

## КОНСТРУКТИВНЫЕ МОДЕЛИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ

**А. И. КРАСИЛЬНИКОВ.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев*

Рассмотрена модель формирования акустико-эмиссионных сигналов. Обоснована целесообразность описания сигналов непрерывной и дискретной акустической эмиссии моделями пуассоновских импульсных процессов, которые отражают физику возникновения этих сигналов. Использование вероятностных характеристик пуассоновских импульсных процессов в качестве диагностических параметров может расширить возможности акустико-эмиссионных систем диагностики

### **ВВЕДЕНИЕ**

При диагностировании различных технических объектов в процессе их эксплуатации важную роль играют акустико-эмиссионные системы диагностики, основанные на измерении и анализе вероятностных характеристик сигналов акустической эмиссии. Информативность вероятностных характеристик акустико-эмиссионных сигналов базируется на их математических моделях и определяет состав диагностических параметров, от которых зависит чувствительность и достоверность средств технического диагностирования.

Математические модели акустико-эмиссионных сигналов должны удовлетворять двум основным требованиям. Во-первых, они должны отражать наиболее существенные стороны исследуемых физических процессов. Во-вторых, для практического применения модели необходим хорошо разработанный математический аппарат ее исследования, позволяющий находить различные вероятностные характеристики сигналов акустической эмиссии.

С физической точки зрения различают [1–4] непрерывную акустическую эмиссию, которая появляется в объекте контроля вследствие пластической деформации, и дискретную эмиссию, которая на первом этапе является результатом возникновения микротрещин в отдельных точках материала объекта, а на втором – образованием и развитием в некоторых локальных областях более крупных трещин.

Следует отметить, однако, что применяемые в настоящее время математические модели акустико-эмиссионных сигналов [1, 2, 5–8], во-первых, недостаточно обоснованы, во-вторых, как правило, не отражают факт одновременного протекания процессов непрерывной и дискретной акустической эмиссии и, наконец, обычно не учитывают нестационарный характер образования и развития трещин.

Целью данной работы является систематизация конструктивных моделей акустико-эмиссионных сигналов, базирующихся на физике их возникновения.

### **1. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ**

Акустическая эмиссия представляет собой процесс генерации и распространения упругих волн напряжения в твердых телах, вызванных локальной динамической перестройкой их структуры под действием напряжений, создаваемых внешней нагрузкой. Источники акустической эмиссии являются точечными и излучают единичные импульсы.

Непрерывная акустическая эмиссия возникает при пластической деформации и является результатом динамической перестройки структуры материала на микроскопическом уровне. При этом различные металлы и сплавы излучают большое число единичных импульсов малой амплитуды. Акустико-эмиссионные сигналы такого типа регистрируются как непрерывный процесс, а его реализации схожи с реализациями теплового шума электронных приборов.

Дискретная акустическая эмиссия при пластической деформации является результатом образования микротрещин в некоторых точках объекта. При превышении предела текучести материала дискретная акустическая эмиссия обусловлена образованием, развитием и распространением трещин в локальных областях объекта и характеризует начальный этап разрушения. В этом случае трещины развиваются неравномерно, каждый скачок трещины порождает импульс большой амплитуды. Акустико-эмиссионный сигнал при развитии трещины является нестационарным случайным импульсным потоком.

Исходные импульсы акустической эмиссии при распространении по акустико-электронному каналу, включающему контролируемый объект и электроакустический преобразователь, могут существенно видоизменяться. В частности, амплитуды импульсов уменьшаются из-за расходимости волн, поглощения, рассеивания и дифракции, а форма импульсов изменяется из-за дисперсии скорости звука и затухания. При взаимодействии с поверхностью объекта излученные волны отражаются и трансформируются, а при распространении по стенке объекта контроля акустические волны претерпевают многократные отражения.

Акустико-эмиссионный сигнал на выходе электроакустического преобразователя может искажаться акустическими и электрическими помехами. Акустические помехи обусловлены соударениями и трением подвижных частей нагружающего устройства и самого объекта, а также трансформацией различных воздействий на объект в акустические волны. Электрические помехи определяются собственными шумами электроакустического тракта и внешними электромагнитными полями.

Для построения моделей акустико-эмиссионного сигнала на выходе электроакустического преобразователя сделаем следующие предположения.

1. Объектом контроля является поликристаллическое тело из однородного материала простой геометрической формы.
2. Скорость изменения внешней нагрузки  $F(t)$  значительно меньше скорости звука в материале объекта.
3. Процессы дефектообразования считаем простыми в виде пластической деформации, образовании микротрещин и скачкообразного роста усталостной трещины.
4. Акустический тракт среды обладает линейными свойствами, отражение от границ объекта и трансформация типов волн отсутствует.
5. Электроакустический преобразователь осуществляет линейное преобразование и не искажает поле смещений поверхности объекта.
6. Акустические и электрические помехи отсутствуют.

При сформулированных предположениях 1-6 общая модель акустико-эмиссионного сигнала на выходе электроакустического преобразователя имеет следующий вид:

$$\xi(t) = \mathbf{A}_{\text{ЭАП}} \left\{ \mathbf{A}_{\text{СП}} \left[ \xi_{\text{Н}}(t) + \xi_{\text{Д}}(t) \right] \right\} = \mathbf{A}_{\text{СП}} \left\{ \xi_{\text{Н}}(t) \right\} + \mathbf{A}_{\text{СП}} \left\{ \xi_{\text{Д}}(t) \right\}, \quad (1)$$

где  $\xi_H(t)$  и  $\xi_D(t)$  – сигналы непрерывной и дискретной акустической эмиссии соответственно;  $\mathbf{A}_{ЭАП}$ ,  $\mathbf{A}_{СР}$  – линейные операторы, описывающие электроакустический преобразователь и среду;  $\mathbf{A}_{СП}$  – произведение этих операторов, описывающее акустико-электронный канал источник акустической эмиссии – выход преобразователя.

## 2. СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Для упрощения задачи в дальнейшем будем считать, что электроакустический тракт не вносит искажений, т. е.  $\mathbf{A}_{СП}=1$ . Тогда модель (1) акустико-эмиссионного сигнала примет следующий вид:

$$\xi(t) = \xi_H(t) + \xi_D(t).$$

**Непрерывная эмиссия.** Пусть внешняя нагрузка  $F(t)$ ,  $t \geq 0$ , не превышает значение  $F_T$ , соответствующее пределу текучести исследуемого материала. Тогда вследствие пластической деформации в контролируемом объекте возникает непрерывная эмиссия, источниками которой являются движение дислокаций, двойникование и бездиффузионные фазовые переходы в объеме  $V$  исследуемого объекта.

Сделаем следующие предположения.

- Н1. Акты акустической эмиссии происходят в некоторых точках  $r_k \in V$  контролируемого объекта, которые образуют однородное изотропное пуассоновское поле событий с параметром  $\lambda_H$ .
- Н2. Каждый акт акустической эмиссии формирует в точке  $r_k$  единичный импульс.
- Н3. Форма всех единичных импульсов одинакова и описывается неслучайной функцией  $h_H(t)$ ,  $h_H(t) = 0$  при  $t < 0$ .
- Н4. Амплитуды  $\eta_{kH}$  единичных импульсов являются взаимно независимыми одинаково распределенными случайными величинами, которые не зависят от пространственного распределения точек  $r_k$ .
- Н5. Сигнал непрерывной акустической эмиссии  $\xi_H(t)$  в точке приема в момент времени  $t$  является результатом наложения случайного числа  $\nu_H(t)$  единичных импульсов, возникших в течение интервала времени  $[0, t]$ .

На основании предположений Н.1–Н.5 сигнал непрерывной акустической эмиссии является стационарным случайным процессом и в точке приема опишется моделью:

$$\xi_H(t) = \sum_{k=1}^{\nu_H(t)} \eta_{kH} h_H(t - t_k), \quad (2)$$

где  $\nu_H(t)$  – однородный процесс Пуассона с параметром распределения  $\lambda_H$ ;  $t_k = r_k / c$  – время распространения импульса;  $r_k$  – расстояние от места возникновения импульса до приемника;  $c$  – скорость звука в исследуемом объекте.

**Дискретная эмиссия.** Пусть внешняя нагрузка  $F(t)$  превышает значение  $F_T$ , соответствующее пределу текучести исследуемого материала. Тогда в материале объекта происходит процесс трещинообразования, который состоит из двух стадий – стационарной и ускоренной.

Стационарна стадія представляє собою виникнення мікротрещин в окремих точках, випадковим чином розположених в об'єкті. Ця стадія характеризується постійною середньою швидкістю виникнення мікротрещин і постійною середньою амплітудою імпульсів акустическої емісії. Акустико-емісійний сигнал на цій стадії являється стаціонарним випадковим процесом. Звернемо увагу, що стаціонарна стадія може присутувати і при пластическій деформації, т. є. коли значення зовнішньої навантаження  $F(t)$  не перевищує значення межі текучесності  $F_T$  досліджуваного матеріалу.

Прискоренна стадія пов'язана з утворенням і розвитком в деяких малих локальних областях більш крупних трещин. Ця стадія характеризується появою імпульсів акустическої емісії з великими амплітудами і зростанням активності акустическої емісії. Внаслідок цього акустико-емісійний сигнал на цій стадії являється нестационарним випадковим процесом.

Таким чином, загальна модель сигналу дискретної акустическої емісії має наступний вигляд:

$$\xi_d(t) = \xi_{d1}(t) + \xi_{d2}(t), \quad (3)$$

де  $\xi_{d1}(t)$  – сигнал дискретної акустическої емісії від виникаючих мікротрещин;  $\xi_{d2}(t)$  – сигнал дискретної акустическої емісії від розвиваючоїся трещини.

Конкретизуємо складові  $\xi_{d1}(t)$  і  $\xi_{d2}(t)$  в моделі (3) сигналів дискретної акустическої емісії.

Будемо вважати, що процес формування сигналу дискретної акустическої емісії від виникаючих мікротрещин відбувається аналогічно процесу формування сигналу неперервної акустическої емісії, і з деякими корекціями виконуються сформульовані вище передположення Н.1–Н.5.

Корекція цих передположень заключається в наступному. У сигналу дискретної акустическої емісії  $\xi_{d1}(t)$  форма елементарних імпульсів описується неслучайною функцією  $h_{d1}(t)$ , амплітуди імпульсів – випадкові величини  $\eta_{k1}$ , а число  $v_{d1}(t)$  імпульсів, виникаючих в інтервалі часу  $[0, t]$  – однорідний процес Пуассона з параметром розподілу  $\lambda_{d1} \ll \lambda_n$ .

Тоді сигнал дискретної акустическої емісії  $\xi_{d1}(t)$  в точці прийому опишеться моделлю

$$\xi_{d1}(t) = \sum_{k=1}^{v_{d1}(t)} \eta_{k1} h_{d1}(t - t_k). \quad (4)$$

При побудові математическої моделі сигналу дискретної акустическої емісії від розвиваючоїся трещини, будемо розглядати трещину, згідно [3], як об'ємний джерело акустическої емісії. Зробимо наступні передположення.

Д1. Під дією навантаження  $F(t) > F_T$  в досліджуваному об'єкті в деякому малим об'ємі  $\Delta V$ , розташованому на фіксованій відстані  $l_{TP}$  від приймача, починаючи з моменту часу  $t_0$ , розвивається втомова трещина.

Д2. Максимальний розмір  $\Delta l_{max}$  об'єму  $\Delta V$  задовольняє умову  $\Delta l_{max} \ll l_{TP}$ .

Д3. Розвиваючася трещина генерує в випадкові моменти часу  $t_k$  елементарні імпульси акустическої емісії.

Д4. Число  $v_{д2}(t)$  элементарных импульсов, возникших в течение интервала времени  $[t_0, t]$ , представляет собой неоднородный процесс Пуассона с параметром  $\Lambda_{д2}(t)$ , причем  $\mathbf{P}\{v_{д2}(t_0) = 0\} = 1$  и  $\Lambda_{д2}(t) = 0$  при  $t \leq t_0$ .

Д5. Форма элементарного импульса акустической эмиссии одинакова для каждого момента времени  $t_k$  и описывается неслучайной функцией  $h_{д2}(t)$ ,  $h_{д2}(t) = 0$  при  $t < 0$ , а амплитуды импульсов  $\eta_{k2}$  являются взаимно независимыми одинаково распределенными случайными величинами, которые не зависят от  $t_k$ .

Д6. Сигнал дискретной акустической эмиссии  $\xi_{д2}(t)$  в точке приема является результатом наложения случайного числа  $v_{д2}(t)$  импульсов, возникших в течение интервала времени  $[t_0, t]$ .

Из предположений Д.1–Д.6 следует, что сигнал дискретной акустической эмиссии  $\xi_{д2}(t)$  от развивающейся трещины в точке приема можно представить в следующем виде:

$$\xi_{д2}(t) = \sum_{k=1}^{v_{д2}(t-t_{TP})} \eta_{k2} h_{д2}(t - t_k - t_{TP}), \quad (5)$$

где  $t_{TP} = l_{TP} / c$  – время распространения сигнала дискретной акустической эмиссии от места возникновения трещины до приемника;  $c$  – скорость звука в исследуемом объекте.

Таким образом, акустико-эмиссионный сигнал на выходе электроакустического преобразователя при возникновении и развитии трещины содержит три составляющие – сигнал непрерывной акустической эмиссии и сигналы дискретной акустической эмиссии от возникающих микротрещин и от развивающейся трещины.

Остановимся на возможности получения Вероятностных характеристик акустико-эмиссионных сигналов. Модели сигналов акустической эмиссии (2), (4), (5) являются частными случаями пуассоновских импульсных случайных процессов [9]:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} h(t, t_k, \mathbf{\epsilon}_k), \quad t > 0, \quad (6)$$

где  $v(t)$  – неоднородный процесс Пуассона с математическим ожиданием  $\Lambda(t)$ , которое при  $t > 0$  не убывает и непрерывно, а при  $t \leq 0$  равно нулю;  $\mathbf{\epsilon}_k$  – последовательность независимых  $n$ -мерных одинаково распределенных случайных величин, не зависящих от  $t_k$ ;  $h(t, t_k, \mathbf{\epsilon}_k)$  – детерминированная функция, зависящая от случайных величин  $t_k$  и  $\mathbf{\epsilon}_k$ .

Вероятностные характеристики пуассоновских импульсных процессов достаточно хорошо исследованы. В частности, одномерные кумулянтные функции  $\kappa_s(t)$  и характеристическая функция  $f(u, t)$  процессов (6) определяются следующими выражениями [9]:

$$\kappa_s(t) = \int_0^{\infty} \lambda(\tau) \mathbf{M} [h^s(t, \tau, \mathbf{\epsilon})] d\tau, \quad (7)$$

$$f(u, t) = \exp \left\{ \int_0^{\infty} \lambda(\tau) \left[ \mathbf{M} \{ \exp [i u h(t, \tau, \mathbf{\epsilon})] \} - 1 \right] d\tau \right\}, \quad (8)$$

где  $\lambda(\tau) \geq 0$  – интенсивность процесса (6),  $\lambda(\tau) = \Lambda'(\tau)$ ;  $\mathbf{\epsilon}$  – случайный вектор с таким же распределением, как у  $\mathbf{\epsilon}_k$  в формуле (6);  $\mathbf{M}$  – оператор математического ожидания.

Распределение мгновенных значений пуассоновских импульсных процессов (6) является негауссовским, а их плотность вероятностей в большинстве случаев может быть получена только приближенными методами. Поэтому для точного анализа процессов (6) целесообразно применять кумулянтные функции (7) и характеристическую функцию (8).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке систем акустико-эмиссионной диагностики необходимо учитывать, что на выходе электроакустического преобразователя при возникновении и развитии трещины одновременно присутствует сигнал непрерывной акустической эмиссии и сигналы дискретной акустической эмиссии от возникающих микротрещин и от развивающейся трещины. Моделями этих сигналов, отражающими физику их возникновения, являются пуассоновские импульсные случайные процессы, распределение мгновенных значений которых является негауссовским. Использование в качестве информативных характеристик сигналов акустической эмиссии наряду с корреляционными и спектральными функциями кумулянтных функций, плотности вероятностей и характеристической функции позволит расширить возможности систем акустико-эмиссионной диагностики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Грешников В. А., Дробот Ю. Б.* Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.
2. *Трипалин А. С., Буйло С. И.* Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского гос. ун-та, 1986. – 160 с.
3. *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.*
4. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Науково-технічний посібник: У 3 т. – Т.1. Теоретичні основи методу акустичної емісії. – К.: Наук. думка, 2009. – 287 с.
5. *Баранов В. М.* О флуктуационном механизме акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 1985. – № 2. – С. 68–72.
6. *William J. H., Delonga D. M., Lee S. S.* Correlation of acoustic emission with fracture mechanics parameters in structural bridge steel during fatigue // Materials Evaluation. – 1992. – 40, № 11. – P. 56–68.
7. *Петерсен Т. Б., Ботвина Л. Р.* Статистическая модель генерации сигналов акустической эмиссии при росте усталостной трещины // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1993. – № 1. – С. 50–56.
8. *Буйло С. И.* Использование моделей статистической радиофизики для повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики предразрушающего состояния // Дефектоскопия. – 1995. – № 7. – С. 13–26.
9. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.