

УДК 621.372

В. И. Гук, канд. техн. наук, доцент,
О. А. Наконечная, старший преподаватель

Восточноевропейский университет экономики
и менеджмента, г. Черкассы

АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В работе приведены алгоритмы численного определения основных временных характеристик сигналов акустической эмиссии, в том числе определения огибающей сигнала, времени появления импульса, длительности переднего и заднего фронта и общей длительности сигнала, амплитуды отдельных мод, а также энергии и мощности сигнала.

Ключевые слова: *сигнал акустической эмиссии, цифровая обработка сигналов, измерение временных параметров акустического сигнала, огибающая сигнала, энергетические характеристики сигнала, время нарастания и спада сигнала, длительность сигнала.*

Введение и постановка задачи. Акустическая эмиссия (АЭ) — это явление возникновения звуковых колебаний в твердом теле при появлении локальных дефектов. Сигнал акустической эмиссии представляет собой непрерывный электрический сигнал на выходе преобразователя акустической эмиссии, имеющий импульсную форму и характеризуется частотой, амплитудой, длительностью, временем нарастания, энергией и амплитудным распределением [1]. С целью отсеечения шумов и хаотических искажающих колебаний, возникающих в результате многочисленных переотражений звуковых волн, при регистрации сигнала акустической эмиссии задается пороговое значение сигнала U_n , т.е. уровень, начиная с которого регистрируется полезный сигнал.

Основные параметры сигналов акустической эмиссии приведены в ГОСТе [2], широко применяются при проведении измерений и определяются следующими параметрами [3; 4]:

- *счетом АЭ* называется количество превышений сигналом АЭ порога ограничения;
- *скоростью счета акустической эмиссии* называется отношение суммарного счета АЭ к интервалу времени наблюдения;
- *огибающей сигнала АЭ* называется функция, построенная по характерным для данного сигнала локальным экстремумам (*нижняя огибающая* строится по локальным минимумам, а *верхняя огибающая* строится по локальным максимумам; если не оговаривается вид огибающей, то под огибающей сигнала АЭ понимается верхняя огибающая; при построении верхней огибающей часто

выбираются все точки локального экстремума, причем точки локального минимума берутся с противоположным знаком);

- *пиковой (или максимальной) амплитудой АЭ* называется максимальная амплитуда аналогового сигнала АЭ;
- *временем нарастания сигнала АЭ* называется время между появлением сигнала АЭ над порогом ограничения и временем достижения сигналом пиковой амплитуды;
- *энергией АЭ* называются энергия, выделяемая источником АЭ и переносимая волнами, возникающими в материале; часто энергия АЭ обозначается аббревиатурой MARSE (Measured area of the rectified signal envelope — измеренная площадь под огибающей сигнала АЭ);
- *амплитудным распределением АЭ* называются распределение количества сигналов АЭ по их амплитудам.

При обработке и анализе сигналов АЭ стремятся к увеличению количества исследуемых параметров, что обусловлено сложностью физических процессов, происходящих в материалах. Возможность такого более детального исследования имеется в связи с интенсивным использованием средств компьютерной обработки результатов измерений. Алгоритмы определения параметров сигналов акустической эмиссии при цифровой обработке не описаны в ГОСТе и часто понимаются исследователями по-разному. Поэтому возникает необходимость описать алгоритмы численного определения параметров сигнала акустической эмиссии. Настоящая статья посвящена описанию алгоритмов определения только временных характеристик цифрового сигнала АЭ. Спектральные характеристики сигнала будут рассмотрены в другой статье.

Основные результаты. Сигнал акустической эмиссии, поступающий на вход акустического преобразователя, имеет сложную форму, обусловленную многократными переотражениями от границ изделия, наложением прямых и отраженных звуковых волн и воздействием различных помех. На первом этапе обработки сигнала акустической эмиссии определяются числовые параметры, характеризующие форму сигнала и позволяющие провести предварительный анализ выходного сигнала широкополосного пьезоэлектрического преобразователя. Форма сигнала акустической эмиссии характеризуется, в первую очередь, формой огибающей этого сигнала.

Алгоритм выделения огибающей сигнала акустической эмиссии. Учитывая, что выходной сигнал преобразователя имеет вид радиопульса, простейший способ получения массива значений огибающей сигнала АЭ заключается в выделении из массива $y(t_i)$ значений квантованного выходного сигнала точек локальных экстремумов и аппроксимации значений модулей этих экстремумов [6]. Условие локального экстремума в окрестности трех последовательных точек y_{i-1}, y_i, y_{i+1} , выбранных из массива значений $y_i = y(t_i)$, определяется условием

$$\left((y_{i-1} < y_i) \wedge (y_i > y_{i-1}) \right) \vee (y_{i-1} > y_i) \wedge (y_i < y_{i+1}). \quad (1)$$

В массив значений огибающей сигнала a_i записываются последовательно абсолютные значения всех точек, для которых выполняется условие (1). Размерность этого массива будет, естественно, меньше размерности массива значений сигнала y_i , т. к. в массив значений огибающей записываются только локальные экстремумы. Для формирования массива значений огибающей во всех равноотстоящих точках отсчета времени t_i с шагом Δt можно использовать линейную или квадратичную интерполяцию.

При линейной интерполяции огибающей между двумя соседними экстремумами $y_1 = y(t_1)$ и $y_2 = y(t_2)$ используются формулы

$$y_{\text{лин}}(t) = y_1 + d_{\text{лин}} \cdot (t - t_2), \quad (2)$$

$$d_{\text{лин}} = (y_2 - y_1) / (t_2 - t_1), \quad (3)$$

при квадратичной интерполяции используются формулы

$$y_{\text{кв}}(t) = y_1 + d_1(t - t_1) + d_2(t - t_1) \cdot (t - t_2), \quad (4)$$

где y_1, y_2, y_3 — значения огибающей в моменты времени t_1, t_2, t_3 ; d_1 — разделенная разность функции $y(t)$ первого порядка:

$$d_1 = \frac{(y_2 - y_1)}{(t_2 - t_1)}, \quad (5)$$

d_2 — разделенная разность функции $y(t)$ второго порядка:

$$d_2 = \frac{y_1}{(t_2 - t_1)(t_3 - t_1)} + \frac{y_2}{(t_1 - t_2)(t_3 - t_2)} + \frac{y_3}{(t_1 - t_3)(t_2 - t_3)}. \quad (6)$$

Погрешности определения очередной вычисляемой точки огибающей оцениваются выражениями:

$$\Delta y_{\text{лин}} = \left| y_{\text{лин}}(t_e) - y_e \right| \quad (7)$$

при линейной интерполяции и

$$\Delta y_{\text{кв}} = \left| y_{\text{кв}}(t_e) - y_e \right| \quad (8)$$

при квадратичной интерполяции.

Через y_e и t_e обозначены экстремальное значение сигнала и момент времени, когда это значение достигается.

Если $\Delta y_{\text{лин}} < \Delta y_{\text{кв}}$, то искомые значения $A(t_i)$ огибающей определяются значениями линейной функции $y_{\text{лин}}(t_i)$, если $\Delta y_{\text{лин}} > \Delta y_{\text{кв}}$ — то значениями квадратичной функции $Y_{\text{кв}}(t_i)$. Узлы времени t_i определяются соотношениями:

$$t_0 = t_{sp}, \quad (9)$$

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t, \quad i = 1, 2, \dots \quad (10)$$

где Δt — шаг квантования времени; t_{sp} — момент начала отклика преобразователя на приход очередного пакета акустических волн.

Соотношения (2)—(6) определяют простейший алгоритм выделения огибающей сигнала акустической эмиссии. Программная реализация этого алгоритма на встроенном языке программирования системы компьютерной математики Maple приведена на рис. 1.

Построение огибающей сигнала

Исходные данные: T – массив равноотстоящих значений времени
A – массив цифровых значений сигнала
h – шаг дискретизации времени

Результат: E – массив модулей экстремальных значений сигнала
N – массив номеров (индексов дискретного сигнала), которые соответствуют найденным экстремальным значениям
Y – массив значений огибающей, которые соответствуют равноотстоящим значениям времени T и получены методом линейной интерполяции

1. Нахождение локальных экстремумов
> j:=1;
Формируются массивы E и N
> E:=vector(1000); N:=vector(1000);
> for i from 2 by 1 to 1000 do
if (A[i-1]<A[i] and A[i]>A[i+1])then E[j]:=A[i]; N[j]:=i; j:=j+1 end if;
if (A[i-1]>A[i] and A[i]<A[i+1])then E[j]:=abs(A[i]); N[j]:=i; j:=j+1 end if;
end do;

Количество экстремумов в массиве дискретного сигнала
> n:=j-1;

2. Формирование массива значений огибающей Y с шагом дискретизации h
> Y:=vector(1001);
Вычисляются интерполяционные значения на первом интервале от 0 до T[1]
> for i from 1 to N[1]do

$$Y[i] := \frac{E[1]}{T[N[1]]} \cdot T[i];$$

end do;

Вычисляются интерполяционные значения на остальных интервалах до предпоследнего включительно
> for n1 from 1 to n-1 do
for i from N[n1]+1 to N[n1+1] do

$$Y[i] := \frac{((E[n1+1] - E[n1]) \cdot (T[i] - T[N[n1]]))}{T[N[n1+1]] - T[N[n1]]} + E[n1]$$

end do;
end do;

На последнем интервале считается, что огибающая остается постоянной
> for i from N[n]+1 to 1001 do
Y[i] := Y[N[n]];
end do;

Рис. 1. Программа формирования массива значений огибающей сигнала

Заметим, что по величине $\Delta y = \min\{\Delta y_{лин}, \Delta y_{кв}\}$ весьма просто фиксируется момент резкого изменения огибающей, которое является следствием прихода на преобразователь пакета волн очередного импульса акустической эмиссии. Поэтому найденное значение можно использовать для оценки времени прихода очередного импульса акустического сигнала. Кроме того, это значение используется для формирования интервала времени, в течение которого производится оценка параметров огибающей акустического сигнала по следующему алгоритму.

Оценка модовых значений огибающей сигнала. Пусть в результате выделения огибающей сигнала акустической эмиссии по описанному выше алгоритму получен массив дискретных значений с постоянным шагом дискретизации. Все полученные значения лежат в интервале времени от T_{si} до T_{fi} , в котором значения сигнала превышают пороговый уровень U_{nop} (рис. 2).

В качестве основной энергетической характеристики будем рассматривать максимальную амплитуду импульса A_m . Ввиду многомодовости сигнала при оценке A_m будем пренебрегать локальными максимумами ниже уровня U_f сигнала, определяющего моменты конца переднего (T_{sf}) и начала заднего (T_{fs}) фронтов импульса. Таким образом, в качестве оценки принимаем первый локальный максимум, превышающий уровень $U_f = \delta_f \cdot A_{max}$, где A_{max} — максимальное дискретное значение сигнала, δ_f — коэффициент уровня отсчета фронтов импульса.

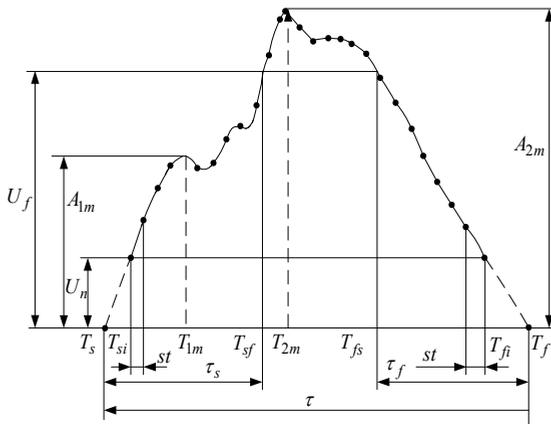


Рис. 2. Сигнал акустической эмиссии

Первый локальный максимум сигнала соответствует амплитуде A_1 продольной составляющей, образовавшейся в результате последнего отражения фронта сдвиговой волны (от неоднородности материала или границы поверхности изделия) перед поступлением акустического сигнала на вход преобразователя.

Значения максимумов A_{1m} , A_{2m} и соответствующие им моменты времени T_{1m} , T_{2m} находятся как координаты вершины параболы, уравнение которой получено по формулам квадратичной интерполяции.

Оценка скорости изменения модовых значений сигналов АЭ. При получении этих оценок локализация источников сигналов АЭ предполагается уже выполненной, а по алгоритму, описанному выше, построены последовательности

$$\{A_1(T_{1m})\}_i, \{A_2(T_{2m})\}_i, (i = 1, 2, 3, \dots)$$

значений амплитуд $A_1^{(i)}$ и $A_2^{(i)}$ в соответствующие моменты времени $T_{1m}^{(i)}$, $T_{2m}^{(i)}$ приема i -го сигнала от источника с известными координатами. Проведем оценку скоростей V_{A_j} ($j = 1, 2$) изменения амплитуд A_1 , A_2 сигналов АЭ разделенными разностями первого порядка. Таким образом, принимаем:

$$V_{A_j}^{(i)} = (A_j^{(i)} - A_j^{(i-1)}) / (T_{jm}^{(i)} - T_{jm}^{(i-1)}), j = 1, 2; i = 2, 3, 4, \dots, \quad (11)$$

В случае недостаточной точности линейного прогноза вычисленные значения первых разностей (11) используются как узлы для квадратичной интерполяции по формулам (5)—(6). Полученные значения скорости роста амплитуд сигнала позволяют определить критическое возрастания сигнала акустической эмиссии в изделии, которое предшествует разрушению.

Определение времени прихода сигнала АЭ. Время начала импульса, т.е. время прихода сигнала акустической эмиссии, может быть найдено как время поступления первого значения, которое превышает пороговый уровень U_n [5]. Однако такой метод определения времени прихода сигнала не обеспечивает получения требуемой точности и, кроме того, сильно зависит от выбранного порогового значения U_n .

Для получения более точного значения времени прихода импульса можно использовать алгоритм построения уравнения аппроксимирующей прямой, которая проходит через начальные точки огибающей. Уравнение прямой находится по методу наименьших квадратов, а точка начала импульса соответствует точке пересечения аппроксимирующей прямой с прямой порогового уровня (рис. 3). Если уравнение аппроксимирующей прямой имеет вид

$$y = a \cdot t + b, \quad (12)$$

то время прихода импульса находится как решение линейного уравнения

$$U_{\text{нор}} = a \cdot t + b. \quad (13)$$

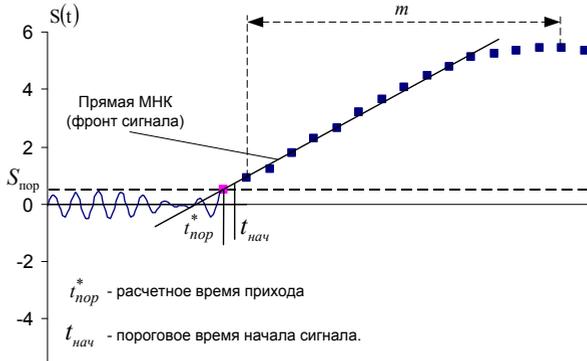


Рис. 3. Нахождения времени начала сигнала

Тоест время прихода сигнала находится по формуле

$$t_{\text{прих}} = \frac{U_{\text{нор}} - b}{a} \quad (14)$$

Для того, чтобы в формулу для нахождения времени прихода сигнала не входило пороговое значение, которое определяется человеком-исследователем, можно считать временем начала сигнала точкой пересечения прямой (12) с осью абсцисс

$$t_{\text{прих}}^* = \frac{b}{a} \quad (15)$$

Таким образом, можно составить следующий алгоритм нахождения времени прихода сигнала:

1. Находится количество экстремальных точек, через которые должна проходить прямая

$$l \approx \frac{m}{10}.$$

Количество точек выбирается на порядок меньше, чем расстояние от пороговой точки до максимума огибающей.

2. Составляется нормальная система уравнений МНК

$$\begin{cases} l \cdot a + \left(\sum_{i=1}^l t_i \right) \cdot b = \sum_{i=1}^l y_i \\ \left(\sum_{i=1}^l t_i \right) \cdot a + \left(\sum_{i=1}^l t_i^2 \right) \cdot b = \sum_{i=1}^l y_i t_i \end{cases} \quad (9)$$

3. Из решения системы уравнений находятся коэффициенты a и b прямой фронта сигнала

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^l y_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^l t_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^l y_i t_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^l t_i\right)}{l \cdot \left(\sum_{i=1}^l t_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^l t_i\right)^2}; \quad (10)$$

$$b = \frac{l \cdot \left(\sum_{i=1}^l y_i t_i\right) - \left(\sum_{i=1}^l t_i\right) \cdot \sum_{i=1}^l y_i}{l \cdot \left(\sum_{i=1}^l t_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^l t_i\right)^2}. \quad (11)$$

$$y = a \cdot t + b$$

4. Пороговое значение сигнала соответствует точке пересечения прямой $y = A \cdot t + B$ с осью времени, т.е. находится по формуле

$$t_{\text{пик}}^* = -\frac{b}{a} \quad (12)$$

Определение длительности и крутизны импульсов АЭ. Крутизну фронтов импульса АЭ можно оценить, используя линейную интерполяцию в начале и конце импульса (см. рис. 3). Угловые коэффициенты интерполяционных прямых находятся по формулам

$$C_j = (E_j - U_{\text{пор}}) / \Delta t, \quad (j = 1, 2), \quad (13)$$

где Δt — шаг дискретизации по времени; E_1 — первое значение сигнала, превышающее порог U_n ; E_2 — последнее значение сигнала, превышающее порог U_n .

Тогда моменты T_s , T_f начала и конца импульса определяются выражениями:

$$T_s = T_{st} - C_1 \cdot s_t, \quad (14)$$

$$T_f = T_{ft} - C_2 \cdot s_t. \quad (15)$$

Формулы линейной интерполяции можно использовать также и для оценки момента T_{sf} — конца переднего фронта и T_{fs} — начала заднего фронта импульса, причем эти моменты определяются уровнем $U_f = \delta_f \cdot A_{\text{max}}$ значения сигнала.

Таким образом, оцениваемые временные характеристики определяются выражениями:

$$\tau_s = T_{sf} - T_s \quad (16)$$

длительность переднего фронта;

$$\tau_f = T_f - T_{fs} \quad (17)$$

длительность заднего фронта;

$$\tau = T_f - T_s \quad (18)$$

длительность сигнала АЭ.

Формирование гистограммы амплитуд сигнала АЭ. Под гистограммой распределения амплитуд сигнала понимается распределение количества сигналов АЭ по их амплитудам, представленное в виде ступенчатого графика [1]. Характерный вид гистограммы амплитуд сигнала приведен на рис. 4.

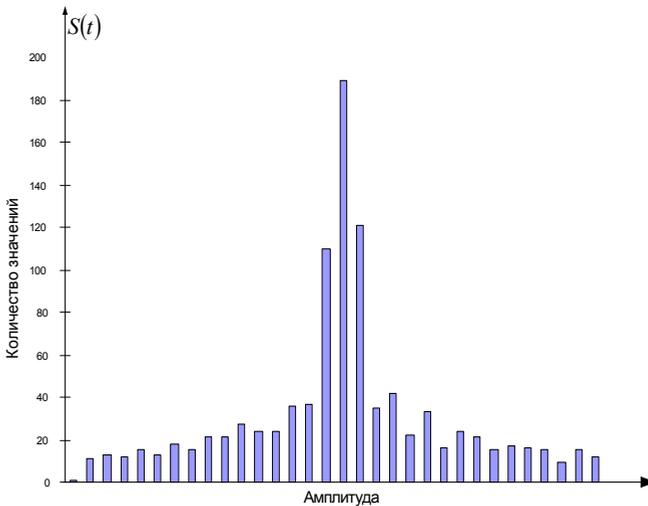


Рис. 4. Гистограмма амплитуд сигнала

Гистограмма распределения измеряемого сигнала по уровням является удобным способом накопления данных, требующих больших объемов памяти при хранении отдельных значений сигнала. По представленному в виде гистограммы сигналу можно с небольшой погрешностью определить статистические характеристики сигнала, необходимые для последующего анализа. При проведении постоянного мониторинга объекта количество уровней гистограммы может быть принято равным количеству уровней квантования сигнала аналого-цифровым преобразователем. При таком построении гистограммы накопленная сумма значений гистограммы пропорциональна длительности входного сигнала на уровне суммирования.

Алгоритм построения гистограммы распределения амплитуд по накопленному массиву значений сигнала заключается в следующем.

1. Определяется интервал изменения амплитуд $[A_{\text{нор}}, A_{\text{max}}]$.
2. Этот интервал разбивается на n равных частей. Для нахождения значения n можно воспользоваться формулой Стерджесса

$$n = 1 + 3,322 \lg N, \quad (19)$$

где n — количество интервалов суммирования, N — количество дискретных значений сигнала.

3. Подсчитывается количество дискретных значений сигнала, попавших в каждый из подынтервалов.
4. Находится частота попадания в интервал.
5. Строится ступенчатый график, т.е. гистограмма.

Полученные по описанным алгоритмам временные характеристики сигнала позволяют легко рассчитать и интегральные характеристики сигнала — энергию импульса и среднюю мощность в импульсе. Вычисление энергии сигнала АЭ производится путем интегрирования огибающей, то есть путем численного суммирования площадей под всеми модами сигнала. Мощность сигнала АЭ рассчитывается как отношение энергии к длительности сигнала.

Для вычисления площади под огибающей воспользуемся квадратурной формулой трапеций. Введем векторы мощности и энергии импульса $\vec{P} = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ и $\vec{E} = (E_1, E_2, \dots, E_n)$, где n — количество мод в сигнале АЭ.

По квадратурной формуле трапеций имеем:

$$E_i = \sum_{k=2}^{m_i-1} G_i^k \cdot h + \frac{h}{2} (G_i^1 + G_i^{m_i}), \quad (20)$$

$$P_i = E_i / T_i, \quad (21)$$

$$\langle E \rangle = \sum_{i=1}^n E_i, \quad (22)$$

$$\langle P \rangle = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (23)$$

где G_i — огибающая сигнала i -той моды, h — шаг дискретизации огибающей сигнала, m_i — число значений огибающей i -той моды сигнала, $\langle E \rangle$ — суммарная энергия сигнала, $\langle P \rangle$ — полная мощность сигнала.

Проверка алгоритмов и тестирование программ. Проверку правильности алгоритмов и соответствующих программ удобно производить на тестовом сигнале, параметра которого известны. Сигнал АЭ вместе с шумом математически представляет собой реализацию

случайного процесса. Характерная форма сигнала АЭ представлена на рис. 5.

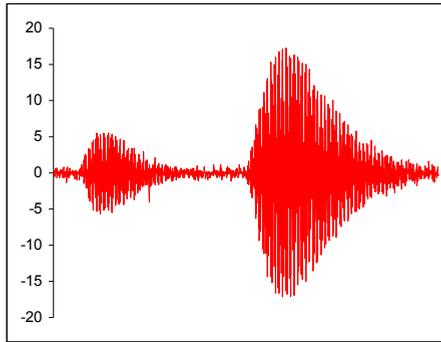


Рис. 5. Характерная форма сигнала АЭ

Моделирование такого сигнала, во-первых, достаточно трудоемко, а во-вторых не позволяет определить точное значение временных параметров для любой реализации случайного процесса. Поэтому для проверки предлагаемых алгоритмов расчета временных параметров предложено использовать специальный тестовый сигнал, который по форме близок к реальному сигналу, но не является случайным и может быть описан математической формулой.

Для построения тестового сигнала воспользуемся математической формой записи амплитудно-модулированного сигнала

$$y(t) = A(t) \cdot \sin(\Omega t + \Phi), \quad (24)$$

где $A(t)$ — амплитудная огибающая сигнала; Ω — угловая частота несущего колебания (огибающей); Φ — начальная фаза несущего колебания (огибающей).

Амплитудная огибающая сигнала, в свою очередь, задается формулой:

$$A(t) = A_0 + k \cdot A_\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (25)$$

где A_0 — амплитуда при отсутствии модуляции; k — коэффициент пропорциональности; A_ω — амплитуда несущего колебания (огибающей); ω — угловая частота модулирующего колебания; φ — начальная фаза модулирующего колебания.

Небольшие возмущения тестового сигнала, которые соответствуют случайному шуму реального сигнала АЭ, можно получить путем перемодуляции. Коэффициентом модуляции M называется отношение амплитуды огибающей сигнала (с учетом коэффициента пропорциональности k) к амплитуде при отсутствии модуляции

$$M = \frac{k \cdot A_{\omega}}{A_0} . \quad (26)$$

Если значение коэффициента модуляции $M > 1$, то возникает перемодуляция сигнала, которая приводит к возникновению небольших паразитных колебаний перед началом основного сигнала. Так, например, если амплитудно-модулированный сигнал задается формулой

$$y(t) = \left(2,5 - 3,0 \cdot \sin\left(\frac{1}{2}t + \frac{7}{18}\pi\right) \right) \sin(20t), \quad (27)$$

то коэффициент модуляции $M = 1.2$ и график такого колебания (сигнала) имеет вид, представленный на рис. 6.

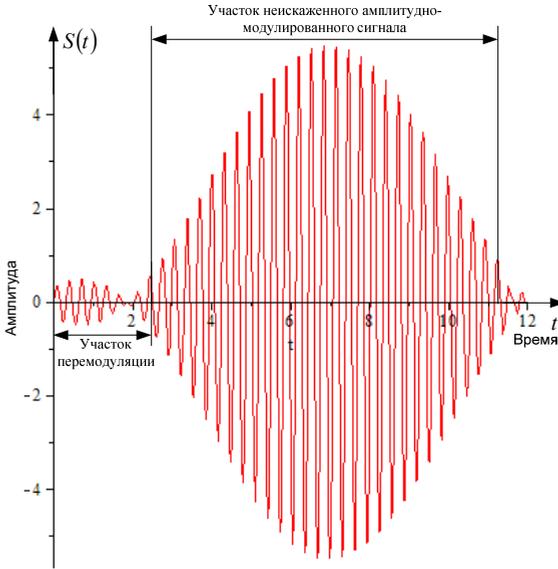


Рис. 6. Тестовый сигнал АЭ в форме перемодулированного сигнала

На участке перемодуляции возникли колебания с маленькой амплитудой, которые похожи на шум. Полученный сигнал близок по форме к характерному сигналу АЭ и поэтому может использоваться в качестве тестового сигнала для отладки предлагаемых алгоритмов.

Пример расчета временных параметров. Пользуясь приведенными алгоритмами, определим основные временные параметры тестового сигнала и найдем погрешности численного определения этих параметров.

Для тестового сигнала (27), график которого имеет вид, приведенный на рис. 6, огибающая задается формулой

$$A(t) = 2,5 - 3,0 \cdot \sin\left(\frac{1}{2}t + \frac{7}{18}\pi\right) \quad (19)$$

и имеет график, представленный на рис. 7.

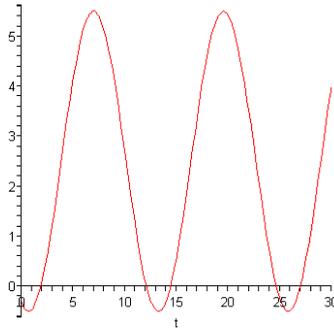


Рис. 7. Огибающая тестового сигнала

С помощью программы построения огибающей (см. рис. 1) был получен массив значений огибающей. График кривой, описываемой этим массивом, показан сплошной линией на рис. 8. На участках перемодуляции кривая равна нулю, так как пороговое значение сигнала выбрано большим, чем амплитуда сигнала на таких участках. То есть, на рис. 8. наглядно видно, как отсекаются помехи, присутствующие в исходном сигнале. Колебательный характер тестового сигнала приводит к тому, что выделенная огибающая имеет волнистый вид. Для определения погрешности численного метода расчета огибающей было найдено отклонение теоретической огибающей от расчетной огибающей. Относительное отклонение составило 4,768%, т.е. погрешность не превысила 5%, что вполне удовлетворительно для большинства практических задач.

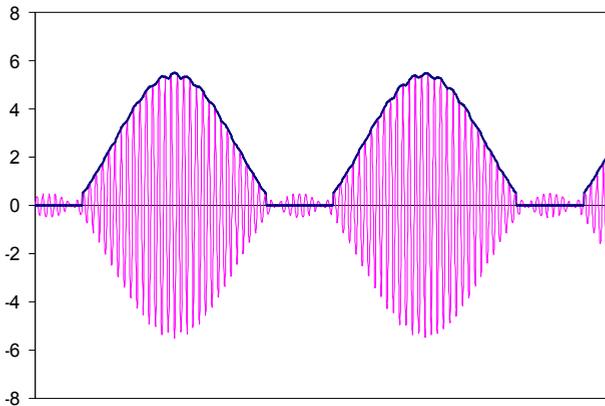


Рис. 8. Расчетная огибающая тестового сигнала

Найдем время прихода сигнала по описанному выше алгоритму и определим погрешность численного метода путем сравнения теоретического и расчетного значений. Для определения теоретического значения нужно приравнять значения огибающей к пороговому значению и решить полученное уравнение.

При пороговом значении $U_{пор} = 0,5$, получаем следующее уравнение

$$2,5 - 3,0 \cdot \sin\left(\frac{1}{2}t + \frac{7}{18}\pi\right) = 0,5. \quad (20)$$

Корнями этого уравнения являются числа $t = -0.4732393861 \pm k \cdot \pi$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Первое положительное значение корня, т.е. время начала сигнала равно $t_{нач} = 2.668353268$.

Находя коэффициенты прямой фронта сигнала по формулам (10)—(11) получаем следующее уравнение

$$y = 1,3834 t - 2,8715. \quad (21)$$

Расчетному времени начала сигнала соответствует точка пересечения прямой (21) с прямой $y = U_{пор}$. Решая полученное уравнение, находим координаты этой точки $t = 2,437111$. Относительная погрешность определения времени начала сигнала при использовании линейной интерполяции составила $\delta = 8,51\%$.

Найдем время окончания сигнала и длительность сигнала. Расчетное время окончания сигнала находится как точка пересечения линии отрицательного фронта сигнала и линии порогового уровня $U_{пор} = 0,5$. Уравнение прямой отрицательного фронта тестового сигнала рассчитывается по методу наименьших квадратов и имеет вид:

$$y = -1,3477 \cdot t + 16,048. \quad (22)$$

Расчетное время окончания сигнала составляет $t_{кон}^* = \frac{15,548}{1,3477} = 11,537$.

Теоретическое значение времени окончания тестового сигнала находится как ордината точки пересечения теоретической огибающей и прямой порогового уровня сигнала. Это значение находится как решение тригонометрического уравнения (20) и составляет $t_{кон} \approx 11,582$.

Относительная погрешность нахождения времени окончания сигнала составила 0,39%.

Зная расчетное время начала и конца сигнала легко найти расчетную длительность сигнала $\Delta t = t_{нач} - t_{кон} \approx 8,869$. Соответствующее теоретическое значение составляет $\approx 9,202$. Относительная погрешность $\delta = 3,63\%$.

Выводы

1. При современном уровне развития цифровой техники при выполнении измерений не производится предварительная обработка аналогового сигнала, а сигнал сразу преобразуется в цифровую форму. Поэтому выделение временных характеристик сигнала нужно проводить по массиву цифровых значений. Приведенные в статье алгоритмы численного расчета позволяют по цифровым значениям сигнала акустической эмиссии найти основные временные параметры сигнала.

2. Для отладки алгоритмов и программ цифровой обработки сигналов удобно использовать тестовый сигнал заданный в виде формулы. Для того чтобы этот тестовый сигнал имел участок, моделирующий случайный шум, предложено использовать перемодулированный сигнал и подобраны специальные значения коэффициентов для получения участка перемодуляции.

3. Путем сравнения теоретических и расчетных значений временных характеристик тестового сигнала показано, что относительная погрешность приведенных численных методов составляет приблизительно 5%, что вполне удовлетворительно для практических задач.

Список использованной литературы:

1. Грязнов М. И. Измерение параметров импульсов / М. И. Грязнов, М. Л. Гуревич, Ю. А. Рябинин. — М. : Радио и связь, 1991. — 216 с.
2. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
3. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика / С. Ф. Филоненко. — К. : КМУГА, 1999. — 312 с.
4. Бабак В. П. Обробка сигналів : підручник / В. П. Бабак, В. С. Хандецкий, Е. Шрюфер. — 2-е вид., перероб. і доповн. — К. : Либідь, 1999. — 496 с.
5. Степанова Л. Н. Оценка погрешностей определения времени прихода сигналов акустической эмиссии пороговым методом / Л. Н. Степанова, И. С. Рамазанов, К. В. Канифадин // Дефектоскопия. — 2009. — № 4. — С. 69–78.

The author presents the algorithms for numerical determination of basic temporal characteristics of acoustic emission signals, including determination of signal envelope, time of impulse appearance, duration of rising and falling edge and total duration of signal, an amplitude of individual modes, as well as energy and power of signal.

Key words: *acoustic emission signal, digital processing of signals, determination of temporal characteristics of acoustic signal, signal envelope, energy characteristics of signal, building-up period and discharge time, duration of signal.*

Отримано: 15.03.2012