

УДК 519.876.5

М. В. Сагагов, доктор технических наук,

Р. М. Ирмухамедова, старший преподаватель,

М. М. Кадыров, старший преподаватель

Ташкентский государственный технический университет,

г. Ташкент, Узбекистан

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И АЛГОРИТМЫ ИНВЕРСНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Рассматриваются вопросы решения задачи восстановления входного сигнала с высокой скоростью с учетом некорректности задачи, методы моделирования первичного преобразователя и алгоритмы обработки сигналов акустической эмиссии

Ключевые слова: *акустическая эмиссия, сигналы, диагностика, дефекты, классификация, первичные преобразователи.*

Введение и постановка задачи. При обработке сигналов акустической эмиссии (АЭ) в системе контроля с целью исследования диагностических признаков сигналов, статистической обработки результатов измерений, оценки степени опасности различных дефектов конструкций должны обеспечиваться запись и долговременное хранение результатов измерения и полученных оценок общей активности АЭ, распределения роста активности по зонам изделия, амплитудного распределения, временных интегральных и спектральных характеристик сигналов. Информативным является распределение АЭ в изделии, позволяющее различать механизмы динамических явлений, оценить темп и масштаб накопления повреждений, отличать пластическую деформацию от трещин, отсутствие трещинообразования от скопления неметаллических включений с трещинами и т.д. [1].

Высокое качество регистрации сигналов АЭ обеспечивает возможность формирования диагностического портрета сигнала. Сюда следует включить координаты источника сигнала акустической эмиссии, а также порядковый номер и время регистрации сигнала. Полученные портреты сигналов используются для построения графиков, таблиц и гистограмм, т.е. могут быть использованы в качестве исходных данных при распознавании вида дефекта, являющегося источником сигналов.

Таким образом, при разработке систем контроля на основе метода акустической эмиссии исключительно важной является как можно более точная запись сигнала АЭ в компьютерной памяти. Разрешающая способность канала регистрации может быть существенно повышена, если сигнал, полученный на выходе первичного преобразователя, по-

зволяет путем обработки восстанавливать сигнал на входе датчика. Для решения такой обратной задачи необходимо располагать математической моделью преобразователя (тракта преобразования).

Типы первичных преобразователей сигналов акустической эмиссии. На сегодняшний день наиболее распространенными являются три типа первичных преобразователей АЭ: емкостные, магнито-стрикционные, пьезоэлектрические.

Емкостный преобразователь регистрирует изменение электрического потенциала между пластинами конденсатора, одна из которых это неподвижный диск (или пластина), другая — поверхность исследуемого объекта, который колеблется или проводит упругие волны. Преимущества — отсутствие резонансов в полосе частот до десятков мегагерц, простота определения чувствительности, которая сводится к измерению расстояния между пластинами, что обусловило применение емкостных преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) в прецизионных лабораторных исследованиях для изучения форм сигналов АЭ, определения энергетических характеристик исследуемых процессов, градуирования преобразователей других классов. Широкополосные ПАЭ целесообразно применять в исследованиях явлений АЭ, когда информативными параметрами электрических сигналов является их волновые отображения или спектральные характеристики. Именно в форме сигнала, который при обработке представляется своей огибающей, содержится значительная информация о параметрах исследуемых процессов. Поэтому АЭ-электрический канал должен передать форму сигнала с наименьшими искажениями. Хотя в случае применения широкополосных емкостных ПАЭ теряется чувствительность, зато хорошо передаются спектры частот сигналов акустической эмиссии (САЭ).

Преобразователь электромагнитного типа. Принцип действия такого преобразователя заключается в использовании магнито-стрикционного эффекта. Сравнительно редко его используют для регистрации АЭ-излучения, что предопределено конструкционной сложностью и низкой чувствительностью относительно пьезоэлектрических ПАЭ. Преимуществами таких ПАЭ является несложное согласование с металлическими изделиями, отсутствие механических резонансов, что значительно упрощает их градуирование и т.д.

Керамические пьезопреобразователи САЭ. Физическое содержание работы такого типа преобразователей — использование прямого пьезо-эффекта, т.е. явления возникновения электрического потенциала из разных сторон пьезоэлектрической пластины, которая деформируется. Пьезоэлектрические ПАЭ наиболее перспективны для использования в акустико-эмиссионной аппаратуре, что подтверждается высокими основными параметрами пьезопреобразователей.

Однако практическое использование этих 3-х типов преобразователей усложнено из-за громоздкости и сложности изготовления соответствующего оборудования.

Полимерные пьезопреобразователи. Пленочные ПАЭ имеют равномерную амплитудно-частотную характеристику в широком частотном диапазоне. Частотный спектр сигнала, который производит пьезопреобразователь под действием импульса возбуждения, отображает частотную характеристику самого преобразователя. Поэтому обычный узкополосный керамический пьезопреобразователь дает продленный сигнал, а широкополосный — сигнал, близкий к импульсу возбуждения. Контрольные и практическое использование испытания подтверждают перспективность использования таких пьезопреобразователей как приемников АЭ.

Тонкопленочные преобразователи при поперечной моде колебаний имеют независимую от частоты передаточную функцию в диапазоне частот 0-50 МГц. Отметим, что полосу высокочастотного резонанса можно эффективно регулировать изменением поперечных размеров тонкопленочного полимерного пьезопреобразователя.

По частотным характеристикам пьезопреобразователи разделяют на широкополосные, полосные и узкополосные (рис. 1). Широкополосные пьезопреобразователи имеют максимально возможную полосу пропускания сигналов АЭ. Полосные ПАЭ характерные тем, что их частотная полоса пропускания Δf приближенная к рабочей частоте: $\Delta f \approx f_p$. Узкополосным ПАЭ свойственно такое соотношение: $\Delta f / f_p \leq 10$ (Δf — полоса пропускания, которая определяется на уровне $0,7U_{\max}$; f_p — рабочая частота).

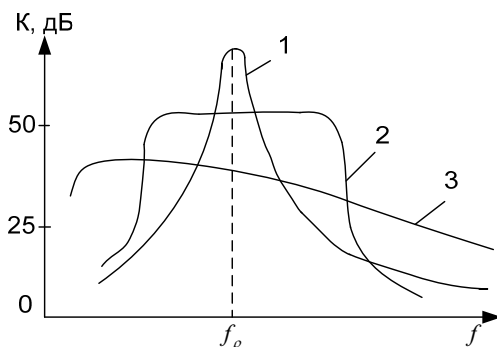


Рис. 1. Частотные характеристики разных типов преобразователей сигналов акустической эмиссии 1 — резонансный (узкополосный); 2 — полосной; 3 — широкополосный; f_p — резонансная частота узкополосного преобразователя сигналов акустической эмиссии

Узкополосные пьезопреобразователи широко применяют в экспериментальных исследованиях и промышленном контроле. Они имеют максимальную чувствительность на рабочей частоте, которую выбирают при условиях их практического использования.

Если основной целью АЭ-исследований является обнаружение момента возникновения дефекта или начала его развития, можно применять как узкополосные, так и полосные ПАЭ. Проходя сквозь такие пьезопреобразователи, сигнал искажается (поскольку он широкополосный) и появляются осцилляции. Поэтому достоверное определение формы сигнала АЭ усложняется. Однако полосные (или узкополосные) пьезопреобразователи по сравнению с широкополосными имеют высокую чувствительность, помехоустойчивость и в целом более пригодны для количественного оценивания динамических процессов, которые происходят в объекте исследований.

Характеристики ПАЭ. Эквивалентная электрическая схема пьезопреобразователя в форме узкого стержня или тонкой пластины с параметрами, изображена на рис. 2. Это схема шестиполюсника, две пары зажимов которого отвечают двум механически активным поверхностям, а третья — электрическим зажимам, с которых снимают электрический сигнал. В схеме есть электрический трансформатор для превращения механических колебаний в электрические с коэффициентом трансформации N , размерность которого н/в. Слева от трансформатора схематически изображены механические параметры: сила F , колебательная скорость v , механический импеданс Z , справа — электрические: напряжение u , ток I , емкость C_0 .

Если преобразователь закреплен на объекте так, что его вторая (механически активная) поверхность является свободной, то анализ упрощается, потому что усилия на этой поверхности отсутствуют и соответствующая механическая пара зажимов должна быть короткозамкнутой.

Математическая модель первичного преобразователя. Для описания первичного измерительного преобразователя, как динамической системы, необходимо применять соответствующий математический аппарат [1]. Будем рассматривать класс линейных и стационарных первичных преобразователей (датчиков). На этом основании в качестве математической модели первичного преобразователя можно принять обыкновенное линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами и соответствующими начальными условиями:

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i}{dt^i} y(t) = \sum b_i \frac{d^i}{dt^i} x(t), \quad n \geq m, \quad (1)$$

$$\frac{d^i}{dt^i} y(0) = 0, \quad i = 0 \dots n-1, \quad a_0 = 1,$$

где $x(t)$ — входной, $y(t)$ — выходной сигналы, t — время, a_i, b_j — постоянные.

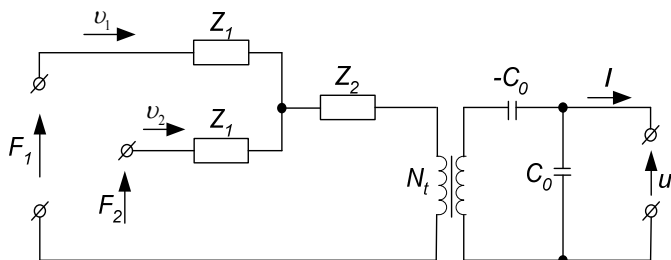


Рис. 2. Эквивалентная схема пьезопреобразователя сигналов акустической эмиссии

Представление математических моделей в виде эквивалентных интегральных уравнений во многих случаях повышает эффективность их компьютерной реализации. Представим дифференциальное уравнение (1) в области изображений по Лапласу:

$$\sum_{i=0}^n a_i p^i Y(p) = \sum b_i p^i X(p),$$

или

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i} p^{-i} Y(p) = \sum_{j=0}^m b_{n-j} p^{-j} X(p), \quad a_0 = 1, \quad b_j = 0, \quad \text{при } j > m. \quad (2)$$

Умножение изображения функции на p^{-1} соответствует операции ее интегрирования в области оригиналов, а умножение изображения функции на p^{-i} соответствует i -кратному интегрированию в области оригиналов. С другой стороны, произведению изображений двух функций соответствует их свертка в области оригиналов. В частности, изображению p^{-i} соответствует функция-оригинал $\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}$.

Таким образом, (2) можно представить в области оригиналов в виде:

$$\begin{aligned} \alpha_n y(t) + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{n-i}}{(i-1)!} \int_0^t (t-s)^{i-1} y(s) ds = \\ = b_n x(t) + \sum_{j=1}^m \frac{b_{n-j}}{(j-1)!} \int_0^t (t-s)^{j-1} x(s) ds, \quad \alpha_0 = 1, \quad b_j = 0, \quad \text{при } j > m. \end{aligned} \quad (3)$$

Дифференциальному уравнению (1) в области изображений соответствует понятие дробно-рациональной передаточной функции:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\sum_{j=0}^m b_j p^j}{\sum_{i=0}^n \alpha_i p^i}, \quad n \geq m. \quad (4)$$

Дробно-рациональную передаточную функцию (4) можно представить в виде суммы элементарных дробей [1], применив, например, метод неопределенных коэффициентов:

$$W(p) = k_1 + (1 - k_1) \left(\sum_{g=1}^r \sum_{\alpha=1}^{\mu g} \frac{k_{g,\alpha}}{(T_g p + 1)^\alpha} + \sum_{v=1}^u \frac{p k_{v,1} + k_{v,0}}{(T_{v,2} p^2 + T_{v,1} p + 1)} \right), \quad (5)$$

где $k_1, k_{g,\alpha}, k_{v,1}, k_{v,0}$ — вещественные коэффициенты; T_g — постоянные времени инерционных звеньев, $\sqrt{T_{v,2}}$ — периоды колебаний, $T_{v,1}$ — постоянные времени затухания колебательных звеньев ($T_g, T_{v,1}, T_{v,2}$ определяются корнями полинома знаменателя дробно-рациональной передаточной функции); r — число простых корней полинома; μg — кратность g -го корня, u — число комплексно-сопряженных корней полинома. Переходя в (5) от изображений к оригиналам, получим аналитическое выражение интегральной динамической модели в форме интегральной зависимости (оператор свертки) уравнения относительно выходного сигнала:

$$y(t) = k_1 x(t) + (1 - k_1) \int_0^t K(t-s) x(s) ds, \quad (6)$$

с ядром (весовой функцией) вида

$$K(t) = \sum_{g=1}^r \frac{1}{T_g} \exp\left(-\frac{t}{T_g}\right) \cdot \sum_{\alpha=1}^{\mu g} \frac{k_{g,\alpha}}{(\alpha-1)!} \left(\frac{t}{T_g}\right)^{\alpha-1} + \sum_{v=1}^u \frac{1}{T_{v,1}} \exp\left(-\frac{t}{T_{v,1}}\right) \cdot \left(k_{s,v} \sin\left(\frac{2\pi v t}{T_v}\right) + k_{c,v} \cos\left(\frac{2\pi v t}{T_v}\right) \right), \quad (7)$$

где $k_{s,v}, k_{c,v}, T_v = T_{0,2}^{1/2}$ аналитически связаны с $k_{v,1}, k_{v,0}, T_{v,1}, T_{v,2}$.

Процесс разложения дробно-рациональной функции на элементарные дроби включает в себя поиск корней полинома знаменателя для определения постоянных величин, составление и решение СЛАУ для определения весовых коэффициентов. Интегральная модель с весовой функцией вида (7) соответствует представлению линейной стационарной динамической системы комбинацией масштабных, инерционных, колебательных и др. звеньев. Из условия физической реализуемости сис-

темы $K(t-s) = 0$ при $s > t$ и состояния покоя до момента времени t_0 ($y(t) = 0$ при $t < t_0$) следует, что $k_1 = 0$. Параметры a_i, b_j дробно-рациональной передаточной функции $W(p)$ (4) соответствуют параметрам аналитического выражения весовой функции $K(t)$.

Акустические датчики являются динамическими системами с колебательными звеньями. Поэтому, с учетом $k_1 = 0$ весовая функция интегральной динамической модели акустического датчика имеет вид [4]:

$$K(t) = \sum_{g=1}^u \frac{1}{T_{g,1}} \exp\left(-\frac{t}{T_{g,1}}\right) \cdot \sum_{\beta=1}^{v_g} \left(\frac{t}{T_g}\right)^\beta \times \left[k_{s,g,\beta} \sin\left(\frac{2\pi vt}{T_g}\right) + k_{c,g,\beta} \cos\left(\frac{2\pi vt}{T_g}\right) \right]. \quad (8)$$

Для исследования акустических датчиков применяются упрощенные модели [1] в пределах допустимой погрешности. Например, для заданной переходной функции акустического датчика вида:

$$V(t) = A \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{g,1}}\right) \cos(\omega t + \varphi) \right), \quad (9)$$

где A — масштабный коэффициент, $T_{g,1}$ — постоянная времени затухания колебательного процесса, ω — угловая частота, φ — начальный сдвиг фазы, импульсная переходная (весовая) функция в модели (6) будет иметь вид:

$$K(t) \equiv V'(t) = A \exp\left(-\frac{t}{T_g}\right) \left(\frac{1}{T_g} \cos(\omega t + \varphi) + \omega \sin(\omega t + \varphi) \right). \quad (10)$$

Использование модели с ядром вида (10) позволяет исследовать колебательные системы без привлечения больших вычислительных ресурсов.

Для повышения устойчивости модели (6) при $k_1 = 0$ вводится малый регуляризирующий параметр α [1]. Тогда модель (6) будет иметь вид:

$$\alpha x(t) + \int_0^t K(t-s)x(s)ds = y(t). \quad (11)$$

Для удобства компьютерного моделирования представим (10) в дискретной форме (в виде решетчатой функции):

$$K(nh) \equiv A \exp\left(-n \frac{h}{T_g}\right) \left(\frac{1}{T_g} \cos(n\omega h + \varphi) + \omega \sin(n\omega h + \varphi) \right), \quad (12)$$

где h — шаг дискретизации независимой переменной. Воспользовавшись таблицей Z -преобразований [1], определяем Z -изображение модели (11) с учетом (12):

$$Y(z) = X(z) \cdot A \left(\frac{h}{T_g} \frac{z^2 \gamma^{-2} \cos \varphi - z \gamma^{-1} \cos(\beta - \varphi)}{z^2 \gamma^{-2} - 2z \gamma^{-1} \cos \beta + 1} + h\omega \frac{z^2 \gamma^{-2} \sin \varphi + z \gamma^{-1} \sin(\beta - \varphi)}{z^2 \gamma^{-2} - 2z \gamma^{-1} \cos \beta + 1} + \alpha \right), \quad (13)$$

где $\beta = \omega h$, $\gamma = \exp\left(-\frac{h}{T_g}\right)$.

После проведения алгебраических преобразований получаем разностную вычислительную схему моделирования колебательной системы:

$$y_n = 2\gamma \cos \beta y_{n-1} - \gamma^2 y_{n-2} + A \left(\left(\frac{h}{T_g} \cos \varphi + h\omega \sin \varphi \right) x_n + \left(h\omega \sin(\beta - \varphi) - \frac{h}{T_g} \cos(\beta - \varphi) - \alpha \cos \beta \right) \gamma x_{n-1} + \alpha \gamma^2 x_{n-2} \right), \quad (14)$$

где $y_i = y(ih)$, $x_i = x(ih)$.

Разностная модель удобна для компьютерной реализации и, кроме того, естественным образом учитывает «предысторию» входного сигнала, в отличие от прямой дискретизации.

Модели задачи восстановления входного сигнала первичного преобразователя. Получение модели преобразователя АЭ в виде интегрального оператора свертки (6) позволяет одновременно получить интегральную модель обратной динамической задачи, рассматривая зависимость (6) как уравнение Вольтерра I рода относительного входного сигнала $x(t)$. При этом модель (6) может быть получена как аналитически по заданному дифференциальному уравнению, так и в результате натурального эксперимента, позволяющего получить импульсную переходную $K(t)$ (ядро функции) как реакцию на единичный тестовый сигнал. В последнем случае полученная зависимость в виде интеграла свертки будет представлять собой интегральную макромоделю.

При обработке экспериментальных данных следует учитывать искажения регистрируемого сигнала из-за не идеальности переходной характеристики измерительного канала, т.е. обеспечивать компенсацию (коррекцию) динамических искажений, вносимых измерительным каналом, в частности датчиком. Другими словами, необхо-

димо решить задачу восстановления входного сигнала $x(t_k)$ по известному выходному сигналу $y(t)$ и математической модели измерительного преобразователя (ИП). При этом необходимо решать дифференциальное (1) или интегральное (6) уравнение. В случае структурной коррекции это эквивалентно включению между датчиком и регистрирующим устройством (РУ) корректирующего устройства (КУ) с передаточной функцией $W_{ky}(p) = W_{py}^{-1}$, обеспечивающей общую передаточную функцию системы равной единице:

$$W(p) = W_{ky}(p) \cdot W_{py}(p) = 1. \quad (15)$$

Задачи восстановления и идентификации относятся к так называемым обратным задачам или задачам инверсной обработки сигналов и являются некорректными [3]. Использование общих принципов теории некорректных задач, а также учет априорной информации и избыточности данных, позволяют получить приемлемые решения задачи восстановления.

Вывод. Таким образом, предложенные методы и алгоритмы восстановления «истинного» сигнала акустической эмиссии как входного сигнала датчика по данным его экспериментально определенного выходного сигнала и известной динамической модели, при использовании непрерывной модели в виде интегрального уравнения с применением квадратурных алгоритмов, алгоритмов восстановления позволяют существенно повысить точность регистрации и обработки сигналов.

Список использованной литературы:

1. Грешилов А. А. Некорректные задачи цифровой обработки информации и сигналов / А. А. Грешилов — 2-е изд. доп. — М. : Университетская книга; Логос, 2009. — 360 с.
2. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика / С. Ф. Филоненко. — К. : КМУГА, 1999. — 312 с.
3. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій : науково-технічний посібник : у 3 т. / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. — К. : Наукова думка, 2009. — 263 с.
4. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. — 2-е изд., испр. — М. : Техносфера, 2007. — 856 с.

The problems of solving the problem of recovery of the input signal at a high speed with the ill-posed problem, modeling the primary converter and signal processing algorithms acoustic emission

Key words: *acoustic emission signals, diagnostics, defects, classification, primary converters.*

Отримано: 25.03.2015