \cdot f_d(u). \quad (7)$$

З урахуванням виразу (7) первинна функція кумулянт процесу (1) має вигляд

$$\phi_\xi(u) = \ln f_n(u) + \ln f_d(u) = \phi_n(u) + \phi_d(u). \quad (8)$$

Наведені вище співвідношення справедливі для стаціонарних випадкових процесів з довільним законом розподілом. Для безмежно подільних випадкових процесів первинна функція кумулянт (8) дорівнює

$$\phi_\xi(u) = ium_\xi + \int_{-\infty}^{\infty} (e^{iux} - 1 - iux) \frac{dK_\xi(x)}{x^2},$$

де m_ξ , $K_\xi(x)$ - математичне сподівання та пуассонівська спектральна функція процесу (1).

З останнього виразу і формули (8) випливає, що пуассонівська спектральна функція процесу (1) має властивість адитивності, тобто

$$K_\xi(x) = K_n(x) + K_d(x). \quad (9)$$

Функція (3), яка описує форму імпульсів, є неперервною функцією, і як наслідок, всі пуассонівські спектральні функції, що входять в формулу (9) є неперервними функціями. В цьому випадку процес (1) задається пуассонівською спектральною щільністю, яка дорівнює

$$k_\xi(x) = K_\xi'(x) = k_n(x) + k_d(x). \quad (10)$$

Конкретизуємо пуассонівські спектральні щільності сигналів акустичної емісії, що входять в формулу (10).

Зупинимось на експоненціальній формі імпульсів моделі (3), тобто $b = 1$. Пуассонівська спектральна щільність, згідно [11] дорівнює

$$k_\xi(x) = \lambda \tau_0 x \exp\{-\beta x / A\} E(x). \quad (11)$$

Таким чином, складові пуассонівської спектральної щільності (10) моделі (1) з урахуванням виразу (11), дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} k_{\xi_n}(x) &= \lambda_n \tau_{0n} x \exp\{-\beta_n x / A_n\} E(x) \\ k_{\xi_d}(x) &= \lambda_d \tau_{0d} x \exp\{-\beta_d x / A_d\} E(x) \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 1 наведені графіки нормованих пуассонівських спектральних щільностей суміші неперервної і дискретної акустичної емісії для різних співвідношень С/П.

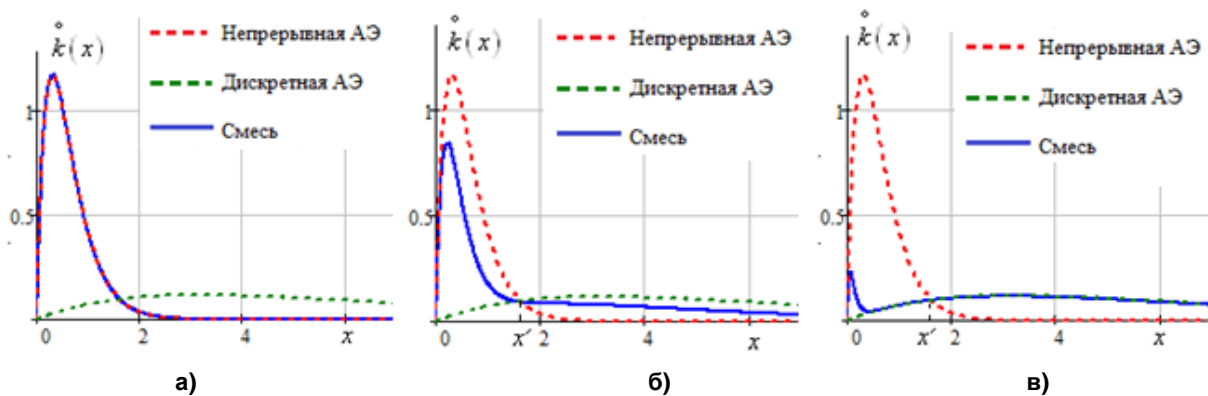


Рис. 1. Нормовані пуассонівським спектральні щільності сигналів акустичної емісії при С/П=0,1 (а), С/П=1 (б), С/П=5 (в)

Висновки

Запропонована модель сигналів акустичної емісії, яка враховує фізику виникнення корисного сигналу (дискретна АЕ) на тлі перешкоди (неперервна АЕ).

Аналіз отриманих результатів показав, що кумулянти і кумулянтні коефіцієнти відповідного порядку для дискретної АЕ, неперервної АЕ і їх адитивної суміші відрізняються в рази і більше, і можуть бути використані як нові інформативні характеристики виявлення дискретної АЕ на тлі неперервної.

Результати дослідження законів розподілу сигналів АЕ показали доцільність застосування апарату характеристичних функцій, в рамках пуассонівських спектральних щільностей. З графіків видно, що пуассонівська спектральна щільність суміші стає двовершинною, що дозволяє безпосередньо за графіком нормованої пуассонівської спектральної щільності суміші виявляти корисний сигнал дискретної акустичної емісії на тлі перешкоди.

Отримані результати кумулянтного аналізу і аналізу законів розподілу дозволяють підвищити імовірність виявлення дискретної акустичної емісії.

Список використаних джерел

1. *Неразрушающий контроль*: справочник: в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн.

- Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.
2. *Буйло С.И.* Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федеральн. ун-та, 2008. – 192 с.
3. *Дробот Ю. Б., Лазарев А. М.* Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
4. *Назарчук З. Т.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник: у 3 т. – Т.1: Теоретичні основи методу акустичної емісії. – К.: Наукова думка, 2009. – 287 с.
5. *Чан Хью Дат.* Исследование вероятностных характеристик акустических флуктуационных сигналов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: спец. 01.04.06 "Акустика" / Национальный технический ун-т Украины. – К., 1999. – 176 с.
6. *Красновский Р. О., Чернопыжский М. В.* Современные методы и средства измерения акустической эмиссии: Обзорн. информ. – М.: ВНИИКИ, 1987. – 64 с.

7. *Горовецкая Т. А., Красильников А. И.* Кумулянтный анализ 1/f шума // *Электроника и связь*. – 2007. – № 6 (41). – С. 5–18.
8. *Рытов С. М.* Введение в статистическую радиофизику. Часть I. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976. – 496 с.
9. *Малахов А. Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
10. *Гнеденко Б. В.* Курс теории вероятностей: учебник. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 448 с.
11. *Горовецкая Т. А., Красильников А. И., Тимофеенко Б. В.* Вероятностные характеристики кавитационного шума // *Электроника и связь*. – 2001. – № 11. – С. 91–94.

Поступила в редакцию 29 июля 2016 г.

УДК 519.22:681.2.08

О.В. Гармаш, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
проспект Победы, 37, г. Киев, 03057, Украина.

Модель и вероятностные характеристики сигналов акустической эмиссии

На основе физики возникновения сигналов акустической эмиссии предложена модель в виде смеси непрерывной и дискретной акустической эмиссии. Исследованы основные вероятностные характеристики дискретной, непрерывной акустической эмиссии и их смеси. Показана информативность кумулянт, кумулянтных коэффициентов для решения задачи повышения достоверности обнаружения сигналов дискретной акустической эмиссии на фоне непрерывной. Исследованы законы распределения указанных сигналов, установлено, что для анализа законов распределения предложенной модели целесообразно использовать характеристические функции, параметрами которых являются пуассоновские спектральные функции. Библ. 11, рис. 1, табл. 2.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; кумулянты, кумулянтные коэффициенты, закон распределения.

UDC 519.22:681.2.08

O. Harmash, Ph.D.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The model and the probabilistic characteristics of acoustic emission signals

Based on the physics of acoustic emission signals, a model in the form of a composition of continuous and discrete acoustic emission. The basic characteristics of probabilistic discrete, continuous acoustic emission, and composition thereof. It is shown that the information content of cumulant, cumulant coefficients for solving the problem of increasing the reliability of the detection signal of the discrete acoustic emission in the background continuously. Studied the laws of the distribution of these signals, found that for the analysis of the laws of distribution of the proposed model it is advisable to use the characteristic function, the parameters of which are Poisson spectral functions. Ref. 11, Fig. 1, Tab. 2.

Keywords: acoustic emission; cumulants, cumulant coefficients, distribution law.

Reference

1. *Klyuev, V. V., Ivanov, V. I., Vlasov, I. E., Balitchi, F. Y., Barkov, A. V., Barkov, N. A., etc.* (2006). Non-destructive testing: reference. Acoustic emission method. B. 2Vibrodiagnostics. 2nd ed. Engineering, P. 829 p. (Rus)

2. *Buylo, S. I.* (2008). Physical-mechanical and statistical aspects of improving the reliability of the results of acoustic emission monitoring and diagnostics. Rostov-on-Don: Publishing House of the South feder-General. University Press, P. 192. (Rus)
3. *Drobot, Y. B., Lazarev, A. M.* (1987). Non-destructive testing of fatigue crack acoustic emission method. - M.: Publishing House of Standards, P. 128. (Rus)
4. *Nazarchuk, Z. T.* (2009). Acoustic emisiyne diagnostuvannya elementiv konstruktsiy Naukova-tehnichny posi-bnik: from 3 tons. Volume 1.: Teoretichni basis of the method akustichnoi emisii. Naukova Dumka, P. 287. (Rus)
5. *Chan Huu Dat.* (1999). Investigation of probability characteristics of acoustic fluctuation signals: dis. ... PhD: spec. 01.04.06 "Acoustics" / National Technical University of Ukraine. P. 176. (Rus)
6. *Krasnovskii, R. O., Chernopyzhsky, M. V.* (1987). Modern methods and means of measuring the acoustic emission: Panoramic. Inf. VNIKI, P. 64. (Rus)
7. *Gorovetskaya, T. A., Krasilnikov, A. I.* (2007). Cumulant analysis of 1/f noise. Electronics and Communications. No. 6 (41). Pp. 5-18. (Rus)
8. *Ritov, S. M.* (1976). Introduction to Statistical Radiophysics. Part I. Random processes. P. 496. (Rus)
9. *Malakhov, A. N.* (1978). Cumulant analysis of non-Gaussian random processes and their transformations. P. 376. (Rus)
10. *Gnedenko, B. V.* (2005). Course of probability theory: a textbook. - 8th ed. and ext. Editorial URSS, P. 448. (Rus)
11. *Gorovetskaya, T. A., Krasilnikov, A. I., Timofeenko, B. V.* (2001). Probabilistic characteristics Kavitational noise. Electronics and Communications. No. 11. Pp. 91-94. (Rus)