

## ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2022 г. Ю.Г. Матвиенко<sup>1</sup>, И.Е. Васильев<sup>1,\*</sup>, Д.В. Чернов<sup>1</sup>, А.В. Кожевников<sup>2</sup>, И.В. Мищенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Россия 101990 Москва, Малый Харитоновский пер., 4

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, Красноказарменная, 14  
E-mail: \*vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 10.03.2022; после доработки 21.03.2022

Принято к публикации 25.03.2022

Изучены возможности снижения погрешности локации источников акустической эмиссии (АЭ) для случаев, когда источники АЭ расположены вблизи от приемных преобразователей АЭ (ПАЭ). С целью уменьшения погрешности локации и повышения вероятности выявления таких источников при обработке данных диагностики АЭ использованы искусственные нейронные сети (ИНС). Обучение ИНС выполнялось по параметрам локационных импульсов, регистрируемых с применением генератора импульсов на поверхности стальной полосы. Для генерации импульсов использовался широкополосный преобразователь, устанавливаемый на разном расстоянии от приемных ПАЭ. После обучения ИНС была использована для обработки результатов локации источников АЭ, зарегистрированных при испытаниях на разрыв стальной полосы с концентраторами в виде отверстий диаметром 5 мм, расположенными на расстоянии 40 мм от приемных ПАЭ. Вероятность выявления источников АЭ, выполненная с применением ИНС по параметрам локационных импульсов в зонах расположения концентраторов, составляла  $p = 0,72$ , т.е. практически в 12 раз превышала полученное значение вероятности  $p = 0,061$  в случае использования стандартного алгоритма.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, генератор импульсов, преобразователи акустической эмиссии, стальная полоса, линейная локация, вероятность выявления источника акустических сигналов, искусственные нейронные сети.

**DOI:** 10.31857/S0130308222050013; **EDN:** BLOXAX

### ВВЕДЕНИЕ

Точное определение местоположения источников АЭ, генерируемых в процессе образования и развития дефектов, является одной из актуальных задач АЭ диагностики изделий. При этом, как правило, используют стандартную методику координатной локации источников АЭ, основанную на расчетных значениях групповой скорости распространения импульсов ( $V_g$ ) в стенке изделия и регистрируемых значениях разности времен прихода ( $\Delta t$ ) импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки [1]. Стандартная методика не учитывает особенностей акустического тракта, в том числе дисперсионных свойств материала, влияющих на параметры сигналов, что приводит к снижению достоверности результатов локации источников АЭ [2—5]. Одним из возможных способов снижения погрешности локации источников АЭ является применение алгоритма « $\Delta t$ -mapping», основанного на построении атласа значений  $\Delta t$  [6—9]. Однако эффективность этой методики заметно снижается по мере увеличения базы локационной решетки ( $B$ ) свыше 0,5 м вследствие затухания импульсов, регистрируемых удаленными преобразователями [10]. Целью данных исследований является изучение возможности снижения погрешности координатной локации и повышения вероятности выявления источников АЭ с применением ИНС [11].

Одним из основных факторов, влияющих на точность локации источников АЭ в ближней зоне от ПАЭ при пороговом способе регистрации импульсов, является крутизна их переднего фронта. Для установления корреляционных зависимостей между групповой скоростью импульсов и параметрами регистрируемых сигналов по мере удаления источника АЭ от ПАЭ были проведены исследования, рассмотренные в публикациях [12—15]. В качестве основных параметров, характеризующих форму импульса, использовали максимальную амплитуду ( $u_m$ ), время нарастания ( $t_\phi$ ), число выбросов ( $N_n$ ), длительность импульса АЭ ( $t_n$ ), усредненную частоту выбросов ( $N_n/t_n$ ). Как отмечалось в публикации [15], формы импульса АЭ, в том числе крутизна переднего фронта сигнала в процессе его распространения в диспергирующей среде, заметно изменяются по мере удаления от источника. При этом скорость затухания импульса зависит

не только от уровня его амплитуды, но и парциальной доли энергии высокочастотных составляющих в спектре сигнала. Исходя из анализа рассмотренных в [12—16] зависимостей, влияния мультипликативных и аддитивных составляющих погрешности вычисления скорости распространения волнового пакета при пороговом методе регистрации импульсов, была разработан алгоритм и методика локации источников АЭ с применением ИНС.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На этапе сбора данных, используемых для обучения ИНС, эксперименты проводили на полосе из стали Ст3 с размерами  $500 \times 50 \times 3$  мм. На рис. 1 показана стальная полоса, по поверхности которой между приемными преобразователями R15α-SMA фирмы Mistras (США) устанавливали излучатель импульсов АЭ — широкополосный преобразователь UT-1000, последовательно удаляя его на 30 мм от ПАЭ № 1 на шагах регистрации параметров локационных импульсов в координатах  $X_i = 30, 60, \dots, 330$  мм.

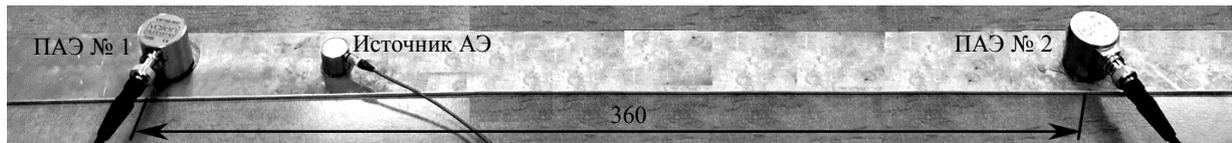


Рис. 1. Стальная полоса с излучателем импульсов и приемными ПАЭ.

В ходе экспериментов источник АЭ (преобразователь UT-1000) подключался к каналу возбуждения генератора MFG-72120MA (КНР). Для имитации широкополосных сигналов АЭ различной амплитуды на возбуждающий канал генератора подавался прямоугольный импульс, максимальная амплитуда которого изменялась в диапазоне 10 мВ — 10 В, что позволяло варьировать амплитуду регистрируемых ПАЭ импульсов в диапазоне  $u_m = 40—85$  дБ. Перед исследованиями определяли оптимальные настройки измерительной аппаратуры и вычисляли скорость распространения импульсов АЭ ( $V_g$ ) в стальном образце, среднее значение которой составляло  $V_g = 3500$  м/с при максимальном размере антенной решетки  $B = 360$  мм. Порог дискриминации сигналов АЭ выбирали из условия  $u_{th} \geq u_n + 6$  дБ ( $u_n$  — максимальная амплитуда сигналов помех) и составлял  $u_{th} = 40$  дБ при полосе пропускания цифровых фильтров  $\Delta f = 30—500$  кГц.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА ЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ

На основании результатов, зарегистрированных в ходе линейной локации источников АЭ на стальной полосе, определяли вероятность ( $p$ ) их выявления [16]. При использовании стандартного алгоритма локации отмечался значительный разброс расчетных значений координат источников АЭ относительно их истинного положения. К тому же максимум регистрируемых событий АЭ мог быть смещен на 5—30 мм относительно фактического положения источника АЭ.

В качестве примера на рис. 2 представлена гистограмма распределения событий АЭ в масштабе  $\Delta B = 5$  мм области локации  $B = 360$  мм при положении источника АЭ в координатах  $X_i = 90, 180$  и 270 мм.

Как видно из рис. 2, при размещении источника АЭ в координате  $X = 90$  мм диапазон разброса расчетных значений событий АЭ достигал  $\Delta X = \pm 30$  мм, а максимум их локации был смещен относительно истинного положения излучателя на 15 мм. Подобные отклонения максимумов расчетной локации событий АЭ от фактического положения источника отмечались во всех местах установки преобразователя UT-1000 за исключением центрального положения при  $X = 180$  мм, где расчет координаты источника не зависит от скорости распространения импульса АЭ. Следовательно, средний уровень приведенной погрешности зависит от удаления источника АЭ относительно ПАЭ. Так, например, при установке излучателя на расстояниях  $X_i = 30, 300$  мм от приемных ПАЭ уровень погрешности превышал 15 %. Приближение источника АЭ к центру области локации заметно снижает уровень приведенной погрешности, которая при  $X_i = 180$  мм составляла менее 2 %.

Как показали результаты выполненных исследований [14, 16], на точность результатов применения стандартного алгоритма линейной локации существенное влияние оказывают

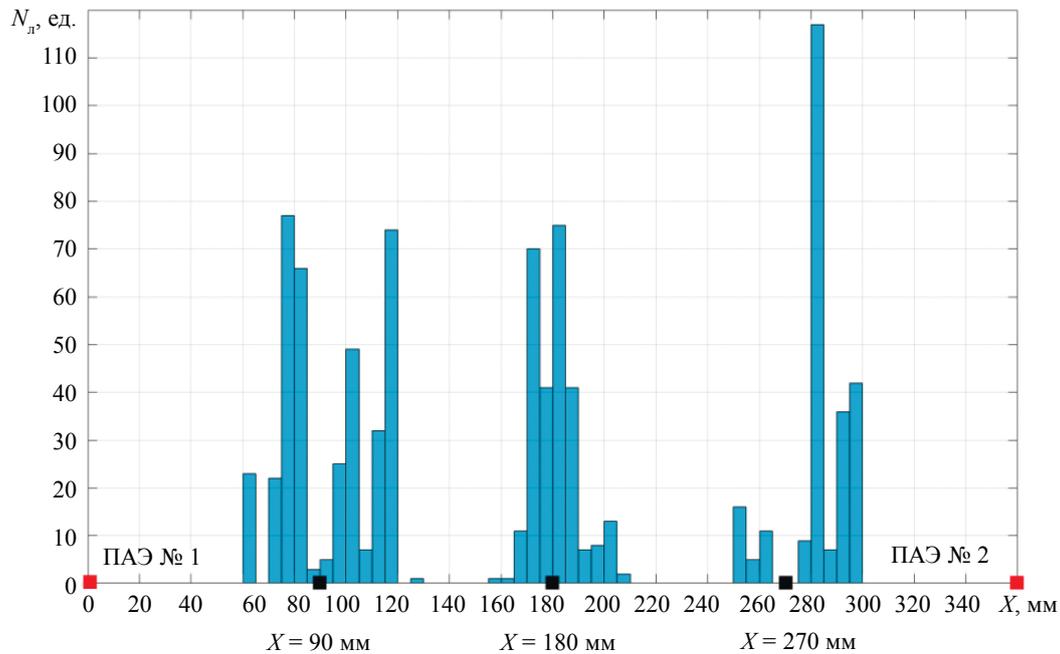


Рис. 2. Гистограмма распределения АЭ событий ( $N_d$ ), зарегистрированных в интервалах  $\Delta B = 5$  мм, при локации источника АЭ в координатах  $X_i$ .

параметры регистрируемых импульсов АЭ и удаленность источника акустических сигналов от приемных преобразователей. Разброс локации координат  $X_i$  коррелирует с уровнем флуктуаций групповой скорости импульса  $V_g$  при пороговом методе регистрации импульсов. Численная оценка уровня флуктуаций скорости осуществляется с помощью нормировочного коэффициента  $\gamma = V/V_g$ , где  $V$  — фактическое значение скорости распространения импульсов при пороговой регистрации импульсов, а  $V_g$  — значение скорости, рассчитанное по результатам предварительных испытаний, когда источник АЭ находился вне зоны локации. Смещение максимума распределения  $N_d(X)$  относительно фактического положения источника АЭ зависит от аддитивной составляющей погрешности  $\Delta(\Delta t)$ , возникающей при пороговом методе регистрации импульсов АЭ [10, 12—15]. На рис. 3 представлена зависимость параметра  $\gamma$  от уровня максимальной амплитуды  $u_m$  регистрируемых импульсов ПАЭ №1.

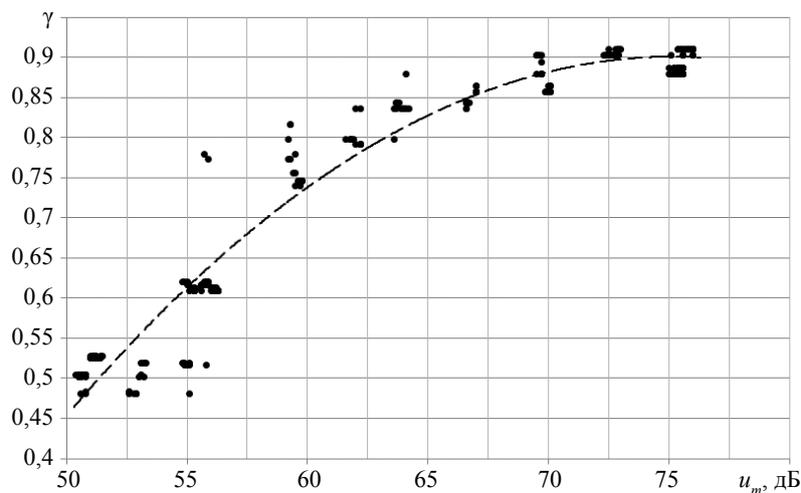


Рис. 3. Зависимость нормировочного коэффициента  $\gamma$  от максимальной амплитуды ( $u_m$ ) регистрируемых импульсов.

Маркерами показаны результаты экспериментальных исследований, полученные при генерации импульсов АЭ с применением преобразователя УТ-1000. Штриховой линией представлен результат аппроксимации экспериментальных данных полиномом второго порядка  $\gamma(u_m) = -0,0007 \times u_m^2 + 0,1059 \times u_m - 3,0825$ , для которого коэффициент детерминации составил  $R^2 = 0,957$ . Как следует из рис. 3, если амплитуда  $u_m$  не превышала 55 дБ, то значение нормировочного коэффициента снижалось до  $\gamma = 0,47$ , а, следовательно, возрастала погрешность стандартного алгоритма линейной локации. При уровне максимальной амплитуда импульсов  $u_m \geq 75$  дБ нормировочный коэффициент  $\gamma \geq 0,9$  и расчетное значение скорости  $V_g$  приближались к фактическому  $V$ . Как уже отмечалось, на результат линейной локации существенное влияние оказывает аддитивная составляющая погрешности ( $\Delta$ ) расчета параметра  $\Delta t$ , возникающая при пороговом методе регистрации импульсов АЭ [12, 15, 16]. На рис. 4 показан результат расчета параметра  $\Delta$  в зависимости от местоположения источника АЭ.

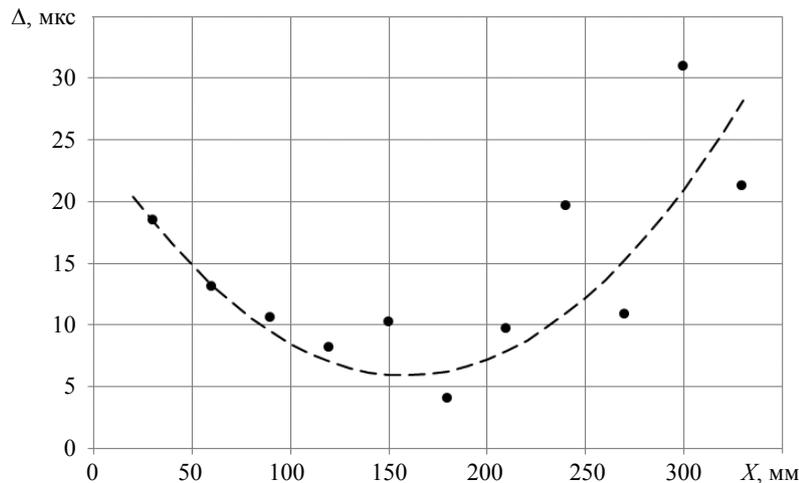


Рис. 4. Зависимость аддитивной составляющей погрешности ( $\Delta$ ) от положения источника АЭ ( $X$ ).

Как следует из рис. 4, наибольший уровень аддитивной погрешности, достигающий  $\Delta = 31$  мкс, регистрируется, когда источник АЭ находится вблизи от приемных ПАЭ. При приближении источника АЭ к центру локационной области аддитивная составляющая погрешности снижается до  $\Delta = 10$  мкс. Показанный на рис. 4 график корреляционной зависимости может быть описан полиномом второго порядка  $\Delta(X) = 0,0007562 \cdot X^2 - 0,2397 \cdot X + 24,9$ .

Рассмотренные на рис. 3 и рис. 4 зависимости нормировочного коэффициента и аддитивной составляющей погрешности локации источников АЭ от параметров регистрируемых импульсов АЭ были использованы при разработке алгоритма локации по данным диагностики АЭ с применением ИНС.

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДОСТОВЕРНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Методы машинного обучения — отдельный класс алгоритмов интеллектуального анализа данных, которые выполняют решение новой задачи, путем сравнения и выбора используемых оптимальных алгоритмов [11]. Среди методов машинного обучения особую популярность обрели интеллектуальные нейронные сети — широкий класс разнообразных систем, представляющих собой иерархические сетевые структуры, состоящие из множества элементов, называемых нейронами, передающих и анализирующих поступающую информацию. При этом, для эффективной работы ИНС требуется решить задачу оптимизации структурных связей сети (обучения ИНС), рационально используя вычислительные ресурсы компьютера [17—21], т.е. подбора оптимальных значений весовых коэффициентов связей.

Задача разработки ИНС, способной снизить погрешность локации источников АЭ, включает следующие этапы: определение структуры ИНС, ее обучение, оптимизацию выбранной структуры ИНС и оценку вероятной погрешности работы ИНС. Существуют две основные структуры нейронных сетей: ациклические сети (с прямым распространением) и циклические (рекуррентные) сети [20]. Сеть с прямым распространением представляет собой определенную функцию текущих входных данных. Рекуррентная сеть обладает обратной связью, т. е. передает свои выходные данные обратно на входные нейроны.

В данной работе использовали структуру ациклических сетей, поскольку входные данные задачи определения местоположения источника АЭ обрабатывали изолированно из-за неоднородности входных параметров. При обучении ИНС прибегали к таким параметрам локационных импульсов, как разность времени прихода сигналов на ПАЭ локационной группы, максимальную амплитуду, их длительность, время нарастания, количество выбросов, аддитивную погрешность и нормировочный коэффициент  $\gamma$ . Для обучения была использована базовая структура ациклической сети — многослойный персептрон, состоящий из набора связанных между собой искусственных нейронов. Перед началом процесса синтеза нейронной сети, способной корректно определять локацию, необходимо предварительно: сформировать обучающую выборку с данными и локацией  $X$  зарегистрированных с имитатора импульсов, нормализовать и разделить ее на  $k = 10$  частей, а также отобрать множество различных структур ИНС (с различными количествами слоев, нейронов на них и функциями активации), которые будут участвовать в синтезе эффективной ИНС (рис. 5).

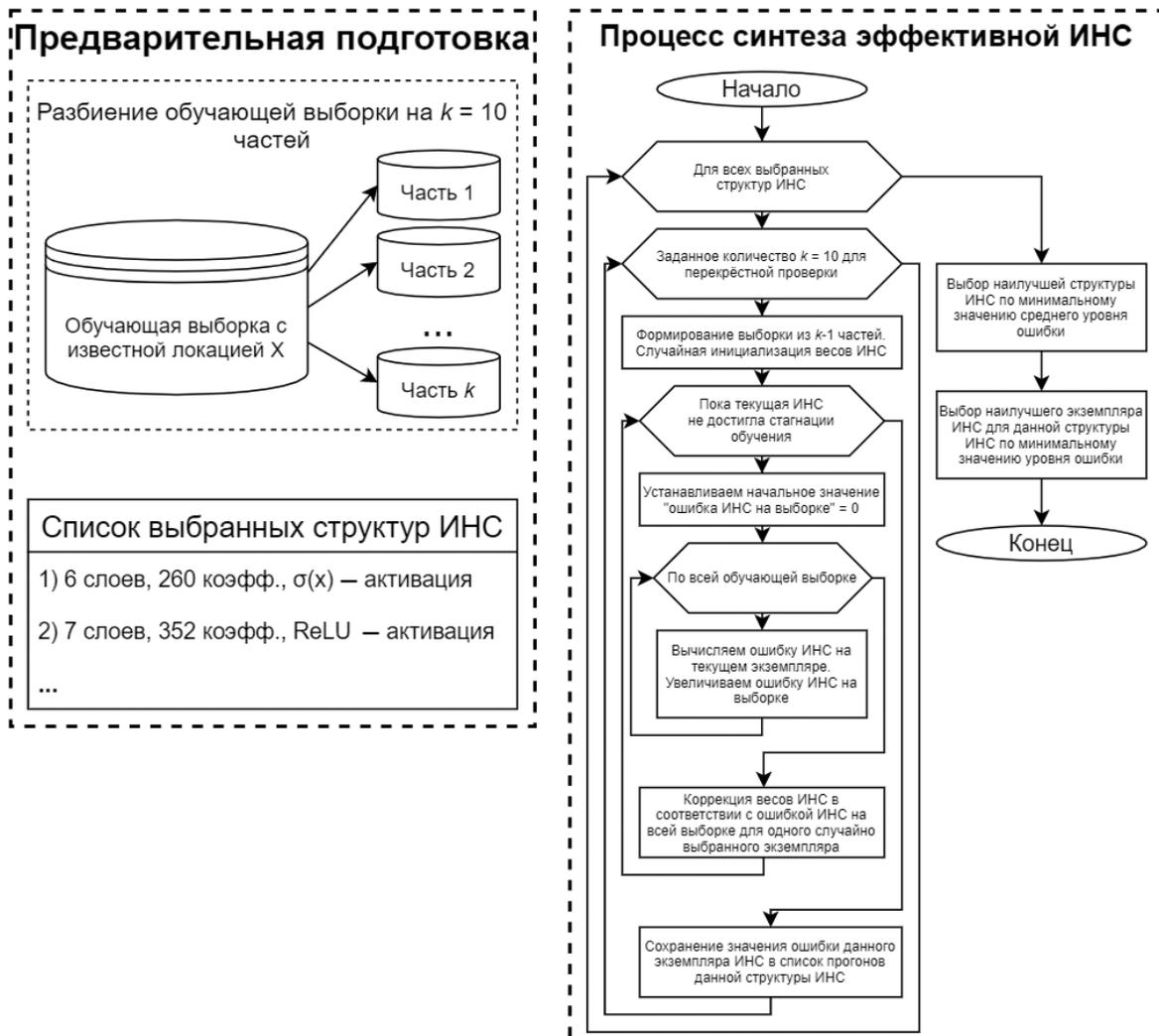


Рис. 5. Схема предварительной подготовки и синтеза эффективной ИНС.

В качестве реализации алгоритмов обучения ИНС применяли нейросетевой пакет TensorFlow [21] — библиотеку с открытым исходным кодом, реализованную на языке Python. Для обучения ИНС (см. рис. 5) был использован алгоритм стохастического градиентного спуска (*SGD*), направленный на постепенное снижение значения функции ошибки (потерь), а в качестве функции потерь была выбран средний квадрат ошибки (*MSE*), который вычисляется как  $MSE(Input_i) = (NN(Input_i) - X_i)^2$ , где  $Input_i$  — входные данные одного зарегистрированного импульса,  $NN(Input_i)$  — выходное значение нейронной сети для этого импульса, а  $X_i$  — его локация.

Для оценки каждой отдельной структуры ИНС использовалась перекрестная проверка (*cross-validation*) — метод оценки аналитической модели и ее поведения на независимых данных [11]. При оценке модели имеющиеся в наличии данные разбиваются на  $k$  частей (см. рис. 5). Затем на  $k-1$  частях проводили обучение модели, а оставшуюся часть данных использовали для тестирования. Процедура повторяли  $k$  раз, вследствие чего каждую из  $k$  частей данных применяемой выборки использовали для тестирования. Это позволяло оценить эффективность выбранной модели при наиболее рациональном использовании имеющихся данных.

### ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Так как комплексное применение параметров регистрируемых импульсов АЭ позволяет с большей точностью определить местоположение развивающихся повреждений по сравнению со стандартным алгоритмом локации, то обучение результирующей ИНС необходимо проводить с большим количеством входных нейронов. С целью оптимизации набора наиболее информативных параметров выполнен многократный эксперимент по обучению ИНС и исключению наименее значимых из них. В качестве информативных параметров при обучении ИНС использовали следующие: разность времен прихода импульсов на преобразователи антенной решетки ( $\Delta t$ ), максимальная амплитуда ( $u_m$ ), длительность ( $t_u$ ), время нарастания ( $t_\phi$ ), число выбросов в импульсах ( $N_u$ ), усредненная их частота ( $N_u/t_u$ ), относительное изменение амплитуды ( $u_{m1}/u_{m2}$ ), отношение времени нарастания ( $t_{\phi1}/t_{\phi2}$ ), нормировочный коэффициент  $\gamma$  и значение аддитивной погрешности ( $\Delta$ ) — задержки регистрации импульсов системой АЭ. Необходимо отметить, что применение комплексных параметров может не только повысить, но и снизить эффективность ИНС при обработке результатов диагностики АЭ. В табл. 1 показаны девять вариантов группировки, которые применяли при обучении ИНС параметров.

Таблица 1

Группы информативных параметров сигналов АЭ, использованных при обучении ИНС

Параметр	Номер группы ( $n$ )								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta t$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$u_m$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$t_\phi$		+	+	+	+	+	+	+	+
$t_u$			+	+	+	+	+	+	+
$N_u$				+	+	+	+	+	+
$u_{m1}/u_{m2}$					+	+	+	+	+
$N_u/t_u$						+	+	+	+
$t_{\phi1}/t_{\phi2}$							+	+	+
$\gamma$								+	+
$\Delta$									+

Для каждой из групп параметров было проведено многократное обучение ИНС (900 вариантов) по данным АЭ, зарегистрированным при тестовых испытаниях на стальной полосе. С помощью процедуры кросс-валидации (см. рис. 5) проводился отбор наилучших кандидатов при обучении

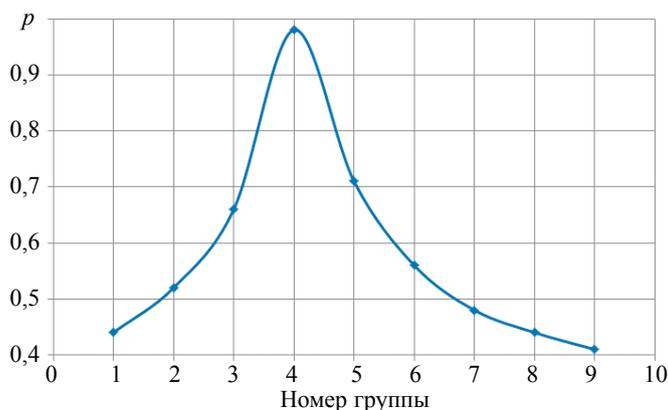


Рис. 6. График вероятности выявления источников АЭ, построенный для различных групп информативных параметров (см. табл. 1).

ИНС, в котором оценивалось среднее значение погрешности для всей обучающей выборке за 10 прогонов. По результатам проведенного отбора было определено оптимальное количество входных нейронов (рис. 6), позволяющих получить максимальную вероятность выявления источников АЭ в ближней зоне от ПАЭ.

По результатам проведенного отбора наилучший результат ( $p = 0,98$ ) при обучении ИНС был зарегистрирован для четвертой группы с параметрами  $\Delta t$ ,  $u_m$ ,  $t_\phi$ ,  $t_n$ ,  $N$ , состоящей из семи слоев и 352 весовых коэффициентов.

#### АПРОБАЦИЯ ИНС ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБЛАСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Разработанный алгоритм был апробирован на данных, полученных в ходе диагностики АЭ испытания на разрыв стальной полосы с двумя концентраторами напряжений в виде отверстий диаметром 5 мм, расположенных симметрично на расстоянии 140 мм относительно центра. При проведении диагностики АЭ приемные ПАЭ устанавливались на расстоянии 40 мм от концентраторов так, что размер линейной локации составлял  $B = 360$  мм. На рис. 7 показан общий вид испытаний стальной полосы, установленной в захваты нагружающего стенда Instron-5982.

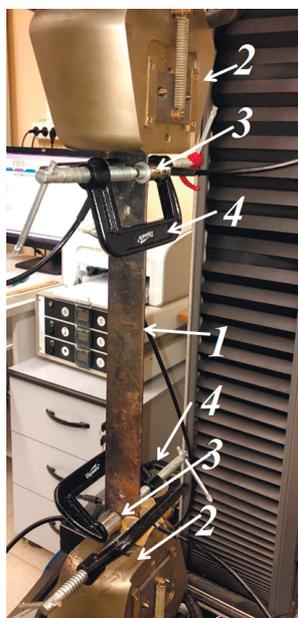


Рис. 7. Общий вид проведения экспериментальных исследований:

1 — стальной образец; 2 — захваты испытательной установки; 3 — преобразователи акустической эмиссии; 4 — струбцины.

В ходе диагностики АЭ, проводимой с применением системы «Valen AMSY-6» (ФРГ), в области концентраторов наблюдалось неравномерное накопление повреждений, вследствие чего интенсивность накопления повреждений в зонах верхнего и нижнего отверстия заметно отличалась.

В зонах концентраторов, где происходили наиболее интенсивные локальные разрушения структуры материала, должна регистрироваться и максимальная плотность индикаций источников АЭ. Разрушение стального образца произошло в области верхнего концентратора на расстоянии 35 мм от ПАЭ № 1. Однако однозначное определение максимальной плотности распределения событий АЭ, зарегистрированных с применением стандартного алгоритма линейной локации, не представляется возможным. На рис. 8 представлен результат применения стандартной методики линейной локации источников АЭ.

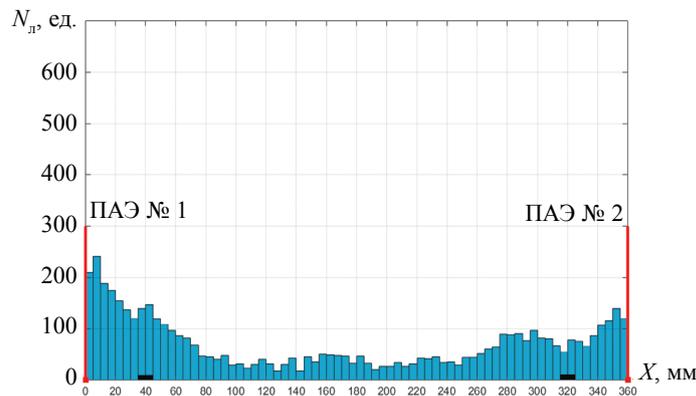


Рис. 8. Результат применения стандартного алгоритма линейной локации источников АЭ.

Как следует из рис. 8, максимум распределения АЭ событий, достигающий значения 230 ед., был зарегистрирован в координате  $X = 5$  мм, т. е. на удалении 35 мм от места разрушения стального образца (верхнего отверстия, отмеченного чертой на рисунке слева). При использовании стандартного алгоритма средний уровень плотности индикаций источников АЭ в зоне локации не превышал 72 ед., что составляло 30 % от максимального значения. Статистическая обработка полученных результатов показала, что вероятность выявления дефекта в зоне верхнего концентратора ( $X = 40$  мм) не превышала  $p = 0,061$ .

На рис. 9 показано распределение плотности индикаций источников АЭ, зарегистрированных в области локации стальной полосы по результатам обработки данных диагностики АЭ с применения ИНС.

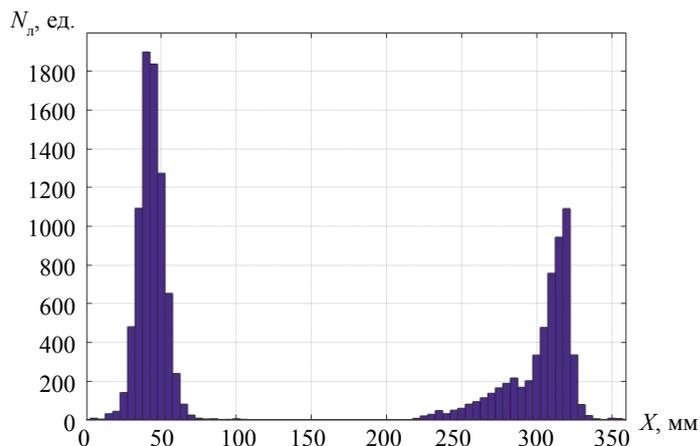


Рис. 9. Результат апробации алгоритма линейной локации источников АЭ по данным диагностики АЭ с применением ИНС.

Как следует из рис. 9, максимальный уровень локации источников АЭ, достигающий  $N_{\text{л}} = 1918$  ед., получен в интервале  $X = 45\text{—}50$  мм на расстоянии  $5\text{—}10$  мм от места разрушения полосы, что в 8,34 раза превышало плотность индикаций источников, зарегистрированных в соответствующем интервале с применением стандартного алгоритма (см. рис. 8). При этом вероятность выявления источников АЭ в зоне распространения трещины в стальной полосе достигала  $p = 0,72$ , что в 11,8 раз превышало уровень  $p = 0,061$ , полученный при использовании стандартного алгоритма.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения рассмотренной в работе задачи проведена серия экспериментальных исследований по оценке погрешности стандартного алгоритма линейной локации источников АЭ. В результате обработки параметров локационных импульсов, зарегистрированных в процессе генерации импульсов АЭ с помощью электронного имитатора, была определена погрешность их локации. Средний уровень вероятности выявления источников АЭ, определенный с помощью стандартного алгоритма в процессе тестовых экспериментов, составлял  $p=0,26$ . При этом вероятность выявления концентраторов, расположенных на расстоянии 40 мм от приемных преобразователей, с помощью стандартного алгоритма линейной локации не превышала  $p = 0,061$ . В процессе обработки экспериментальных данных установлены наиболее информативные параметры импульсов АЭ, коррелирующие со значениями нормировочного коэффициента  $\gamma$  и аддитивной составляющей погрешности  $\Delta$  локационного алгоритма. Данные параметров локационных импульсов были использованы в процессе обучения нейронных сетей с целью повышения вероятности выявления источников АЭ.

Апробация ИНС проведена по результатам локации источников АЭ, полученных при испытаниях на разрыв стальной полосы с концентраторами в виде сквозных отверстий диаметром 5 мм, расположенных на расстоянии 40 мм от приемных преобразователей. Применение предварительно обученных ИНС позволило существенно повысить вероятность выявления до  $p = 0,72$ , тогда как вероятность их выявления с помощью стандартного алгоритма линейной локации не превышала  $p = 0,061$ . При этом существенно снизилась максимальная погрешность локации источников АЭ в зонах концентраторов, составляющая не более чем на 10 мм от центров отверстий.

Дальнейшим шагом развиваемой методики является применение ИНС для снижения погрешности определения координат источников АЭ при планарной локации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00351).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.И., Барам В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
2. Georgiou G.A. Probability of Detection (PoD) Curves Derivation, applications and limitations. Jacobi Consulting Limited, London. 2006.
3. Sause M.G.R., Linscheid F.F., Wiehler M. An Experimentally Accessible Probability of Detection Model for Acoustic Emission Measurements // J. Nondestruct. Eval. 2018. V. 37. P. 17.
4. Diakhate M., Bastidas-Arteaga E., Pitti R.M., Schoefs F. Probabilistic Improvement of Crack Propagation Monitoring by Using Acoustic Emission / In: Zehnder A. et al. (eds) Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution. 2017. V. 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham.
5. Gagar D., Irving P., Jennions I., Foote P., Read I., McFeat J. Development of Probability of Detection Data for Structural Health Monitoring Damage Detection Techniques Based on Acoustic Emission / Proceedings of the 8th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, United States of America, 13—15 September, 2011. P. 1391—1398.
6. Eaton M. J., Pullin R., Holford K. M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. V. 43 No. 6. P. 856—863.
7. Baxter M.G., Pullin R., Holford K.M., Evans S.L. Delta T source location for acoustic emission // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. V. 21. No. 3. P. 1512—1520.
8. Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R. Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. V. 72—73. P. 513—524.
9. Pullin R., Baxter M., Eaton M.J., Holford K.M., Evans S.L. Novel acoustic emission source detection // J. Acoust. Emiss. 2007. V. 25. P. 215—223.

10. *Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Mishchenko I.V.* Error reduction in determining the wave-packet speed in composite materials // *Instruments and Experimental Techniques*. 2020. V. 63. No. 1. P. 106—111.
11. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход / 2-е издание. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 1408 с.
12. *Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Bubnov M.A., Chernov D.V.* Influence of dimensions and shape of process cutouts on the accuracy of locating acoustic emission sources // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 2. P. 101—109.
13. *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Кожмякин В.Л., Рамазанов И.С., Харламов Б.М.* Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / Под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. М.: Машиностроение. Полет, 2008. 440 с.
14. *Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A.* A new method of low amplitude signal detection and its application in acoustic emission // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. V. 10. No. 1. P. 73.
15. *Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V.* Problems of locating acoustic emission sources // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 9. P. 769—778.
16. *Чернов Д.В., Васильев И.Е., Марченков А.Ю., Ковалева Т.Ю., Куликова Е.А., Мищенко И.В., Горячкина М.В.* Влияние амплитуды акустических сигналов на вероятность выявления источников акустической эмиссии // *Вестник МЭИ*. 2022. № 1. С. 130—136.
17. *LeCun Yann A., Bottou Leon, Orr Genevieve B., Muller Klaus-Robert.* Efficient backprop / *Neural networks: Tricks of the trade / Grégoire Montavon, Geneviève B. Orr, Klaus-Robert Müller (Eds.)*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012. Т. 7700.
18. *Crivelli Davide, Guagliano Mario, Monici Alberto.* Development of an artificial neural network processing technique for the analysis of damage evolution in pultruded composites with acoustic emission // *Composites Part B: Engineering*. V. 56. 2014. P. 948—959. ISSN 1359—8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.005>
19. *Mahil C., Loo Ch., Sasikumar T., Suresh S.* Analysis of failure mode and fracture behavior by using acoustic parameter and artificial neural network // *Engineering Research Express*. 2019. P. 1—15.
20. *Ech-Choudany Y., Assarar M., Scida D., Morain-Nicolier F., Bellach B.* Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates // *Applied Acoustics*. 2017. V. 123. P. 123—132. ISSN 0003-682X. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.008>
21. *Abadi Martin, Agarwal Ashish, Barham Paul, Brevdo Eugene, Chen Zhifeng, Citro Craig, Corrado Greg S., Davis Andy, Dean Jeffrey, Devin Matthieu, Ghemawat Sanjay, Goodfellow Ian, Harp Andrew, Irving Geoffrey, Isard Michael, Jia Yangqing, Jozefowicz Rafal, Kaiser Lukasz, Kudlur Manjunath, Levenberg Josh, Mane Dan, Monga Rajat, Moore Sherry, Murray Derek, Olah Chris, Schuster Mike, Shlens Jonathon, Steiner Benoit, Sutskever Ilya, Talwar Kunal, Tucker Paul, Vanhoucke Vincent, Vasudevan Vijay, Viegas Fernanda, Vinyals Oriol, Warden Pete, Wattenberg Martin, Wicke Martin, Yu Yuan, Zheng Xiaoqiang.* Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems. 2016. P. 19.