

УДК 667.64: 678.02

В.В.МАРАСАНОВ, А.В.ШАРКО, А.А.ШАРКО
Херсонський національний технічний університет**СИСТЕМНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ИСТОЧНИКАМ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Представлен анализ применимости критериев качества к оценке технического состояния объектов по источникам акустических сигналов, выполненный на основе рассмотрения физической сущности, основополагающих принципов и математической обработки результатов измерений. С позиций надежности акустико-эмиссионного контроля и качества полученной информации рассматриваются факторы неопределенности влияния дефектов на эксплуатационные характеристики изделий. Установлены причинно-следственные связи рабочих характеристик акустических сигналов с параметрами развивающихся дефектов. Предложена градация источников сигналов акустической эмиссии по степени безопасности работы оборудования. Приводится системная классификация критериев, областей их применения и рационального использования при решении практических задач акустико-эмиссионного контроля. Намечены пути повышения надежности оценки технического состояния объектов по сигналам акустической эмиссии, связанные с уменьшением погрешности локализации параметров акустических сигналов, повышением пороговой чувствительности контроля и установлением последовательности использования метода в комплексной системе неразрушающих испытаний.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, критерии, анализ, применимость, техническое состояние.

В.В.МАРАСАНОВ, О.В.ШАРКО, А.О.ШАРКО
Херсонський національний технічний університет**СИСТЕМНА КЛАСИФІКАЦІЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДЖЕРЕЛАМИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ**

Представлений аналіз застосовності критеріїв якості до оцінки технічного стану об'єктів за джерелами акустичних сигналів, виконаний на основі розгляду фізичної сутності, основних принципів та математичної обробки результатів вимірювань. З позицій надійності акустико-емісійного контролю та якості отриманої інформації розглядаються фактори невизначеності впливу дефектів на експлуатаційні характеристики виробів. Встановлено причинно-наслідкові зв'язки робочих характеристик акустичних сигналів з параметрами країн дефектів. Запропонована градация джерел сигналів акустичної емісії за ступенем безпеки роботи обладнання. Наводиться системна класифікація критеріїв, областей їх застосування та раціонального використання при вирішенні практичних завдань акустико-емісійного контролю. Намічені шляхи підвищення надійності оцінки технічного стану об'єктів за сигналами акустичної емісії, що пов'язані з зменшенням похибки локалізації параметрів акустичних сигналів, підвищенням порогової чутливості контролю та встановленням послідовності використання методу в комплексній системі неруйнівних випробувань.

Ключові слова: акустична емісія, критерії, аналіз, застосовність, технічний стан.

V.V.MARASANOV, A.V.SHARKO, A.A.SHARKO
Kherson National Technical University**SYSTEM CLASSIFICATION CRITERIA OF ESTIMATION THE TECHNICAL STATE OF OBJECTS ON SOURCES OF ACOUSTIC SIGNALS**

Presents an analysis the applicability of quality criteria to the assessment the technical state of facilities by source of acoustic signals, is made on the basis of consideration physical nature, the fundamental principles and mathematical processing of measurement results. From the standpoint of reliability acoustic emission control and the quality the information received deals with the uncertainties the influence of defects on operating characteristics of products. Establish cause-effect relations performance characteristics of acoustic signals with the parameters of developing defects. Proposed gradation of sources signals acoustic emission on the safety the equipment. The system provides classification criteria, their areas of application and rational use in solving practical problems of acoustic-emission control. The ways of increase reliability estimation technical condition of objects by the acoustic emission signals associated with the decrease in localization error

the parameters of acoustic signals, increasing the threshold of sensitivity the control and sequencing the method in a complex system non-destructive testing.

Keywords: acoustic emission, criteria, analysis, applicability, technical state.

Постановка проблемы

Метод акустической эмиссии (АЭ) обеспечивает выявление развивающихся дефектов путем регистрации и анализа акустических сигналов, возникающих в процессе пластической деформации и роста трещин в материале. При проведении АЭ контроля приходится иметь дело с совокупностью одновременно протекающих процессов. Наряду с образованием трещин происходят упругая деформация с бездефектной перестройкой структуры металла и пластическая деформация, вызывающая зарождение микротрещин. Поэтому в виду недостаточности информации о влиянии дефектов на эксплуатационные характеристики изделий приходится использовать ряд различных и часто противоречивых критериев оценки технического состояния объектов.

Актуальность проблемы обуславливается необходимостью построения системной классификации критериев оценки технического состояния объектов, по источникам сигналов АЭ при решении практических задач акустико-эмиссионного контроля.

Анализ последних достижений и публикаций

Окончательные оценки допустимости дефектов, выявленных при испытаниях методом акустической эмиссии осуществляются при использовании дополнительных видов неразрушающего контроля и анализе измеренных параметров сигналов акустической эмиссии на основе нормативных документов, методов механики разрушений и методик расчета конструкций на прочность [1-9]. По результатам идентификации источников АЭ сигналов в соответствии с критериями опасности принимается заключение о дальнейшей эксплуатации конструкций. Установление взаимосвязи измеряемых рабочих характеристик АЭ со структурными параметрами вещества, составляет одну из нерешенных задач АЭ контроля и механики разрушений.

Формулирование цели исследования

Целью работы является анализ применимости критериев качества к оценке технического состояния объектов по результатам акусто-эмиссионного контроля.

Изложение основного материала исследования

АЭ метод контроля может быть использован для оценки технического состояния объекта и его диагностики, а также скорости развития дефекта. АЭ контроль обеспечивает организацию и проведение испытаний сосудов высокого давления, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов, работающих при избыточном давлении и производится только при создании в конструкции напряженного состояния вызванного давлением и температурным полем.

Неопределенность в оценке влияния дефектов, выявленных методом АЭ на эксплуатационные характеристики объектов, обуславливается недостаточной надежностью и ограниченным количеством информации, полученной в результате испытаний. Она порождается многими факторами, основными из которых являются:

- необходимость учета большого количества показателей;
- ограничения во времени и в пространстве на которые распространяется решение;
- неполнота и неадекватность информации;
- низкое качество прогнозных оценок;
- низкая точность информации, ее изменчивость и многозначность;
- неоднозначность причинно-следственных связей;
- слишком высокая плата за установление определенности;
- отсутствие необходимых знаний.

Классификация видов неопределенности в задачах АЭ контроля представлена на рис. 1.

Оценка допустимых дефектов, выявленных методом АЭ осуществляется путем анализа рабочих характеристик и параметров акустических сигналов в соответствии с критериями безопасности работы оборудования. Схема таких взаимодействий представлена на рис. 2.

Результаты АЭ контроля представляются в виде перечня зарегистрированных источников АЭ, отнесенных к тому или иному классу, в зависимости от значения параметров АЭ. В качестве таких параметров используются:

- скорость счета;
- число импульсов;
- порог обнаружения;
- число выбросов в предыдущем событии;
- число выбросов в последующем событии.

При разработке критериев технического состояния объектов по источникам акустической эмиссии приходится сталкиваться с решением задач классификации обнаруженных дефектов и прогнозирования их развития.

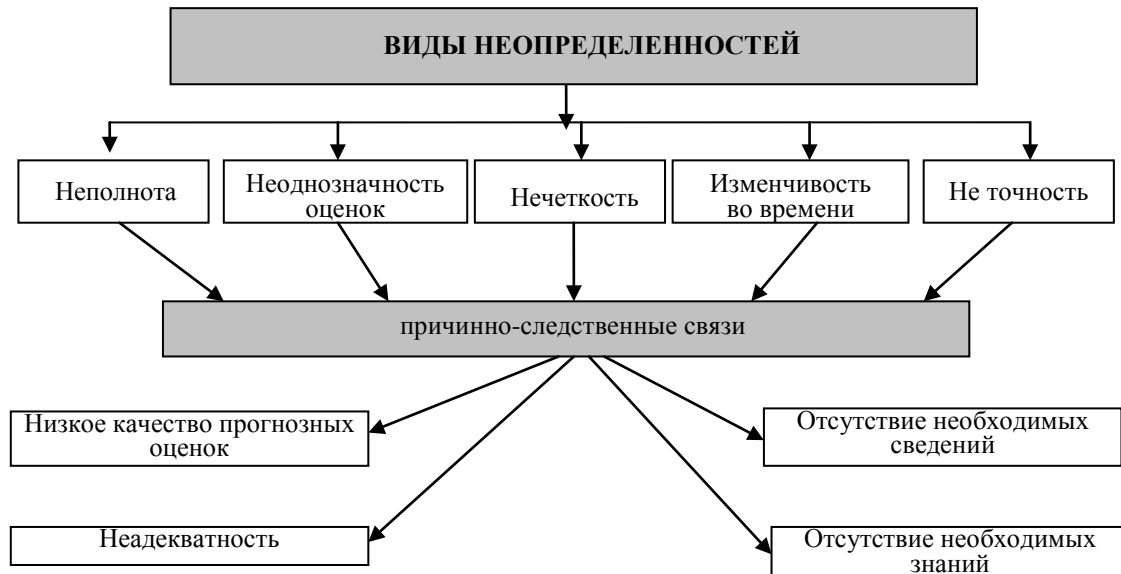


Рис. 1. Показатели и факторы неопределенности в задачах акустико-эмиссионного контроля

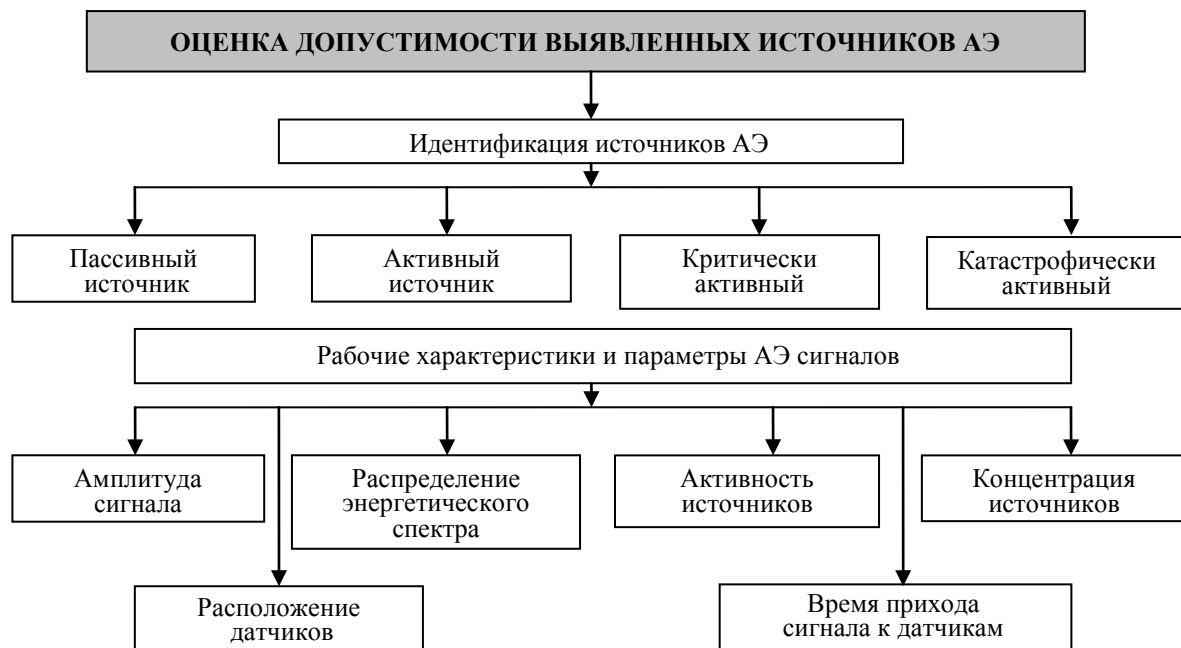


Рис. 2. Идентификация источников и рабочих характеристик АЭ контроля

Задача классификации дефектов требует при своем решении установлении браковочных норм, выражающихся в значениях минимальных размеров недопустимых дефектов. Браковочные нормы могут выражаться в ограничениях на количество дефектов, форму, ориентацию, взаимное расположение.

Задача прогнозирования развивающихся дефектов требует при своем решении установления соответствий состояния материала и скорости его изменения. Согласно [1] состояние материала можно условно разделить на области:

- упругой деформации;

- пластической деформации;
- образования субмикро- и микротрещин;
- слияния зародышевых микротрещин;
- образование магистральных трещин;
- развития магистральных трещин разрушения.

Между этими областями нет резких границ. Кроме этого состояние характерное для каждой области зарождается раньше его проявления. Их взаимный масштаб также различен, поэтому фактор состояния материала принято считать изменяющимся во времени. АЭ представляет собой нестационарный процесс и для анализа следует использовать ограниченные отрезки реализации, в которых процесс можно считать квазистационарным.

Функцией акусто-эмиссионной системы является обнаружение и правильная оценка каждого дефекта, измеряемый параметр которого X равен или превышает установленное нормативно-технической документацией значение X_0 . В результате контроля в изделиях, признанных годными, не должно быть недопустимых дефектов с параметрами $X \geq X_0$, но при этом должны быть забракованы только те изделия, в которых имеются недопустимые дефекты.

Таким образом, оценка показателей надежности АЭ контроля и классификации допустимых дефектов сводится к отнесению принятой информации либо к сигналу от развивающегося дефекта, либо к помехам и установлению связей сигналов с характером обнаруженного дефекта. Классификация критериев оценки технического состояния объектов, контролируемых методом акустической эмиссии представлена на рис. 3.

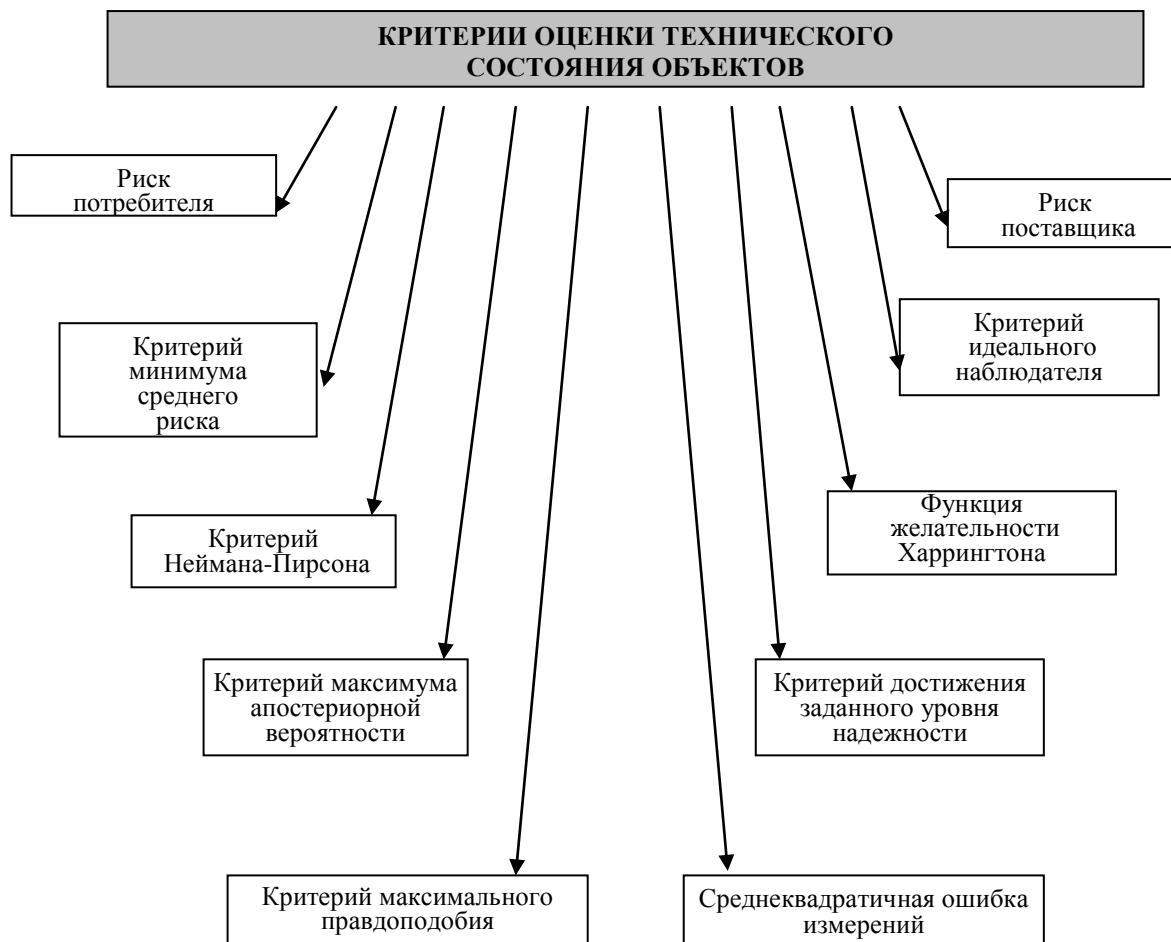


Рис. 3. Критерии технического состояния объектов при АЭ контроле

В общем случае оценка надежности контроля характеризуется пропусками и перебраковкой изделий и выражается целым комплексом вероятностных показателей:

- отсутствием брака в заданной партии изделий;
- отсутствием брака в партии изделий после контроля;

- отсутствием недобраковки;
- правильной оценкой годности изделий;
- правильной оценкой изделий, содержащих брак.

Как пропуск бракованных изделий, так и отнесение годных изделий к разряду бракованных является нарушением процесса контроля и характеризует его качество [2,3]. Если первое из этих нарушений непосредственно связано с эксплуатационной надежностью изделий, выражая риск потребителя, то последнее определяет дополнительные экономические затраты, приводящие к повышению себестоимости изделий и выражает риск поставщика. Суммарный риск поставщика и потребителя определяется с помощью критерия идеального наблюдателя.

Для критерия идеального наблюдателя стоимости перебраковки C_1 и недобраковки C_2 считаются равными и количественный показатель надежности G может быть выражен как:

$$G = 1 - (F + \beta),$$

где F – вероятность недобраковки;
 β – вероятность перебраковки.

Последствия недобраковки и перебраковки различны, поэтому и различны и критерии решения задач оптимизации системы контроля [8,9]. Наиболее осторожным критерием считается критерий минимума среднего риска R , оцениваемый функцией:

$$R = C_1\beta + C_2F.$$

В качестве параметра функции R выбирают браковочный уровень X_0 , который должен быть одинаково приемлем как для поставщика, заинтересованного в минимуме перебраковки, так и для заказчика, заинтересованного в недобраковке. Критерии минимума среднего риска применяют в тех случаях, когда ожидаются большие потери при пропуске некачественных изделий, а критерии идеального наблюдателя в тех случаях, когда велики потери за счет неправильной классификации качественных изделий.

Задача выбора оптимального решающего правила при АЭ контроле изделий является задачей статистического распознавания нормально изготовленных и бракованных объектов [5,7]. При распознавании дефектов сигналы АЭ предъявляются в виде совокупности наблюдений, записываемых в виде матрицы:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} \cdot x_{12} \cdots x_{1n} \\ x_{21} \cdot x_{22} \cdots x_{2n} \\ \vdots \\ x_{p1} \cdot x_{p2} \cdots x_{pn} \end{bmatrix}.$$

Каждый столбец матрицы представляет собой вектор наблюдаемых параметров сигналов АЭ. В теории статистических решений все виды решающих правил основаны на формировании отношения правдоподобия L и его сравнении с определенным порогом c :

$$L = \frac{f_n(x_1, \dots, x_n | a_2)}{f_n(x_1, \dots, x_n | a_1)} \geq c,$$

где $f_n(x_1, \dots, x_n | a_j)$ – плотность вероятности значений x_1, \dots, x_n при условии их принадлежности классу a_j . Решающее правило при $k=2$ имеет вид:

$$L = \frac{f(x_1, \dots, x_n | a_2) \geq \frac{\Pi_{12} - \Pi_{11}P(a_1)}{\Pi_{21} - \Pi_{22}P(a_2)},$$

где $\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} \end{bmatrix}$ - матрица потерь, элемент Π_{ki} которой количественно выражает потери от неправильно принятого решения $P(a_j)$ - априорные вероятности классов. Критерии максимального правдоподобия прост в вычислениях, так как не требует знания априорных вероятностей классов и функции потерь.

$$a = \begin{cases} a_2, \text{если } L(x_n) \geq 1 \\ a_1, \text{если } L(x_n) < 1 \end{cases} .$$

Поэтому он широко применяется в практических задачах распознавания образов. Обозначим через α_k – вероятность правильного отнесения сигнала к соответствующему классу и через β_k вероятность отнесения АЭ сигнала к классу, к которому он не принадлежит. Отнесение сигнала не к тому классу, к которому он на самом деле принадлежит является ошибкой 1-ого рода. Отнесение сигнала к какому-либо определенному классу, к которому он на самом деле не принадлежит является ошибкой 2-ого рода. При двух классах выполняется равенство $\alpha_1 = \beta_2$ и $\alpha_2 = \beta_1$ и вероятности α_1 и β_1 совпадают с вероятностями ошибок 1-ого и 2-ого рода (рис.4).

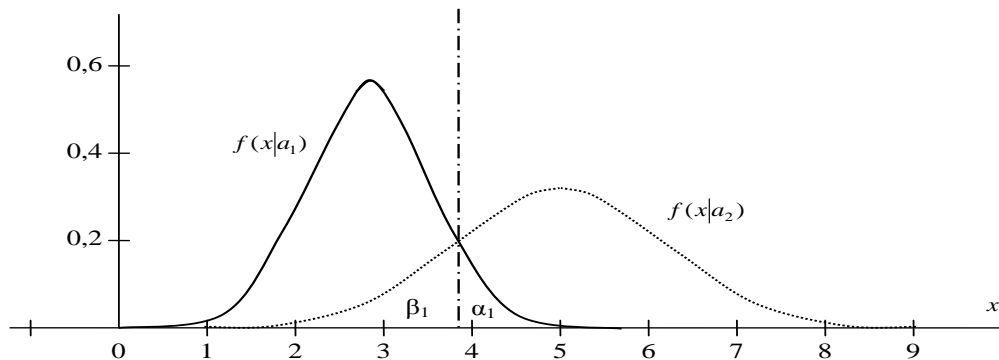


Рис. 4. Плотности вероятностей наблюдений сигналов АЭ и их принадлежности к классам a1 и a2

Когда матрица потерь неизвестна используется критерий максимума апостериорной вероятности, согласно которому наблюдение x_n принадлежит к классу a_j , чья апостериорная вероятность равна $P(a_j|x_n)$ и превышает апостериорные вероятности остальных классов:

$$a = \begin{cases} a_2, \text{если } L(x_n) \geq P(a_1)/P(a_2) \\ a_1, \text{если } L(x_n) < P(a_1)/P(a_2) \end{cases} ;$$

$$P(a_j|x_n) = \frac{P(a_j)f(x_n|a_j)}{\sum_{k=1}^K P(a_k)f(x_n|a_k)} .$$

Для построения алгоритма классификации сигналов АЭ по критерию максимального правдоподобия необходимо определить точки пересечения графиков плотностей вероятностей:

$$L(x) = \frac{f(x, m_1, \sigma_1)}{f(x, m_2, \sigma_2)} = 1 .$$

Если возникают трудности в оценке потерь следует использовать критерий Неймана-Пирсона. В этом случае исходят из заданных допустимых вероятностей правильной и ложной классификации

контролируемых изделий. Использование данного критерия целесообразно, если одну из вероятностей ошибок можно задать как основную.

При контроле особо ответственных изделий, когда последствия выхода из строя не соизмеримы с затратами на перебраковку, используют критерий достижения заданного уровня надежности.

$$G_0 = 1 - F.$$

Показателем надежности, объединяющим характеристики процесса контроля и технического состояния объекта, является использование функции желательности Харрингтона [6]. Для этого вводится искусственная метрика, в которой набор откликов ставится в соответствие со стандартным аналогом, т.е. рассчитываются частные желательности функции d_i :

$$d_i = \exp[-\exp(-y_i)] = e^{-e^{-y_i}},$$

где y_i - значение i -того частного отклика, переведенное в безразмерную шкалу желательности d_u ($u = 1, 2, \dots, n$) (рис. 5).

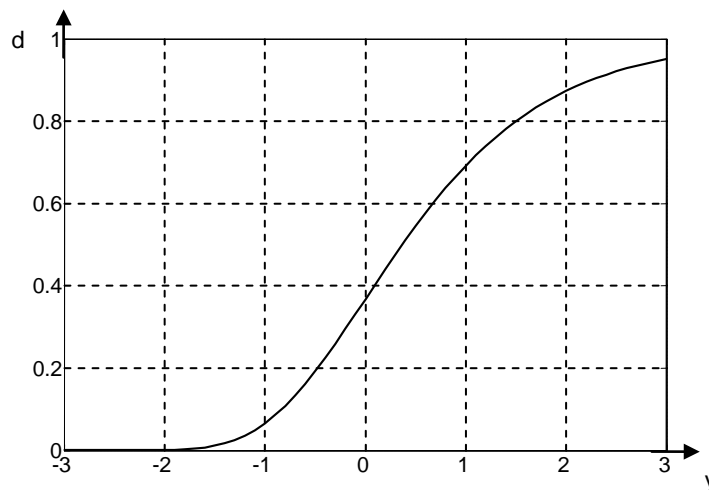


Рис. 5. Функция желательности Харрингтона

Шкала желательности имеет интервал от 0 до 1. Значение $d_u = 0$ соответствует абсолютно неприемлемому уровню качества, а значение $d_u = 1$ самому лучшему значению (табл. 1).

Таблица 1

Интервальная шкала качества АЭ контроля

Ранг	Качество	Интервал числовых значений
1	Очень хорошее	0,8-1,0
2	Хорошее	0,63-0,80
3	Удовлетворительное	0,37-0,63
4	Плохое	0,20-0,37
5	Очень плохое	0

Обобщенная функция желательности вычисляется как среднее геометрическое частных желательностей:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}$$

где n - число анализируемых показателей.

Этот прием требует привлечения априорной информации о вкладе данного параметра в общую желательность системы контроля.

Особое место среди критериев технического состояния объектов при АЭ контроле следует отдать среднеквадратичной оценке измерений, где для заданных значений параметров нормальных законов распределения (m_1, σ_1) и (m_2, σ_2) , характеризующих два класса объектов наблюдения a_1 и a_2 , определяются плотности вероятности результатов наблюдения $f(x|a_1) = f(x, m_1, \sigma_1)$ и $f(x|a_2) = f(x, m_2, \sigma_2)$.

Измеряемые значения признака объекта x представляют собой реализации случайной величины с плотностью распределения $f(x, m, \sigma)$ равной:

$$f(x, m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Количественная оценка надежности метода АЭ определяется ее показателями, которые характеризуют результат контроля как детерминированное событие, заключающееся в обнаружении дефекта, и как случайное событие, где вероятность заключения о пригодности изделия определяется частотой появления сигналов АЭ в достаточно длинной последовательности наблюдений. Поэтому основными методами, используемыми для оценки надежности контроля являются статистические.

Числовой характеристикой надежности является правильность отнесения математического ожидания измеряемого параметра АЭ к разряду годного m_A или дефектного m_B состояния со среднеквадратичными отклонениями S_A и S_B .

Величину риска от принятия неправильного решения о пригодности контролируемого изделия к дальнейшей эксплуатации определяют через отношение среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию.

С учетом этого при оценке качества АЭ контроля возможны следующие варианты:

$m_A = m_B$	$S_A < S_B$
$m_A > m_B$	$S_A < S_B$
$m_A > m_B$	$S_A = S_B$
$m_A > m_B$	$S_A > S_B$
$m_A < m_B$	$S_A < S_B$

В первых трех случаях естественно преимущество варианта А. В двух последующих случаях выбор заключения определяется субъективным отношением к риску. В частности при $m_A > m_B$ и $S_A > S_B$ отнесение математического ожидания измеряемого параметра АЭ к разряду годного состояния больше чем к дефектному, однако, и риск или ошибка в правильности этого заключения выше. В последнем случае $m_A < m_B$ и $S_A < S_B$, хотя риск в принятии некачественного заключения о пригодности изделия к дальнейшей эксплуатации меньше, однако, ситуация обнаружения дефектного изделия. В особо ответственных случаях это требует введения дополнительного метода неразрушающего контроля. Реализация критерия может быть проиллюстрирована на плоскости m и S (рис.6).

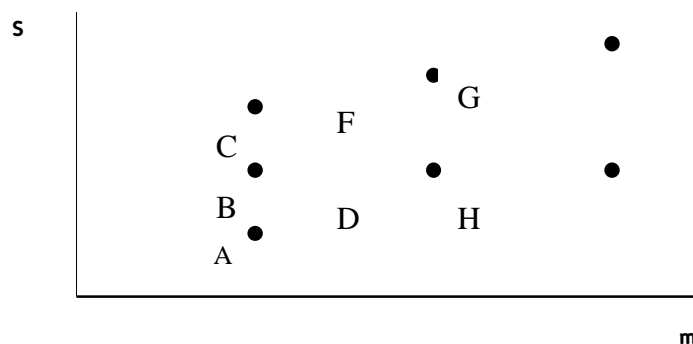


Рис. 6. Реализационная структура критерия

Как следует из рис.6 среди представленных реализаций предпочтение следует отдать варианту *A*, т.к. для него среднееквадратичное отклонение меньше чем в *B* и *C*. Из вариантов *B*, *D* и *H* предпочтение следует отдать варианту *H*, как имеющему большее значение *m*. Недостаток рассматриваемого критерия заключается в необходимости разделения нестационарного процесса АЭ на ряд мелких квазистационарных процессов.

Сравнительный анализ критериев технического состояния объектов при АЭ контроле представлен в табл.2.

Таблица 2

Критерии технического состояния объектов по источникам сигналов АЭ

Наименование критерия	Преимущества	Недостатки
Риск потребителя	Низкая стоимость АЭ контроля	Пропуск бракованных изделий, снижение эксплуатационной надежности
Риск поставщика	Минимизация неблагоприятной ситуации и возможных потерь	Перебраковка годных изделий, повышение их себестоимости
Критерий идеального наблюдателя	Суммарный риск потребителя и поставщика	Стоимость перебраковки и недобраковки считается равной, хотя последствия их различны
Критерий минимума среднего риска	Исключение больших потерь при пропуске некачественных изделий	Высокая стоимость АЭ контроля
Среднеквадратичная ошибка контролируемого параметра	Возможность статистической обработки результатов	Необходимость разделения нестационарного процесса АЭ на ряд квазистационарных
Функция желательности Харрингтона	Приведение частных откликов к безразмерному виду	Субъективизм, привлечение априорной информации
Критерий Неймана-Пирсона	Не требуется априорной информации о вероятностях состояний	Необходимость знания допустимых вероятностей правильной и ложной классификации дефектов
Критерий максимального правдоподобия	Несложность вычислительных операций	Минимизация размерностей признакового пространства снижает достоверность заключений
Критерий апостериорной вероятности	Исключается необходимость использования матрицы потерь	Необходимость знания априорных вероятностей

Следует отметить области применения классических критериев, связанных с качеством самого процесса контроля и статистических критериев, связанных с оценкой параметров дефектов. Как показывает анализ процесса АЭ на начальной стадии излучение сигналов характеризуется значительной интенсивностью и малыми амплитудами. В этом случае справедливы методы статистического анализа. Образование и развитие дефектов сопровождается сигналами большой амплитуды, но следующими со значительными интервалами [1]. В этом случае решение необходимо принимать по единичным отсчетам и статистические методы обработки для оценки параметров таких сигналов непригодны. Поэтому предпочтение следует отдавать классическим критериям.

Одним из путей повышения надежности контроля является уменьшение погрешностей оценки параметра X . Другим путем является повышение поисковой чувствительности, но при контроле изделий на уровне $X \geq X_0$, возрастает перебраковка. Для ее уменьшения повторно проверяют забракованную партию изделий. В случае выявления источников АЭ в месте их расположения проводят контроль другими методами неразрушающего контроля. При этом сокращается объем испытаний применяемых методов неразрушающего контроля, т. к. их использование в качестве основных требует сканирования всей поверхности контролируемого объекта.

Еще одним путем повышения надежности контроля является изменение последовательности использования метода АЭ и других методов неразрушающего контроля.

В случае обнаружения дефекта одним из методов неразрушающего контроля метод АЭ используют для слежения за развитием этого дефекта.

Выводы

АЭ контроль проводят во всех случаях, когда проведение неразрушающего контроля другими методами затруднительно или невозможно. Его также используют в качестве сопровождающего метода при проведении гидроиспытаний объектов, а также остаточного ресурса.

Выполненный анализ применимости критериев качества технического состояния объектов по источникам АЭ на основе рассмотрения физической сущности, основополагающих принципов и математической обработки результатов измерений позволил составить их системную классификацию областей применения и рационального использования с учетом достоинств и недостатков. Показано, что какой бы параметр дефекта не был бы положен в основу браковочных норм его оценка при контроле методом АЭ связана с определенными погрешностями, которые необходимо учитывать при выборе критериев годности изделий. Поэтому принятие решений о пригодности контролируемых изделий в дальнейшей эксплуатации следует проводить при наличии компромиссов между поставщиками и потребителями выпускаемой продукции. Все индикации, вызванные источниками АЭ, должны быть оценены другими методами неразрушающего контроля.

Список использованной литературы

1. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К.Б. Вакара. М.: Атомиздат, 1980. – 216с.
2. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. М.: Стандарты, 1987. – 218с.
3. Андрейкин А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А.Е. Андрейкин, Н.В. Лысак. К.: Наукова думка, 1989. – 137с.
4. Трухаев Р.И. Методы принятия решений в условиях неопределенности / Р.И. Трухаев. М.: Наука, 1981. – 258с.
5. Фомин Я.А. Статистическая теория распознавания образов / Я.А. Фомин, Г.Р. Тарловский. М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
6. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // А.В.Пичкалев // Вестник КГТУ. 2012. - №2. – С. 197-201.
7. Васильева И.К. Методы распознавания образов. / И.К.Васильева, П.Е. Ельцов // Х.: Нац. аэрокосм.ун.-т, 2008. – 56с.
8. РД 03-131-97 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов, 1997. – 37с.
9. ASTM E 650-92 Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors.