

А. В. Яковлев, С. В. Балдычев

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, e-mail: [versy59@yandex.ru](mailto:versy59@yandex.ru)

## Алгоритм нечеткой логики в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС

Получена 23.05.2024, опубликована 14.06.2024

Представлена актуальная версия алгоритма комплексной оценки степени опасности акустических импульсов, реализованного с использованием метода нечеткой логики в программном обеспечении системы акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС. Подробно описаны логические правила и параметры акустических импульсов, необходимые для применения алгоритма. Приведен пример использования этого алгоритма при акустико-эмиссионной диагностике крупногабаритного объекта.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, цифровая обработка сигналов, нечеткая логика

### ВВЕДЕНИЕ

Метод акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики использует явление акустической эмиссии — излучение ультразвуковых импульсов в результате быстрых структурных изменений в локальных областях твердого тела. АЭ - носитель информации обо всех процессах, предшествующих и сопутствующих разрушению конструкции, таких как пластическое деформирование объемов материала, появление, развитие и слияние микротрещин, скачкообразный рост макротрещин. Исследования в области АЭ-диагностики тесно смыкаются с проблемами прочности и долговечности конструкций.

В настоящее время в проектировании и изготовлении судокорпусных конструкций сложились следующие тенденции:

- 1) использование новых высокопрочных материалов с малым запасом пластичности предъявляет повышенные требования к размерам допустимых дефектов вплоть до пересмотра нормативных документов неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД);
- 2) изготовление конструкций большой толщины, контроль которых традиционными методами НК невозможен, вызывает более активное использование метода АЭ-диагностики и постановку перед ним новых задач;

- 3) проектирование крупногабаритных конструкций с требованиями 100% контроля сварных швов обуславливает использование АЭ-диагностики с целью сокращения объемов работ по НК.

Современные АЭ-системы способны регистрировать широкополосные сигналы в частотном диапазоне 100-700 кГц и выше [1, 2, 3], предоставляя встроенному программному обеспечению (ПО) богатый набор параметров сигналов, включая различные характеристики их формы и частотного состава. К сожалению, методически утвержденные, классические подходы критериального анализа АЭ-информации по-прежнему используют ограниченный набор несложных параметров, таких как амплитуда, энергия, количество импульсов. В ПО АЭ-системы КАЭМС (ранее МАЭС) более 20 лет используется современный алгоритм анализа АЭ-информации, базирующийся на цифровой обработке волновых форм импульсов [2], который апробирован как при испытаниях образцов, так и крупногабаритных объектов [4, 5, 6].

## 1. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ИМПУЛЬСА

В ПО АЭ-системы КАЭМС оценку степени опасности акустических импульсов производят в реальном времени на основе вычисления параметра «Опасности» («Danger») для каждого из зарегистрированных сигналов. Параметр «Danger» является обобщенной характеристикой акустического импульса, которая показывает степень его приближения к высокоамплитудному, дискретному и высокочастотному импульсу АЭ-природы, типичному для акта микроразрушения.

Параметр «Danger» формируется в результате совокупной оценки следующих параметров зарегистрированных импульсов:

$A$  — максимальная абсолютная амплитуда волновой формы импульса (дБ);

$W$  — параметр волновой формы импульса (%), характеризующий его уровень шума и определяемый как отношение средней абсолютной амплитуды импульса (мВ) к его максимальной амплитуде (мВ) и показывающий степень приближения волновой формы импульса к форме идеальной не импульсной помехи. Для сигналов типа дельта-функция (идеальный дискретный сигнал) параметр  $W=0$ , для сигналов типа константа (идеальный непрерывный сигнал) параметр  $W=100\%$ ;

$F$  — параметр высокочастотности импульса (%), определяемый как отношение средней амплитуды высокочастотных составляющих импульса (мВ) к средней амплитуде (мВ) зарегистрированного импульса. При этом высокочастотную составляющую получают путем фильтрации исходного импульса цифровым фильтром с частотой среза  $0,3fae$ , где  $fae$  — максимум частотного диапазона АЭ-аппаратуры с учетом используемых преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ).

Следует отметить, что основные компоненты вышеперечисленных параметров импульса вычисляются непосредственно в платах сбора данных АЭ-системы КАЭМС при цифровой обработке в микросхеме ПЛИС [2].

Таким образом, параметр «Danger» импульса ( $D$ ) является функцией 3-х переменных:

$$D = f(A, F, W). \quad (1)$$

Приведенная зависимость является эмпирической, и для ее вычисления в системе КАЭМС используется метод «нечеткой логики» [7, 8].

В частности, для амплитуды  $A$  акустического импульса введены понятия «малая», «средняя» и «большая» с соответствующими функциями принадлежности, как показано на рисунке 1. Амплитуды менее 50 дБ рассматриваются как безусловно малые, амплитуды более 75 дБ рассматриваются как безусловно большие. Диапазон амплитуд от 50 до 75 дБ имеет неоднозначное представление, например, значение 60 дБ с вероятностью 0,4 относится к малой амплитуде и с вероятностью 0,6 — к средней.

Аналогично, для параметра  $W$  введены понятия «малый», «средний» и «большой» (шум), а для параметра  $F$  введены понятия «низкий», «средний» и «высокий» (частота). Для большинства сигналов акустических помех параметр  $W$  находится в диапазоне 30-100%, а для сигналов АЭ-природы — в диапазоне 0-30%. Параметр  $F$  в диапазоне 0-10% типичен для низкочастотных сигналов помех, а в диапазоне более 30% — для сигналов АЭ от трещин.

Выходной параметр  $D$  задается совокупностью специальных функций принадлежности — «синглетонов» (одноточечные функции), которые показаны на рисунке 2. Текущее значение параметра  $D$  определяется их средневзвешенным значением.

Зависимость параметра  $D$  от параметров  $A$ ,  $W$ ,  $F$  задается следующим лингвистическим описанием в терминах нечеткой логики, определяющим нечеткую систему типа Сугено (Sugeno) [7].

Входные лингвистические переменные:

$$\begin{aligned} &\langle A, \{\text{«малая»}, \text{«средняя»}, \text{«большая»}\}, [0, 100] \rangle \\ &\langle W, \{\text{«малый»}, \text{«средний»}, \text{«большой»}\}, [0, 100] \rangle \\ &\langle F, \{\text{«низкий»}, \text{«средний»}, \text{«высокий»}\}, [0, 100] \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь в описании «нечеткой» переменной приводятся, соответственно, ее название, перечень лингвистических термов и диапазон определения.

Выходная переменная:

$$\langle D, \{0, 75, 250, 300, 350, 550, 600, 650, 1000\}, [0, 1000] \rangle \quad (3)$$

Логические правила:

$$\begin{aligned} &1: \text{ЕСЛИ } A \text{ малая ИЛИ } F \text{ низкий ИЛИ } W \text{ большой ТО } D=0 \\ &2: \text{ЕСЛИ } A \text{ средняя И } F \text{ средний И } W \text{ средний ТО } D=75 \\ &3: \text{ЕСЛИ } A \text{ средняя И } F \text{ средний И } W \text{ малый ТО } D=250 \\ &4: \text{ЕСЛИ } A \text{ средняя И } F \text{ высокий И } W \text{ средний ТО } D=350 \\ &5: \text{ЕСЛИ } A \text{ средняя И } F \text{ высокий И } W \text{ малый ТО } D=600 \\ &6: \text{ЕСЛИ } A \text{ большая И } F \text{ средний И } W \text{ средний ТО } D=300 \\ &7: \text{ЕСЛИ } A \text{ большая И } F \text{ средний И } W \text{ малый ТО } D=550 \\ &8: \text{ЕСЛИ } A \text{ большая И } F \text{ высокий И } W \text{ средний ТО } D=650 \\ &9: \text{ЕСЛИ } A \text{ большая И } F \text{ высокий И } W \text{ малый ТО } D=1000 \end{aligned} \quad (4)$$

Параметр  $D$  для импульсов, вызванных актами образования и скачкообразного подрастания трещин, стремится к своему максимальному значению (1000 усл. ед.), а для импульсов, вызванных помехами (низкоамплитудными сигналами, непрерывными сигналами утечек и механического трения, низкочастотными импульсами ударов и др.), близок к 0.

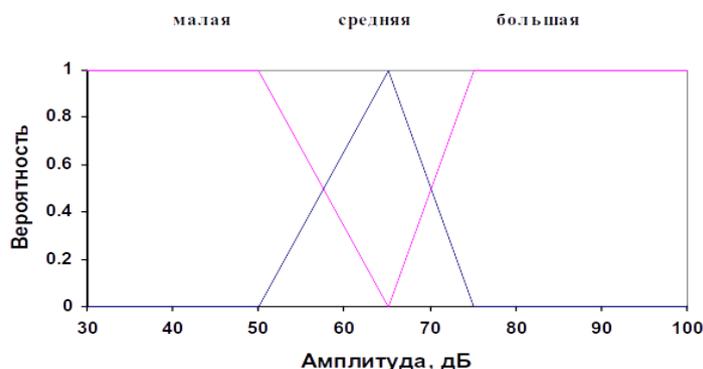


Рис. 1. Функции принадлежности параметра  $A$  в системе оценки «Опасности» импульса

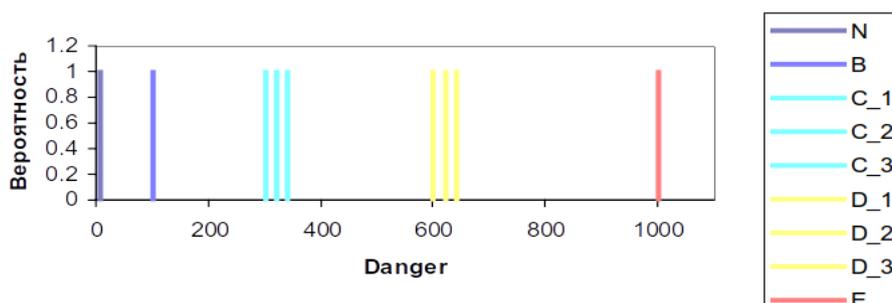


Рис. 2. Функции принадлежности параметра  $D$  в системе оценки «Опасности» импульса

Конкретный характер зависимости параметра  $D$  для различных классов объектов контроля и условий контроля определяется функциями принадлежности входных  $A$ ,  $W$ ,  $F$  переменных, которые формируются методами экспертной оценки на основе предварительных экспериментов. Оператор ПО КАЭМС имеет возможность корректировать узловые значения функций принадлежности параметров  $A$ ,  $F$ ,  $W$  (но не их тип) в настройках программы.

Для класса корпусных конструкционных сталей и сплавов при контроле крупногабаритных объектов большой толщины рекомендуется использовать узловые значения функций принадлежности параметров импульсов в координатах «параметр-вероятность», приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Узловые значения функций принадлежности параметров импульса в координатах «параметр-вероятность»

Параметр импульса	«малый», «низкий»	«средний»	«большой», «высокий»
$A, \text{дБ}$	(0;1) (50;1) (65;0)	(50;0) (65;1) (75;0)	(65;0) (75;1) (100;1)
$W, \%$	(0;1) (10;1) (20;0)	(10;0) (20;1) (30;0)	(20;0) (30;1) (100;1)
$F, \%^1$	(0;1) (10;1) (20;0)	(10;0) (20;1) (30;0)	(20;0) (30;1) (100;1)
Форма функции			

Использование нечеткой логической системы типа Сугено вместо популярной нечеткой системы типа Мамдани значительно повышает скорость вычислений параметра  $D$ , поскольку применяются несложные функции принадлежности входных параметров и синглтоны для выходных параметров.

Использовать алгоритмы нечеткой логики можно в средах для научных вычислений, таких как Matlab, Octave [7, 9], а также в библиотеках для языка программирования C++, например, fuzzyLite [10].

Параметр  $D$  акустического импульса может быть использован в реальном времени для фильтрации сигналов помех с помощью отбраковки импульсов с  $D$  меньше заданного уровня. Кроме того, в ПО АЭ-системы КАЭМС существует возможность построения различных зависимостей параметра  $D$  от других параметров, например, времени или нагрузки, а также от координат на линии или плоскости с наглядной цветовой индикацией величины Опасности.

## 2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

В качестве примера использования рассмотренной выше методологии оценки опасности импульсов АЭ рассмотрим некоторые результаты, полученные в ходе АЭ-диагностики системой КАЭМС при проведении гидравлических испытаний натурного образца одношовной сварной трубы, изготовленной по экспериментальной технологии сварки из стали класса прочности К60. Образец трубы имел длину 12 м, диаметр 1430 мм и толщину стенки 30 мм [11]. К торцам трубы были приварены переходные кольца и заглушки (полусферические днища), причем швы приварки были выполнены в V-образной разделке с заполнением шва только с внешней стороны.

На рисунке 3а показаны результаты АЭ-контроля, полученные при первом нагружении трубы до уровня 19,6 МПа, в форме графика распределения акустических событий в координатах  $X, Y$ . Пространство координат получено разверткой поверхности цилиндра, ось  $X$  направлена по оси трубы, а ось  $Y$  — по образующей. Очевидно, что такое распределение не позволяет достоверно оценить состояние объекта.

<sup>1</sup> С частотой среза  $0,3f_{ae}$ , где  $f_{ae}$  — максимум частотного диапазона АЭ-аппаратуры.

На рисунке 3б приведено распределение событий АЭ с цветовой градацией их опасности, полученное после отбраковки событий с параметром  $D < 500$  усл. ед. Видно, что большая часть событий, зарегистрированных на развертке трубы на рисунке 3а, имела незначительную опасность и не отобразилась на рисунке 3б. Оставшиеся на краях трубы события АЭ концентрируются в швах приварки днищ, которые не относятся к испытываемому объекту.

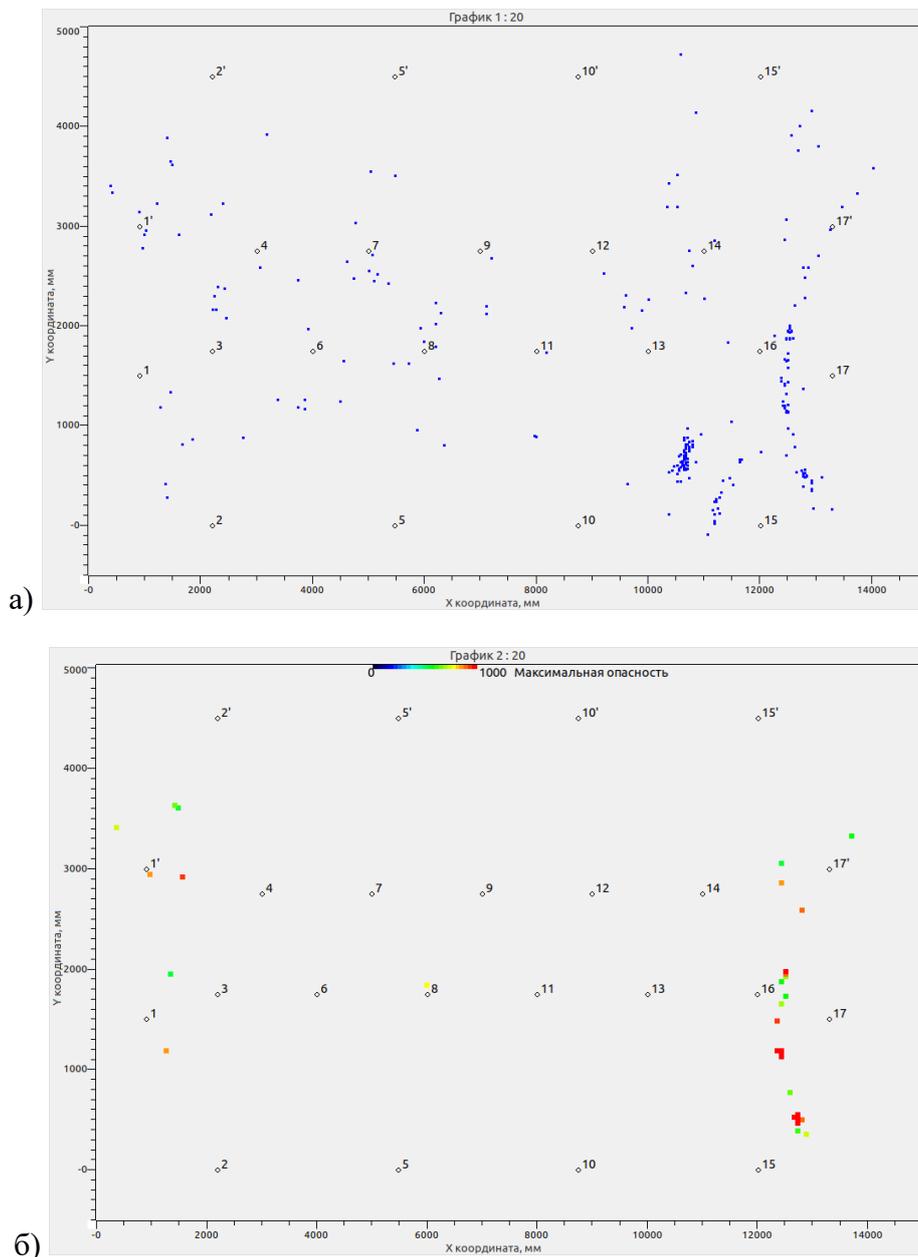


Рис. 3. Результаты локации событий при первом нагружении трубы:  
 а — для всех акустических сигналов;  
 б — для событий АЭ с параметром  $D > 500$  усл. ед.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подробно изложен алгоритм оценки обобщенной степени опасности акустических импульсов АЭ, вычисляемый по методу нечеткой логики и реализованный в ПО АЭ-системы КАЭМС.

Приведен пример практического использования этого алгоритма при гидравлических испытаниях натурального образца крупногабаритной трубы. Показано, что фильтрация сигналов с малыми значениями параметра «Опасность» позволяет оперативно обнаруживать потенциально опасные источники АЭ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуменюк В.А., Яковлев А.В., Сульженко В.А., Иванов Ю.Г. Многоканальная многофункциональная акустико-эмиссионная система диагностики состояний конструкций и сооружений. //Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. –1997. - Вып. 5 (289). - стр. 78-83.
2. Яковлев А.В., Соснин В.А. Цифровая обработка акустических импульсов в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС. [Электронный ресурс] // Техническая акустика. – Электрон. журн. – 2018. – 3. Режим доступа: <http://www.ejta.org>, свободный.
3. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. Акустико-эмиссионная система для регистрации непрерывных и дискретных сигналов. // Датчики и системы. – 2010. - №8. - стр. 55-59.
4. Гуменюк В.А., Сульженко В.А., Казаков В.А., Яковлев А.В. Система классификации степени опасности источников акустической эмиссии и критерии экспресс-оценки состояния объектов на основе нечеткой логики. // Контроль. Диагностика. - 2003. - №1. - стр. 49-53,57.
5. РД ИМЯН.219–2009 Монтажные сварные соединения. Трубопроводы воздушных и газовых систем изделий 21. Акустико-эмиссионный контроль. Методика.
6. Балдычев С.В. Применение комплексного параметра опасности источников АЭ к задаче определения момента страгивания трещины. // Труды Крыловского государственного научного центра. СПб., 2014. стр. 81-85.
7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. // СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 736 стр.
8. Прикладные нечеткие системы // Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. М.: Мир, 1993. - 368 стр.
9. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001, - 221 стр.
10. Juan Rada-Vilela. The FuzzyLite Libraries for Fuzzy Logic Control, [Электронный ресурс] // <https://s3.amazonaws.com/s3-fuzzylite-public/6.x/FuzzyLite-Libraries.pdf>.
11. Балдычев С.В., Казаков Н.А., Нефедьев Е.Ю., Сульженко В.А., Яковлев А.В. Применение методологии акустико-эмиссионного контроля качества сварных швов в процессе изготовления и испытаний металлоконструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2020. – Спец. вып. 1. – стр. 54-59.