

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ АМПЛИТУДНОЙ ДИСКРИМИНАЦИИ ПРИ МАЛОМ СООТНОШЕНИИ СИГНАЛ/ШУМ

© 2022 г. И.А. Растегаев^{1,*}, И.С. Ясников¹, И.И. Растегаева¹,
Э.А. Аглетдинов¹, Д.Л. Мерсон¹

¹Тольяттинский государственный университет, Россия 445020 Тольятти, ул.Белорусская, 14
*E-mail: RastIlgAev@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.2022; после доработки 12.02.2022

Принята к публикации 22.02.2022

Предложен подход к расчету вероятности обнаружения акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов в широком диапазоне соотношения сигнал/шум (SNR), результаты которого демонстрируют хорошую сходимость с экспериментальными данными. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является пок кадровый анализ площадей распределения выбросов амплитуды в сигнале и шуме, превышающих порог амплитудной дискриминации, что позволяет выполнять оценки при $SNR < 6$ дБ. Показано, что положительным эффектом применения предлагаемого подхода является переход от оценки вероятности пропуска сигналов от дефекта к оценке вероятности обнаружения сигнала каждого вида и разной степени трансформации (искажения), что позволяет выполнить объективное сравнение и выбор вариантов оптимальных процедур записи, обработки, фильтрации (шумоподавления) и анализа данных АЭ, а также подобрать настройки для их реализации. Предлагаемый подход инвариантен к способу получения кадров записи АЭ и форме акустических сигналов, поэтому применим для оценки одно- и многомодальной импульсной и непрерывной АЭ, зарегистрированной кадрами в пороговом и беспороговом режимах записи АЭ. Установлены условия, влияющие на расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований, и обозначены пути повышения точности применения предлагаемого подхода. Показано, что амплитудное детектирование сигналов возможно, начиная с уровня порога, превышающего уровень шума на 3 дБ, при наличии выбросов амплитуды в шуме не выше 7,5 дБ среднеквадратического отклонения его распределения. В противном случае качественное и устойчивое детектирование сигнала по амплитудному порогу обеспечено быть не может.

Ключевые слова: вероятность обнаружения сигнала, вероятность регистрации ложного сигнала, отношение сигнал/шум, акустическая эмиссия.

DOI: 10.31857/S0130308222030010

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие наблюдается рост публикаций, посвященных применению метода акустической эмиссии (АЭ) для раннего обнаружения дефектов (повреждений), развитие которых в объектах контроля находится на такой стадии, при которой либо еще возможна эксплуатация объекта до следующего капитального ремонта, либо могут быть применены компенсирующие мероприятия, позволяющие устранить или остановить развитие дефекта, т.е. продлить срок службы оборудования [1—3]. При этом полагается, что развитие дефекта на ранней стадии сопровождается малым масштабом источника АЭ, при котором формируются низкоамплитудные сигналы, сопоставимые с уровнем шума ($SNR < 6$ дБ, где SNR — отношение сигнал/шум). Кроме того, существует устойчивый тренд на расширение номенклатуры объектов АЭ контроля и мониторинга от малозумных (сосуды, трубопроводы, подъемные краны и др.) в сторону зашумленных (электротрансформаторы, силовые передачи, подшипники качения и скольжения и др.), в которых велика вероятность одновременной генерации нескольких источников АЭ с сопоставимой амплитудой сигналов. Проблема контроля на границе SNR неизбежно возникает и в случае существенного затухания АЭ волн в контролируемом объекте, когда нет возможности более близкого расположения преобразователей АЭ в антенных группах. Таким образом, сегодня во многих направлениях применения метода АЭ существует потребность в оценке возможности обнаружения «полезного» сигнала при $SNR < 6$ дБ.

В основе наиболее распространенного способа детектирования сигналов АЭ лежат алгоритмы, использующие амплитудный порог дискриминации, которые имеют сегодня несколько разновидностей и модификаций, обеспечивающие повышенную вероятность обнаружения сигнала на уровне шума в том числе [4—7]. Также широко практикуется повышение вероятности обнаружения сигнала путем использования прогрессивных методов фильтрации данных АЭ перед применением амплитудного детектора [8, 9]. Вместе с тем, на сегодня нет единого подхода для оценки вероятности пропуска сигнала ($P_{пс}$) или возникновения ложного события ($P_{лс}$) в условиях низкого соот-

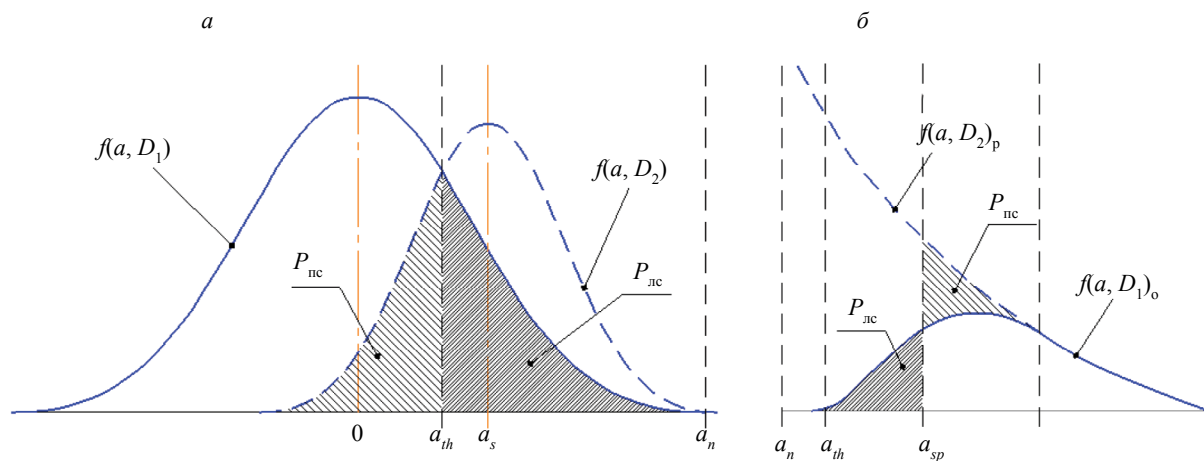


Рис. 1. Схемы оценки $P_{\text{лс}}$ и $P_{\text{нс}}$ по распределению амплитуды сигналов на основе вероятностно-статистических подходов принятия диагностических решений (а) и через оценку достоверности контроля АЭ (б).

ношения сигнал/шум ($SNR < 6$ дБ), который позволил бы выполнить объективное теоретическое сравнение и выбор среди различных вариантов процедур записи, обработки и анализа данных АЭ и настроек для их реализации.

Основными способами оценки $P_{\text{лс}}$ и $P_{\text{нс}}$ являются вероятностно-статистические подходы принятия диагностических решений на основе методов: минимального риска, минимального числа ошибок, минимакса, Неймана—Пирсона и наибольшего правдоподобия [10]. Применение обозначенных методов сводится к анализу схемы, представленной на рис. 1а [11, 12], и заключается в поиске оптимального значения уровня амплитудного порога дискриминации (a_{th}), который обеспечивал бы минимальное или заданное число ошибочно зарегистрированных сигналов шума (площадь $P_{\text{лс}}$) или обеспечивал заданную (допустимую) вероятность пропуска сигналов от источника АЭ (площадь $P_{\text{нс}}$), где a_s — амплитуда сигнала АЭ, a_n — амплитуда шума; $f(a, D_1)$ и $f(a, D_2)$ — функции распределения вероятности наступления событий D_1 и D_2 соответственно, где D_1 — диагностическое событие в виде ложного обнаружения сигнала, а D_2 — правильного обнаружения сигнала соответственно.

Другим известным подходом является оценка вероятностей $P_{\text{лс}}$ и $P_{\text{нс}}$ через достоверность контроля путем определения площадей, ограниченных кривыми амплитудного распределения расчетных $f(a, D_2)_p$ и обнаруженных $f(a, D_2)_o$ сигналов от источника АЭ, отсеченных линией a_{sp} , представляющей собой нормировочное значение какого-то ранга (критерия). Одна из схем данного подхода представлена на рис. 1б [14]. При данном подходе кривую $f(a, D_2)_p$ получают с использованием математических моделей или посредством аппроксимации фактически полученного амплитудного распределения сигналов от дефекта $f(a, D_2)_o$ [14—16]. Кроме того, существует энтропийный подход [17], при котором достоверность АЭ контроля оценивается не через вероятности наступления диагностических событий, а через энтропийную погрешность оценки их распределений. Однако при малом соотношении сигнал/шум ($a_s \approx a_n$) распределения $f(a, D_1)$ и $f(a, D_2)$, практически сливаются (рис. 2) и известные подходы не позволяют адекватно установить вероятность обнаружения сигнала на уровне шума и, тем более, ниже его. В связи с этим, целью настоящей работы являлась разработка универсального подхода для оценки вероятности обнаружения сигнала АЭ, пригодного для анализа ситуаций, как при $SNR < 6$ дБ, так и при $SNR > 6$ дБ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Предлагаемый подход оценки $P_{\text{ос}}$ заключается в переходе от расчетных схем рис. 1 к расчетной схеме, представленной на рис. 2, в основе которой заложены следующие отличительные особенности. Во-первых, возможность распознавания сигнала в шуме рассматривается не в рамках анализа распределения амплитуд зарегистрированных сигналов, а в рамках анализа распределений выбросов амплитуды a_p , имеющихся в каждом записанном кадре записи АЭ (длиной t_{rec}), построенных по отсчетам принадлежащих шуму ($0-t_1 \cap t_2-t_{\text{rec}}$) и шуму+сигналу (t_1-t_2). Во-вторых, в рамках такой постановки задачи осуществляется переход от анализа перекрытия площадей распределений

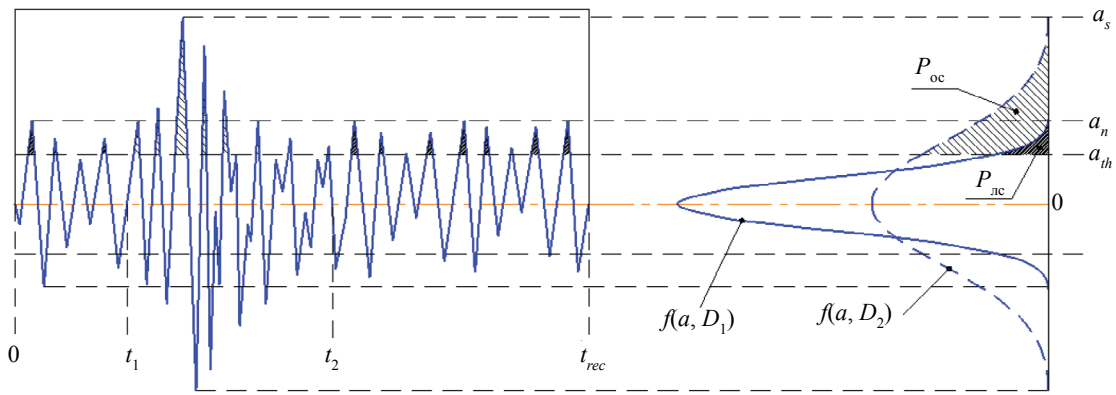


Рис. 2. Схема оценки P_{dc} и P_{oc} по распределению выбросов амплитуды в одном кадре записи АЭ.

сигнала и шума относительно порога к оценке площадей распределения сигнала и шума, превышающих порог, т.е. вместо определения вероятности пропуска сигналов от дефекта (P_{nc}) находится вероятность обнаружения сигнала (P_{oc}) каждого вида. При этом безразлично каким способом получен кадр записи АЭ: пороговым (кадр длиной t_{rec} записан по пересечению порога) или беспороговым (деление *stream*-записи на кадры длиной t_{rec}), но при обязательном выполнении условия Найквиста—Шеннона (Котельникова): $f_d \geq 2f_{max}$, где f_d и f_{max} — частота дискретизации и максимальная частота диапазона регистрации АЭ соответственно.

Предположим, что на детектор амплитудной дискриминации уровнем (a_{th}) поступает временная запись АЭ, в пределах которой имеется сигнал максимальной амплитуды (a_s) на фоне шума максимальной амплитуды (a_n). В условиях обеспечения широкополосной записи АЭ можно предположить нормальную плотность распределения выбросов амплитуды в шуме. В условиях низкого соотношения *SNR* основную долю сигнала составляет шум, поэтому также можно предположить и в сигнале близкий к нормальному закон распределения выбросов амплитуды, тогда

$$f(a_i)_n = N(\mu_1, \sigma_1^2) \text{ и } f(a_i)_s = N(\mu_2, \sigma_2^2), \quad (1)$$

где μ_1 , σ_1^2 и μ_2 , σ_2^2 — соответственно математическое ожидание и дисперсия распределения амплитуд шума $f(a_i)_n$ и сигнала $f(a_i)_s$, N — обозначает нормальный закон распределения (Гаусса) амплитуд на временной записи АЭ. После построения амплитудного распределения и его нормировки получаем функции $f(a, D_1)$ и $f(a, D_2)$ в виде вероятности регистрации отсчета амплитудой $a_i > a_{th}$. Тогда вероятность обнаружения a_i -го отсчета сигнала (число возможных положительных исходов) с применением амплитудных способов детектирования будет определяться разностью площадей $F(a_i > a_{th})_n$ и $F(a_i > a_{th})_s$. Однако, чтобы получить вероятность обнаружения сигнала (P_{oc}), необходимо разделить разность положительных исходов на полное количество возможных исходов, т.е. на сумму площадей $F(a_i > a_{th})_n$ и $F(a_i > a_{th})_s$, что запишется как

$$P_{oc} = \frac{F(a_i > a_{th})_s - F(a_i > a_{th})_n}{F(a_i > a_{th})_s + F(a_i > a_{th})_n} = \frac{2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da - 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da}{2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da + 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da}. \quad (2)$$

С учетом предположения о нормальной плотности распределения сигнала и шума получаем:

$$\int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da = \int_{a_{th}}^{a_s} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} da, \quad (3)$$

$$\int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = \int_{a_{th}}^{a_n} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} da. \quad (4)$$

Поскольку распределения $f(a, D_1)$ и $f(a, D_2)$ центрированы и нормированы, то $\mu_1 = \mu_2 = 0$, $F(a)_n = F(a)_s = 1$. Следует отметить, что благодаря нормировке $F(a)_n = F(a)_s$ к 1 можно нивелировать зависимость оценки P_{oc} от длины кадра (t_{rec}); от соотношения в нем длительности шума ($0-t_1 \cap t_2-t_{rec}$) к длительности сигнала (t_1-t_2), а также от количества однотипных сигналов, имеющих в кадре и следующих друг за другом без перекрытия. С учетом изложенных допущений получаем решение (3) и (4) в виде:

$$\int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right)}{2}, \quad (5)$$

$$\int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{2}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (2), получаем решение в общем виде:

$$P_{oc} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из (7) видно, что вероятность обнаружения сигнала в шуме (P_{oc}), по сути, определяется двумя группами отношений. Первые определяют близость уровня порога a_{th} к основной части (средне-квадратическому отклонению) распределения значений амплитуды сигнала (σ_2) и шума (σ_1). Вторые определяют наличие выбросов в сигнале (a_s) и шуме (a_n), значительно превышающих основную часть значений распределения амплитуд сигнала (σ_2) и шума (σ_1). Рассмотрим влияние каждой группы составляющих на P_{oc} .

Для оценки влияния отношений первой группы примем, что максимальная амплитуда выбросов в сигнале (a_s) и шуме (a_n) ограничена значением близким к 3σ , а сами σ на основании свойств нормального распределения представим в виде: $\sigma_1 = 0,34 \cdot a_n$, $\sigma_2 = 0,34 \cdot a_s$, тогда из (7) получаем:

$$\begin{aligned} P_{oc1} &= \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_s}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{\sqrt{2} \cdot 0,34 \cdot a_n}\right)} = \\ &= \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_s}\right) - 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_n}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_s}\right) + 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{th}}{0,48 \cdot a_n}\right)}, \end{aligned}$$

что после упрощения записывается как

$$P_{oc1} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_n}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_s}\right)}{2 - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_s}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{25 \cdot a_{th}}{12 \cdot a_n}\right)}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что группа отношений a_{th}/σ_1 и a_{th}/σ_2 сводится к соотношениям a_{th}/a_s и a_{th}/a_n , т.е. взвешивает разницу сигнал/порог—порог/шум. Результаты расчета P_{oc1} при различных соотношениях сигнал/порог (a_s/a_{th}) и порог/шум (a_{th}/a_n) в дБ представлены на рис. 3. При этом расчет был ограничен $a_s/a_{th} = 100$ дБ и $a_{th}/a_n = 100$ дБ, т.е. максимальный динамический диапазон, возможный в системах АЭ.

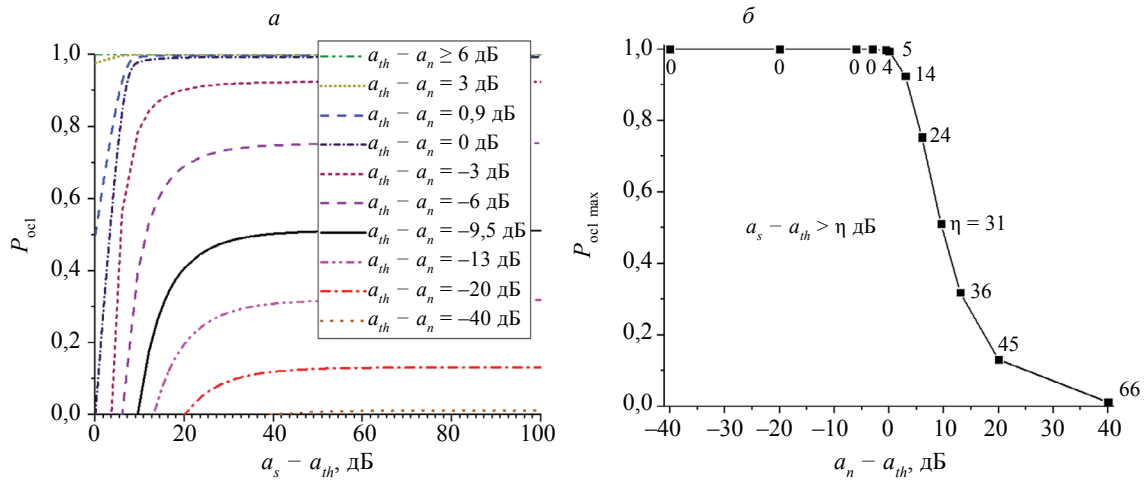


Рис. 3. Зависимости изменения P_{oc1} от a_s/a_{th} и a_n/a_{th} в дБ, где график (б) пересчитан из (а) и показывает значения a_s/a_{th} и a_n/a_{th} , при которых P_{oc1} выходит на насыщение $P'_{oc1} = 0,95 \cdot P_{oc1 \max}$. Над точками графика (б) указано минимальное значение $\eta = a_s - a_{th}$, при котором $P_{oc1} = P'_{oc1}$, а соединяющая их линия показывает общий тренд.

Для рассмотрения влияния на P_{oc} второй группы соотношений примем условие регистрации кадра рис. 2 при $a_{th} = 0$, а также будем считать, что максимальная амплитуда выбросов в сигнале (a_s) и шуме (a_n) может значительно превышать значение 3σ , т.е. $a_s \rightarrow \pm \infty$ и $a_n \rightarrow \pm \infty$, тогда из (7) получаем:

$$\begin{aligned}
 P_{oc2} &= \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}(0) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) + \operatorname{erf}(0)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}(0) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \operatorname{erf}(0)} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)} = \\
 &= 1 - \frac{2 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{a_s}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a_n}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)}. \tag{9}
 \end{aligned}$$

Из (9) видно, что группа отношений a_n/σ_1 и a_s/σ_2 оценивает наличие выбросов сверх основной части (среднеквадратического отклонения) распределения значений амплитуды сигнала и шума. Результаты расчета P_{oc2} по (9) при различных соотношениях a_s и a_n по отношению к их σ в дБ представлены на рис. 4. Аналогично предыдущему случаю расчет был ограничен $a_s/\sigma_2 = 100$ дБ и $a_n/\sigma_1 = 100$ дБ.

Рис. 3 наглядно демонстрирует последствия сбоев в работе порогового детектора в присутствии шума. Например, видно, что события D_1 и D_2 приближаются к равновероятностным ($P_{oc} \rightarrow 50\%$) только при уровне порога $a_{th} = a_n - 9,5$ дБ и уровне сигнала $a_s = a_{th} + 31$ дБ. Причем никаким дальнейшим повышением соотношения a_s/a_{th} нельзя добиться повышения P_{oc} . Если же порог установлен на уровне $a_{th} = a_n - 13$ дБ, то при любом $a_s > a_{th} + 36$ дБ величина $P_{oc} \rightarrow 30\%$, т.е. детектирование сигнала является статистически редким событием. При уровне порога ниже

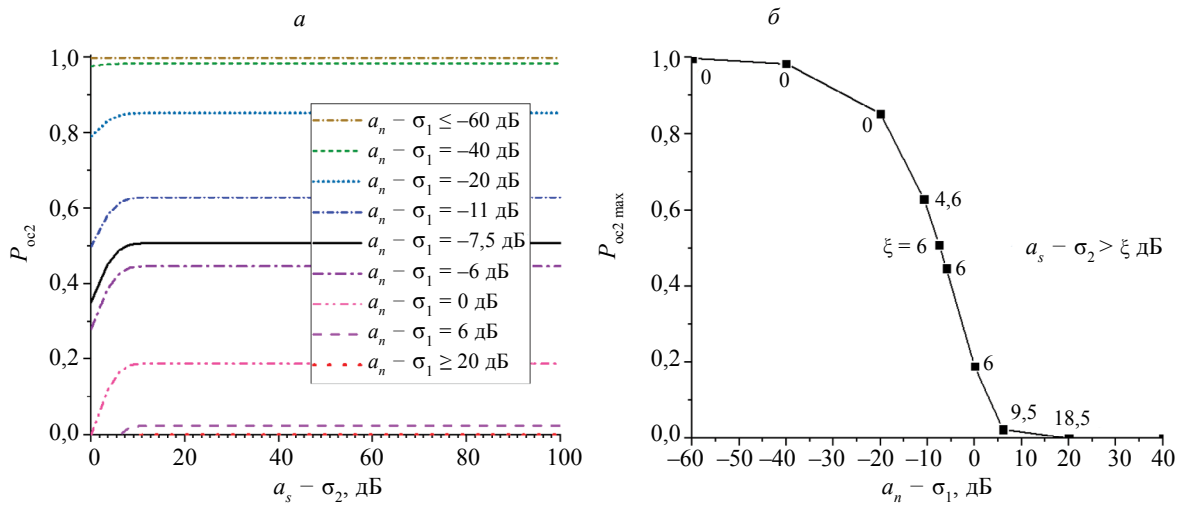


Рис. 4. Зависимости изменения P_{oc2} от a_s/σ_2 и a_n/σ_1 в дБ, где график (б) пересчитан из (а) и показывает значения a_s/σ_2 и a_n/σ_1 , при которых P_{oc2} выходит на насыщение $P'_{oc2} = 0,95 \cdot P_{oc2 \max}$. Над точками графика (б) указано минимальное значение $\xi = a_s - \sigma_2$, при котором $P_{oc2} = P'_{oc2}$, а соединяющая их линия показывает общий тренд.

шума, начиная с величины $a_{th} = a_n - 20$ дБ, вероятность обнаружения сигнала становится практически невозможным событием ($P_{oc} < 10\%$) независимо от соотношения a_s/a_{th} . В любом случае амплитуда минимально детектируемого сигнала нелинейно смещается в сторону больших величин a_s/a_{th} с увеличением a_{th}/a_n (рис. 3б). Если же сигнал на уровне порога ($a_{th} \approx a_s$), то вероятность его детектирования выше 50% (т.е. статистическое событие становится скорее возможным, чем нет), начиная с $a_{th} = a_n + 0,9$ дБ. При $a_{th} = a_n + 6$ дБ и выше гарантированно выявление сигнала при любом a_s/a_{th} , что совпадает с экспериментальными оценками других авторов [14].

Рис. 4 дополняет вышесказанное следующим: P_{oc} начинает превалировать над $P_{лс}$, если отдельные выбросы в шуме не превышают $a_n = \sigma_1 - 7,5$ дБ при $a_s > \sigma_2 + 6$ дБ и $a_n = \sigma_1 - 11$ дБ при $a_s \approx \sigma_2$, т.е. на участках, где отсутствуют высокоамплитудные выбросы шума или спадает общий уровень шума ниже σ_1 , возможно обнаружить сигнал с большей вероятностью, что и используется в способах амплитудного детектирования АЭ после фильтрации [8, 9]. Поэтому предлагаемый подход может быть использован для количественной оценки эффективности фильтрации для P_{oc} . Указанный подход применим и для случая параллельной регистрации сигналов примерно одинаковой амплитуды от двух источников при низком уровне фонового шума, при котором D_1 — событие регистрации сигнала АЭ от первого источника, а D_2 — от второго. В этом случае предлагаемый подход позволяет провести оценку минимальных граничных условий доминирования одних сигналов над другими, чтобы обеспечивалось заданное значение P_{oc} .

Для экспериментальной проверки предлагаемого подхода были взяты восемь типов представительных сигналов АЭ (рис. 5), существенно отличающихся амплитудой, длительностью и спектральным составом. Сигналы были вырезаны из реальной *stream*-записи АЭ, полученной при сопровождении испытания на растяжение чистого α -Fe с помощью аппаратуры «Physical Acoustics Corporation (PAC)» (США). С образца АЭ регистрировалась широкополосным пьезопреобразователем «PICO» в полосе рабочих частот 50—1200 кГц, затем усиливалась на 60 дБ усилителем типа «2/4/6» с последующей оцифровкой и записью платой аналого-цифрового преобразования «РСІ-2» с частотой дискретизации 2 МГц и амплитудным разрешением 16 бит. Из этой же записи АЭ был вырезан фрагмент реального шума, который был записан непосредственно перед началом испытания.

Далее из полученных восьми сигналов был сконструирован временной ряд АЭ, имитирующий тестовую *stream*-запись АЭ, содержащую тысячу событий. Времена появления сигналов в записи генерировались случайно, образуя процесс Пуассона. Последовательность появления записей отобранных сигналов также задавалась случайным законом равномерного распределения, т.е. присутствие каждого из восьми типов сигналов в общем потоке было равновероятно, а временные расстояния между событиями случайны и независимы. При этом для каждого варианта тестовых *stream*-записей, содержащих 1000 сигналов, для каждого специального сигнала было точно известно количество отсчетов и его временное положение. В результате, итоговая тестовая *stream*-запись

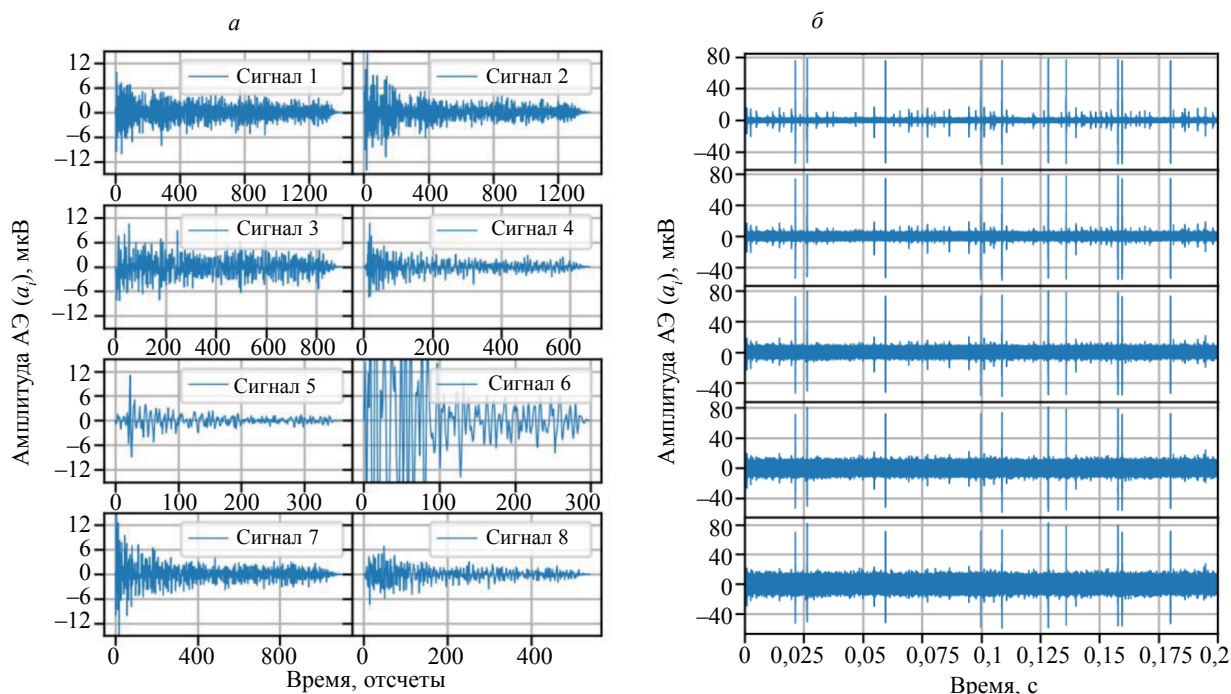


Рис. 5. Общий вид формы сигналов АЭ, отобранных из записи испытания на растяжение чистого α -Fe для проведения экспериментальных исследований (а), и общий вид фрагментов тестовых *stream*-записей, содержащие 1000 сигналов АЭ (б), показанных на рис. 5а и смешанных с реальным шумом, нормированным для имитации пяти уровней SNR, приведенных в табл. 1.

АЭ имела довольно большое сходство с реальными записями АЭ, регистрируемыми при деформации материалов, поскольку тестовые события существенно отличаются по амплитудным, временным и спектральным характеристикам и имеют неопределенность времени прихода. Последнее заключается в том, что события АЭ могут происходить одно за другим или через относительно большой интервал тишины. Перекрытие сигналов при этом исключалось условиями конструирования тестовой *stream*-записи.

Таблица 1

Значения SNR (в дБ) для восьми сигналов в пяти тестовых *stream*-записях

Запись №	Номер сигнала							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6,0	7,2	7,8	4,2	3,7	21,5	6,8	4,3
2	0	1,2	1,8	-1,9	-2,3	15,5	0,8	-1,7
3	-3,5	-2,3	-1,7	-5,4	-5,9	12,0	-2,7	-5,2
4	-6,5	-4,8	-4,2	-7,9	-8,4	9,5	-5,2	-7,7
5	-8,0	-6,7	-6,2	-9,8	-10,3	7,5	-7,2	-9,7

Затем на тестовый сигнал накладывался нормированный шум. Константа, нормирующая амплитуду шума, задавалась таким образом, чтобы симитировать пять различных степеней зашумления, соответствующих разному соотношению SNR. Значения SNR для каждого типа сигнала и каждого уровня шума, рассчитанные по выражению (10), сведены в табл. 1.

$$SNR_{дБ} = 10 \lg \left(\frac{RMS_s}{RMS_n} \right)^2, \quad (10)$$

где RMS_s и RMS_n — соответственно среднеквадратичное значение сигнала и шума:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_0^T a_i^2(t)}. \quad (11)$$

Далее пять тестовых *stream*-записей АЭ многократно прогоняли через пороговый амплитудный детектор и определяли количество отсчетов сигналов и шума, превышающих уровень амплитудной дискриминации. При этом использовалось шесть уровней порога, величина которых задавалась соотношением: $a_{th}/\sigma_1 = 1$ (0 дБ); 0,5 (–6 дБ); 0,1 (–20 дБ); 0,01 (–40 дБ); 2 (+6 дБ); 10 (+20 дБ) и 100 (+40 дБ). Экспериментальное значение P_{oc} получали по следующему выражению, которое является аналогом выражений (2) и (7):

$$P_{oc} = \frac{\frac{\sum a_s > a_{th}}{\sum a_s} - \frac{\sum a_n > a_{th}}{\sum a_n}}{\frac{\sum a_s > a_{th}}{\sum a_s} + \frac{\sum a_n > a_{th}}{\sum a_n}}, \quad (12)$$

где $\sum a_s > a_{th}$ и $\sum a_n > a_{th}$ — соответственно сумма отсчетов сигнала и шума, превышающих уровень порога, а $\sum a_s$ и $\sum a_n$ — соответственно общая сумма отсчетов в сигнале и шуме. В вычислительном эксперименте при определении $\sum a_s > a_{th}$ и $\sum a_n > a_{th}$ использовалась вся тестовая *stream*-запись, в которой по результатам конструирования время начала и окончания каждого сигнала были известны с точностью до отсчета. Теоретическое значение P_{oc} определяли по выражению (7) с подстановкой величин a_s , a_n , σ_2 и σ_1 , полученных для каждого сигнала по каждой тестовой *stream*-записи АЭ. Результат сопоставления экспериментальных и теоретических значений P_{oc} по каждому типу сигнала представлен на рис. 6а, который показывает хороший уровень совпадения. При этом несколько заниженные экспериментальные значения P_{oc} для всех сигналов, кроме 3, 1 и 8, объясняются большим отличием формы их амплитудного распределения от нормального, использовавшегося в модели в качестве приближения, что видно из рис. 6б. Следовательно, точность предлагаемого подхода может быть повышена путем подстановки в выражение (2) функции амплитудного распределения, построенного непосредственно по записи формы реаль-

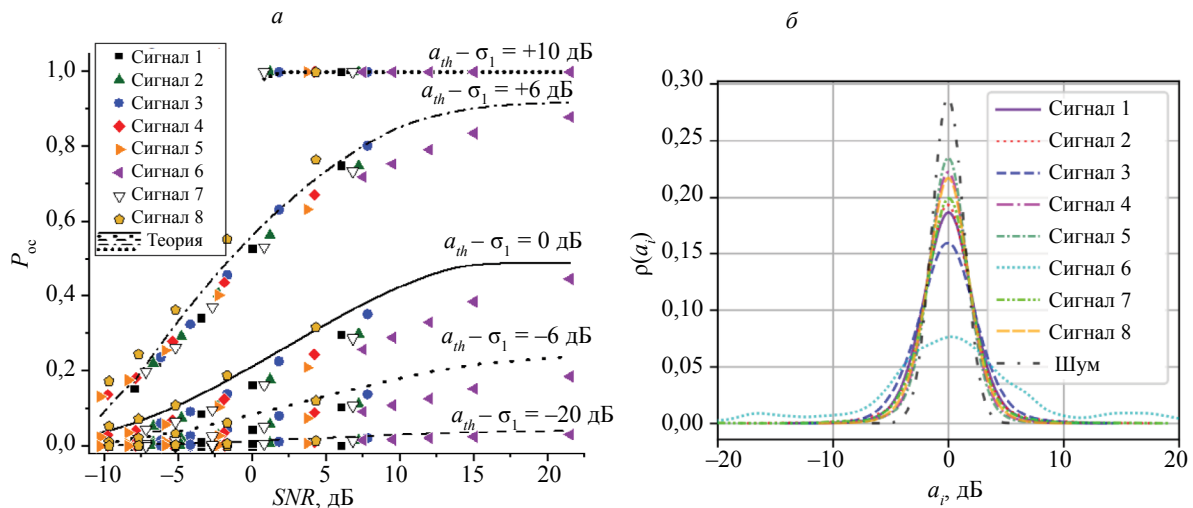


Рис. 6. Результат сопоставления экспериментальных и теоретических значений P_{oc} по каждому типу сигнала (а) и общий вид распределений выбросов амплитуды a_i в отсчетах сигналов и шума в первой тестовой *stream*-записи АЭ (б).

ного сигнала, а выражение (7) может быть использовано для выполнения предварительных оценок. Кроме этого, экспериментальная оценка показала необходимость введения правил, устраняющих неопределенность и обеспечивающих сходимость с экспериментальными данными в граничных и приграничных областях соотношений a_s и/или a_n к a_{th} , а именно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } a_{th} > a_s \text{ без расчета принимается } P_{oc} = 0 \\ \text{пусть } 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da - 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = A, \text{ то при } A < 0 \text{ принимается } |A| \\ \text{пусть } 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_s} f(a, D_2) da + 2 \cdot \int_{a_{th}}^{a_n} f(a, D_1) da = B, \text{ то при } B < 0 \text{ принимается } |B| \\ \text{при } A \text{ или } B < 1 \cdot 10^{-4} \text{ принимается } A \text{ или } B = 1 \cdot 10^{-4} \end{array} \right. \quad (13)$$

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход к оценке вероятности обнаружения сигнала в широком диапазоне SNR на основе анализа распределения амплитуд сигнала и шума в каждом конкретном фрагменте записи АЭ. Указанный подход имеет ряд существенных преимуществ:

1) он универсальный, т.к. позволяет анализировать кадры записи АЭ, зарегистрированные как по превышению порога, так и в беспороговом режиме записи АЭ;

2) он позволяет оценить эффективность применения амплитудного детектора для обнаружения сигналов на уровне шума по каждому их типу (виду) с учетом их трансформации при распространении по объекту или без учета нее, как до, так и после применения процедур фильтрации и шумоподавления записей АЭ. При этом форма сигнала (импульсная или непрерывная АЭ, одно- или многомодальная) не играет особого значения, т.к. в предложенной расчетной схеме она по отсчетам сводится к функции распределения выбросов амплитуды в кадре записи АЭ, что нивелирует влияние как формы сигнала, так и наличия нескольких однотипных неперекрывающихся сигналов в анализируемом фрагменте записи;

3) он применим для оценки P_{oc} при одновременном действии нескольких источников АЭ, генерирующих волны сопоставимой амплитуды.

Для повышения точности оценки вероятности обнаружения импульсных сигналов их функции распределения выбросов амплитуды следует получать по экспериментальным или модельным данным, а в случае анализа сигналов непрерывного вида может быть достаточно использованного в работе допущения о нормальном распределении. Установлено, что амплитудное детектирование сигналов возможно, начиная с уровня порога $a_{th} > a_n + 0,9$ дБ, при наличии выбросов амплитуды в шуме не более $a_n = \sigma_1 - 7,5$ дБ при $a_s > \sigma_2 + 6$ дБ и $a_n = \sigma_1 - 11$ дБ при $a_s \approx \sigma_2$. В противном случае качественное и устойчивое детектирование сигнала по порогу в амплитудно-временной области анализа АЭ не может быть обеспечено и поэтому следует переходить на использование альтернативных способов обнаружения сигналов в шуме (использование критериев оценки разладки временного ряда [18—20] или изменения спектральных характеристик [21], или др. способов выявления признаков сигнала в шуме).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-19-00585.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hase A. Early detection and identification of fatigue damage in thrust ball bearings by an acoustic emission technique // Lubricants. 2020. V. 8. No. 3. P. 37.
2. Stepanova L.N., Chernova V.V., Ramazanov I.S. Acoustic emission testing of early generation of defects in cfrp samples under static and thermal loading // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No 10. P. 784—794.
3. Choe C., Chen C., Nagao S., Saganuma K. Real-time acoustic emission monitoring of wear-out failure in SiC power electronic devices during power cycling tests // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. V. 36. No. 4. P. 4420—4428.

4. *Rodgers M.* The Use of a Floating Threshold for Online Acoustic Emission Monitoring of Fossil High Energy Piping: Newsletter // Acoustic Emission Consulting. 1994. Ver. 1. 6 p.
5. *Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V.* Estimation of time-of-arrival errors of acoustic-emission signals by the threshold method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. V. 45. No. 4. P. 273—279.
6. *Stepanova L.N., Kanifadin K.V., Ramazanov I.S., Kabanov S.I., Lebedev E.Y.* Clustering of sources of acoustic-emission signals by the leading-edge rise rate // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. V. 45. No. 10. P. 685—692.
7. *Гуж В.И., Наконечная О.А.* Алгоритмы численного определения временных характеристик сигналов акустической эмиссии // Математическое и компьютерное моделирование. Серия: Технические науки. 2012. Вып. 6. С. 73—87.
8. *Davydova D.G., Kuz'min A.N., Rizvanov R.G., Aksel'rod E.G.* Identification of acoustic emission sources during testing of technological equipment with a high noise level // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 5. P. 292—302.
9. *Barat V., Borodin Y., Kuzmin A.* Intelligent AE signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. 2010. V. 28. P. 109—119.
10. *Костюков В.Н., Науменко А.П.* Оценка риска выбора нормативных величин диагностических признаков // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. No. 4. С. 150—154.
11. *Tang J., Soua S., Mares C., Gan T.-H.* An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades // Renewable Energy. 2016. V. 99. P. 170—179.
12. *Ivanov V.I., Vlasov I.E.* Some problems of nondestructive testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2002. V. 38. No. 7. P. 547—556.
13. *Khoroshavina S.G.* Probabilistic models for estimating the acoustic-emission test confidence for composite materials in point and bracket versions // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2000. V. 36. No. 3. P. 175—181.
14. *Barat V., Marchenkov A., Ivanov V., Bardakov V., Elizarov S., Machikhin A.* Empirical approach to defect detection probability by acoustic emission testing // Applied Science. 2021. V. 11. Is. 20. Art. number 9429. 18 p.
15. *Sause M.G.R., Linscheid F.F., Wiehler M.* An experimentally accessible probability of detection model for acoustic emission measurements // Journal of Nondestructive Evaluation. 2018. V. 37. Is. 2. Art. number 17. 12 p.
16. *Pollock A.A.* A PoD model for acoustic emission — Discussion and status // AIP Conference Proceedings. 2010. V. 1211. P. 1927—1933.
17. *Builo S.I., Builo B.I., Chebakov M.I.* Probabilistic-information approach to assessing the reliability of the results of the acoustic-emission method of testing and diagnostics // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. P. 375—382.
18. *Sedlak P., Hirose Y., Khan S.A., Enoki M., Sikula J.* New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates // Ultrasonics. 2009. V. 49. P. 254—262.
19. *Van der Baan M., Vaezi Y.* Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection // Geophysical Journal International. 2015. V. 203. P. 1896—1908.
20. *Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A.* New method of low amplitude signal detection and its application in acoustic emission // Applied Sciences. 2020. V. 10. No. 1. P. 73.
21. *Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I., Vinogradov A.Yu.* A time-frequency based approach for acoustic emission assessment of sliding wear // Lubricants. 2020. V. 8. No. 5. P. 52.