

Применение оконных функций в задачах распознавания образов ультразвуковых сигналов

Бархатов В.А.

В статье обсуждается способ распознавания ультразвуковых импульсов с использованием оконных функций. Рассматриваются теоретические основы обработки сигналов. Приводятся эксперименты обнаружения эхосигналов при наличии шумов и помех, разделения близко расположенных эхосигналов, а также распознавания их комбинаций.

Ключевые слова: *распознавание образов, Гильбертово пространство, оконная функция, ультразвуковые сигналы.*

Общеизвестно, что критерии разбраковки несплошностей в ультразвуковых дефектоскопах используют довольно простые закономерности, такие как зависимость амплитуды эхосигнала от размера дефекта, пропорциональность задержки расстоянию до дефекта, условные размеры. На самом деле эхосигналы содержат гораздо больше информации о несплошности. Одно из направлений получения и анализа дополнительных данных – распознавание ультразвуковых образов дефектов.

Ранее, в работах [1,2] опубликована концепция обнаружения заранее известного сигнала f (образа) в данных S , полученных от прибора неразрушающего контроля. Считается, что функции S, f определены в гильбертовом пространстве, которое является нормированным и метрическим [3,4]. В задаче распознавания образов важную роль играет расстояние между функциями, оно характеризует их отличие друг от друга. В гильбертовом пространстве расстояние вычисляется по формуле

$$\|X - Y\| = \int_0^{t_0} (X(t) - Y(t))^2 dt. \quad (1)$$

Элементы пространства X, Y представляют собой гладкие функции $X(t), Y(t)$ определенные на интервале $t = [0, t_0]$.

Способ распознавания [1,2] основан на вычислении расстояния $\|S - Af\|$, где A - действительное число, амплитуда образа. Если расстояние между исследуемым сигналом S и образом Af небольшое – считается, что образ найден. В противном случае принимается решение, что образ f не обнаружен. Для принятия решения необходим критерий, который ограничивает максимально допустимые различия между функциями, максимальное расстояние между ними.

Алгоритм распознавания образов должен содержать минимум вычислений, поэтому критерий удобно выразить в виде коэффициента обобщения [1] или с помощью достоверности [2]. Но принцип принятия решения остается неизменным – проверка расстояния между сигналами.

Отметим, что представление функций в гильбертовом пространстве не является единственным. Можно использовать любое другое функциональное пространство, главное, оно должно быть метрическим. В частности, известна большая группа пространств с нужными нам свойствами, которые еще называют пре-гильбертовыми [5]. Здесь, расстояние между элементами X, Y определяют следующим образом

$$\|X - Y\| = \int_0^{t_0} \Omega(t) \cdot |X(t) - Y(t)|^P dt, \quad (2)$$

где: $P \geq 1$ - показатель степени, $\Omega(t) > 0$ - оконная функция, всегда положительна на интервале $t = [0, t_0]$.

Оконную функцию $\Omega(t)$ можно понимать как значимость элементов пространства X, Y в различных областях интервала $[0, t_0]$. Действительно, если величина $\Omega(t)$ близка к нулю в какой

либо части интервала $[0, t_0]$, то значения функций X , Y в этой области практически не влияет на величину расстояния. С другой стороны, если $\Omega(t)$ близка к единице, то расстояние между функциями определяется их видом. С помощью $\Omega(t)$ производится «селекция» функций и, следовательно, появляется возможность более жесткого разделения сигналов по сравнению с вычислениями по формуле (1). Также представляет интерес вариант пространства $P = 2$, так как в этом случае получаются достаточно простые математические выражения.

Данная работа посвящена исследованию эффективности алгоритма распознавания образов в пре-гильбертовом пространстве с $P = 2$.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть имеется некоторый сигнал $S(t)$, полученный экспериментально. Необходимо узнать, присутствует ли в нем сигнал $f(t)$ (образ) и какова его амплитуда - A . Найдем расстояние между экспериментальным сигналом и ожидаемым образом

$$W_{OCT} = \int_0^{t_0} \Omega(t) \cdot [S(t) - A \cdot f(t)]^2 dt \rightarrow \min . \quad (3)$$

В гильбертовом пространстве расстояние между функциями численно равно энергии разности функций. В данном случае величину W_{OCT} и аналогичные параметры тоже будем называть энергией. Очевидно, значение W_{OCT} зависит от амплитуды образа A . Необходимо найти такую амплитуду образа, чтобы энергия остатка W_{OCT} была минимальна. Это вариационная задача, которая решается путем вычисления частной производной W_{OCT} по амплитуде образа A . Запишем

$$\frac{\partial W_{OCT}}{dA} = 0 . \quad (4)$$

Решение находится довольно просто, после небольших преобразований получим

$$A = \frac{1}{W_f} \int_0^{t_0} \Omega(t) \cdot S(t) \cdot f(t) dt . \quad (5)$$

Выражение для энергии образа имеет вид

$$W_f = \int_0^{t_0} \Omega(t) \cdot f(t)^2 dt . \quad (6)$$

Аналогично запишем выражение для энергии экспериментального сигнала

$$W_s = \int_0^{t_0} \Omega(t) \cdot S(t)^2 dt \quad (7)$$

В формуле (5) вычисляется относительная амплитуда, причем за единицу принята амплитуда образа $f(t)$. Далее, найдем амплитуду исследуемого сигнала и тоже выразим ее в относительных единицах

$$A_s = \sqrt{\frac{W_s}{W_f}} . \quad (8)$$

Теперь величины A и A_s приведены к одному масштабу и их можно сравнивать между собой. Сформулируем максимально допустимое отличие амплитуд в виде неравенства

$$\frac{A}{A_S} \geq (1 - K) \begin{cases} \text{True : Result} = A \\ \text{False : Result} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Формулы (5) – (9) составляют алгоритм распознавания образов. Условие в выражении (9) устанавливает максимальное отличие амплитуды образа A , присутствующего в исследуемом сигнале от амплитуды самого исследуемого сигнала A_S . Здесь, K – коэффициент обобщения. Он может принимать значения в интервале $[0,1]$. Если $K = 0$, обобщения отсутствуют. Малейшие отклонения входного сигнала $S(t)$ от образа $f(t)$ приводят к выдаче отрицательного результата $Result = 0$.

Другая крайность, $K = 1$ – максимальное обобщение. Всегда будет приниматься решение, что образ обнаружен, $Result = A$, если его амплитуда положительна. На основе численных экспериментов получено, что оптимальный коэффициент обобщения находится в пределах 0,01-0,4.

В сущности, алгоритм выделяет некоторую ограниченную область в пре-гильбертовом функциональном пространстве, которая содержит образ $f(t)$ и его всевозможные искажения. Границы области определяются коэффициентом обобщения K . Если исследуемый сигнал $S(t)$ попадает в эту область, считается, что образ обнаружен. В противном случае принимается отрицательное решение. Кроме того данный подход отражает простой факт, что чем больше амплитуда образа, тем больше могут быть допустимые отличия.

В настоящее время технология распознавания образов находится в стадии исследований. Для оценки эффективности новых возможностей, была создана программа UD9812_Neuron.exe. Программа работает с ультразвуковым дефектоскопом УД9812, производит считывание из него А-сканов через USB порт, имеет все функции для отбора образов, настройки алгоритма распознавания и выполняет обнаружение сигналов в практических задачах ультразвуковой дефектоскопии.

В современных цифровых дефектоскопах А-сканы представлены в виде массивов целых чисел, которые получены путем дискретизации аналогового сигнала. В частности в приборе УД9812 частота дискретизации составляет 80 МГц. Ниже приведены формулы для расчета энергии и амплитуды дискретных функций в пре-гильбертовом пространстве.

$$W_S = \sum_{i=0}^N \Omega_i \cdot S_i^2 \quad \text{- энергия сигнала } S_i, \quad (10)$$

$$W_f = \sum_{i=0}^N \Omega_i \cdot f_i^2 \quad \text{- энергия образа } f_i, \quad (11)$$

$$A = \frac{1}{W_f} \sum_{i=0}^N \Omega_i \cdot S_i \cdot f_i \quad \text{- амплитуда образа.} \quad (12)$$

Эксперименты по распознаванию образов состоят из нескольких этапов.

1. Прозвучивается образец или изделие. Получают характерные эхосигналы от несплошностей, записывают их в персональный компьютер.
2. С помощью маркеров производится выбор ультразвукового образа несплошности - одного или нескольких эхосигналов. Также устанавливается определенная оконная функция и коэффициент обобщения.
3. Выполняется контроль изделий, исследуется способность алгоритма распознавания к выявлению дефектов, надежность его работы. В процессе контроля программа считывает А-

сканы из ультразвукового дефектоскопа в реальном времени, выполняет поиск образа, выводит результат распознавания на вторую развертку (см. например Рис.2)

Далее рассмотрим некоторые примеры.

На Рис.1А показан донный эхосигнал в стальном образце толщиной 30мм, который используется в качестве образа отражателя f_i . Прозвучивание проводилось преобразователем П111-2,5-Ø14. Оконную функцию построим на основе образа эхосигнала $\Omega_i = f_i^2$. Как показали эксперименты, такой выбор Ω_i дает наилучшее разделение высокочастотных ультразвуковых импульсов.

Рисунки 2Б, 2В представляют автокорреляционные характеристики сигнала Рис2А (образа) с применением оконной функции и без нее. Расчет выполнялся по формуле

$$C_i = \left| \sum_{j=0}^N \Omega_i \cdot f_i \cdot f_{i+j} \right|.$$

Здесь хорошо видно, что в авто-корреляционная характеристика эхосигнала в пре-гильбертовом пространстве становится несимметричной и более узкой. Следовательно, оконная функция обеспечивает более точное определение положения эхосигнала на А-скане.

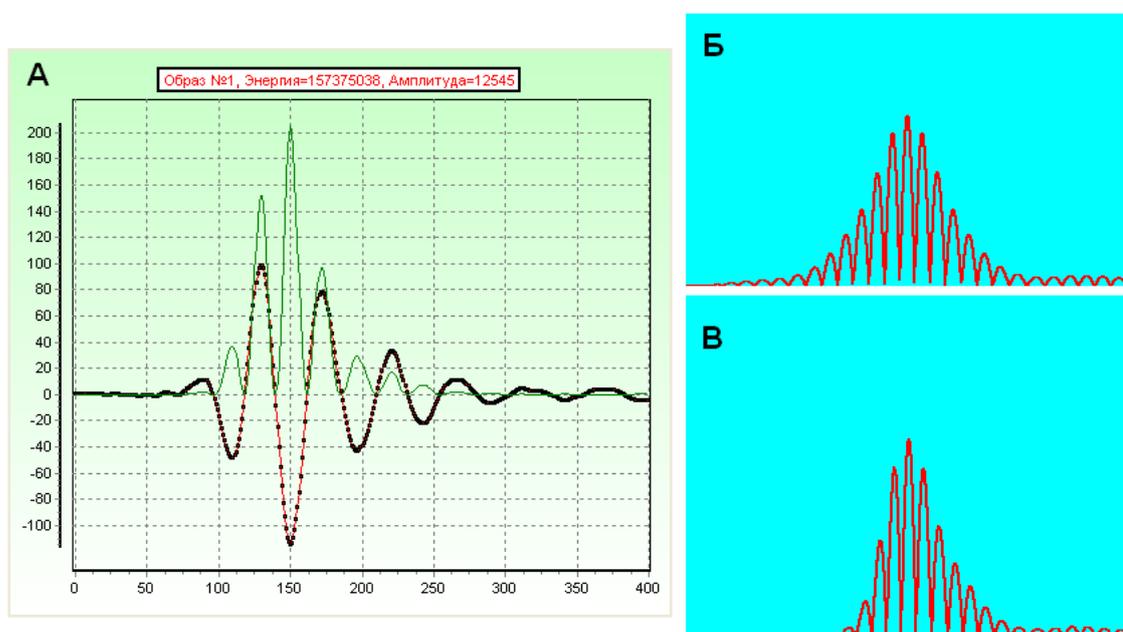


Рис.1. Образ ультразвукового импульса в стальном образце толщиной 30мм. Преобразователь П111-2,5-Ø14.

- А) Донный эхосигнал f_i – график красного цвета. Оконная функция $\Omega_i = f_i^2$ – график зеленого цвета.
- Б) Модуль авто-корреляционной характеристики без оконной функции, гильбертово пространство.
- В) Модуль авто-корреляционной характеристики в пре-гильбертовом пространстве $\Omega_i = f_i^2$.

Преимущество использования оконной функции наблюдается при выделении близко расположенных ультразвуковых импульсов. Рисунок 3А демонстрирует наложение донного эхосигнала в стальном образце толщиной 60мм и эхосигнала от отверстия диаметром 2мм на

расстоянии 3мм от донной поверхности. Эхосигнал от отверстия надежно выделяется с помощью процедуры распознавания образов - Рис.3Б. Здесь использовался образ Рис.1А и оконная функция $\Omega_i = f_i^2$, коэффициент обобщения $K = 0,09$. Следует отметить, что попытки распознавания эхосигнала в гильбертовом пространстве $\Omega_i \equiv 1$ не дают положительного результата.

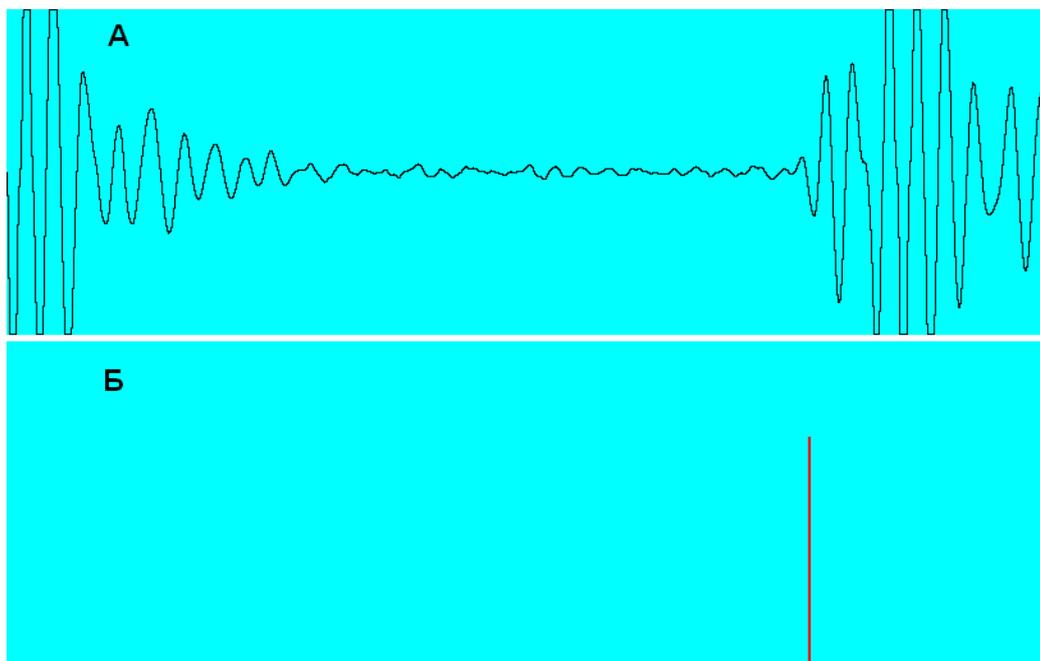
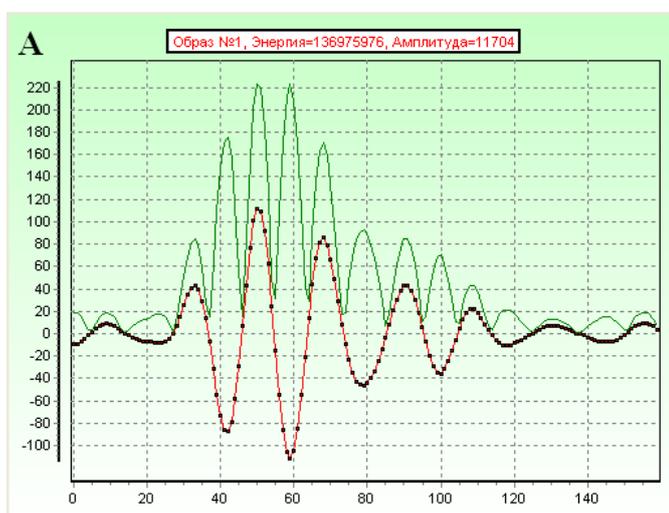


Рис.2. Распознавание отражателя вблизи донной поверхности.
А) Вид эхосигналов. Б) Результат распознавания.

Наиболее наглядная задача распознавания образов это обнаружение сигнала в шумах, помехах и наводках. Если взять образец эхосигнала конкретного преобразователя и установить коэффициент обобщения 0,15-0,25, то в множество образа попадут практически все вариации эхосигналов и они будут хорошо распознаваться в шумах и помехах. На Рис.3А показан эхосигнал от углового отражателя $2,0 \times 1,5 \text{ мм}^2$ расположенного на глубине 14мм в стальном образце. Преобразователь П121-5,0-70⁰-Ø8. Данный эхосигнал использован в качестве образа отражателя. Оконная функция выбрана в виде модуля сигнала $\Omega_i = |f_i|$. Рис.3Б демонстрирует обнаружение малых эхосигналов от пор в сварном шве толщиной 16мм. Дефектоскоп работает на максимальной чувствительности. Коэффициент обобщения 0,15.



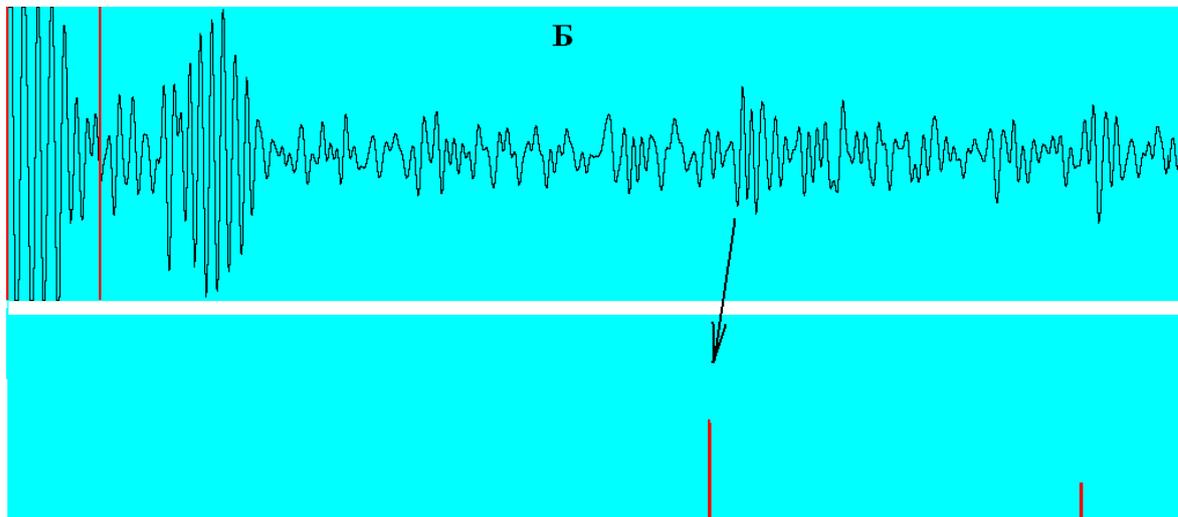


Рис.3. Распознавание ультразвукового эхосигнала в шумах. Преобразователь П121-5,0-70⁰-Ø8.

А) Образ эхосигнала f_i – график красного цвета.

Оконная функция $\Omega_i = |f_i|$ – график зеленого цвета.

Б) Развертка эхосигналов (сверху) и результат распознавания (снизу).

Коэффициент обобщения 0,15.

Образ может содержать не только один эхосигнал, но и их совокупность. Рассмотрим задачу обнаружения дефектов в тонком стальном листе толщиной 4мм. Пусть используется прямой преобразователь П111-2,5-Ø14, тогда на А-скане будет наблюдаться серия донных эхосигналов, которые почти сливаются друг с другом (Рис.4,5,6). В такой ситуации невозможно выделить эхосигналы от дефектов. Однако, при появлении небольших несплошностей типа волосовин, локальных расслоений, закатов амплитуды донных эхосигналов будут быстро уменьшаться за счет рассеяния волн. Используем это явление как критерий дефектности листа.

В экспериментах использовались вырезки из стального листа толщиной 4мм, в которых имелись несплошности типа расслоений, полупрозрачные для ультразвуковых волн. На Рис.4. изображены серии донных эхосигналов в листе без дефектов и в области с расслоениями. Данные совокупности эхосигналов использовались как образы листа с дефектами и без них. Здесь выбрана гладкая оконная функция, максимальная в центре выборки и плавно спадающая до нуля на границах. Расчет оконной функции выполнялся по формуле

$$\Omega_i = \sqrt{\sin\left(\frac{\pi}{N} \cdot i\right)}, N - \text{длина образа.}$$

Возможность выявления дефектов с помощью процедуры распознавания образов демонстрируют Рис.5,6. Повышенное ослабление серии донных эхосигналов надежно фиксируется при распознавании образа Рис.4Б.

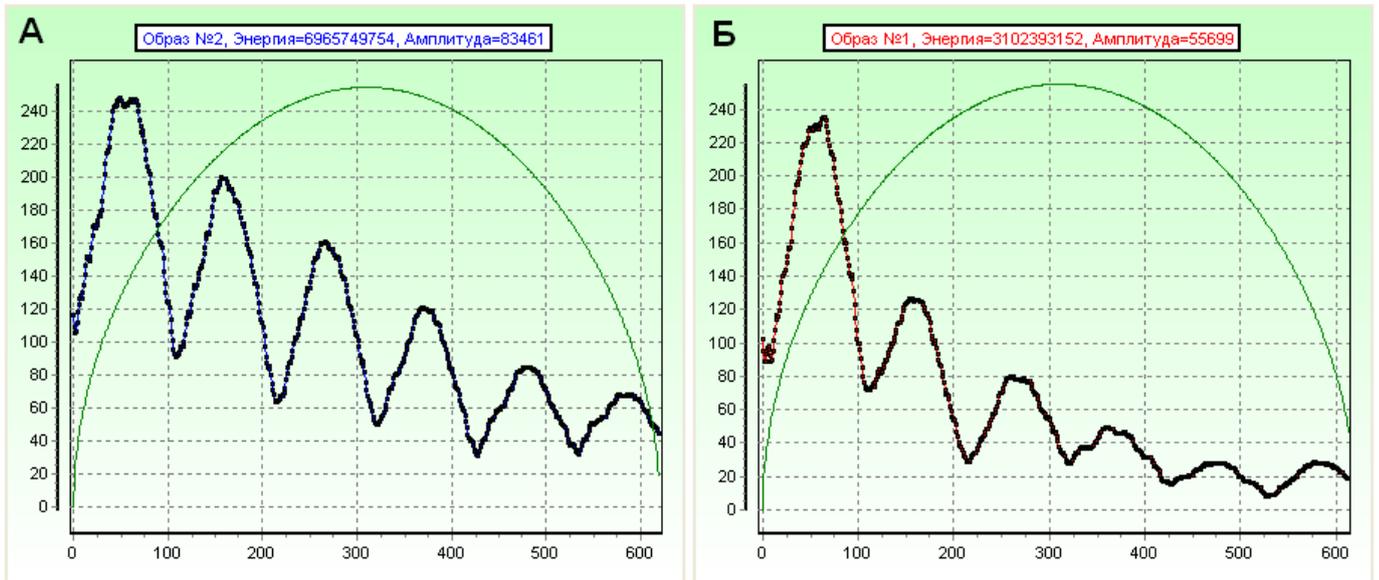


Рис.4. Образы ультразвуковых сигналов. Прозвучивание стального листа толщиной 4мм.
Преобразователь П111-2,5-Ø14.

- А) Серия донных эхосигналов в бездефектном листе.
- Б) Серия донных эхосигналов в листе с расслоениями.

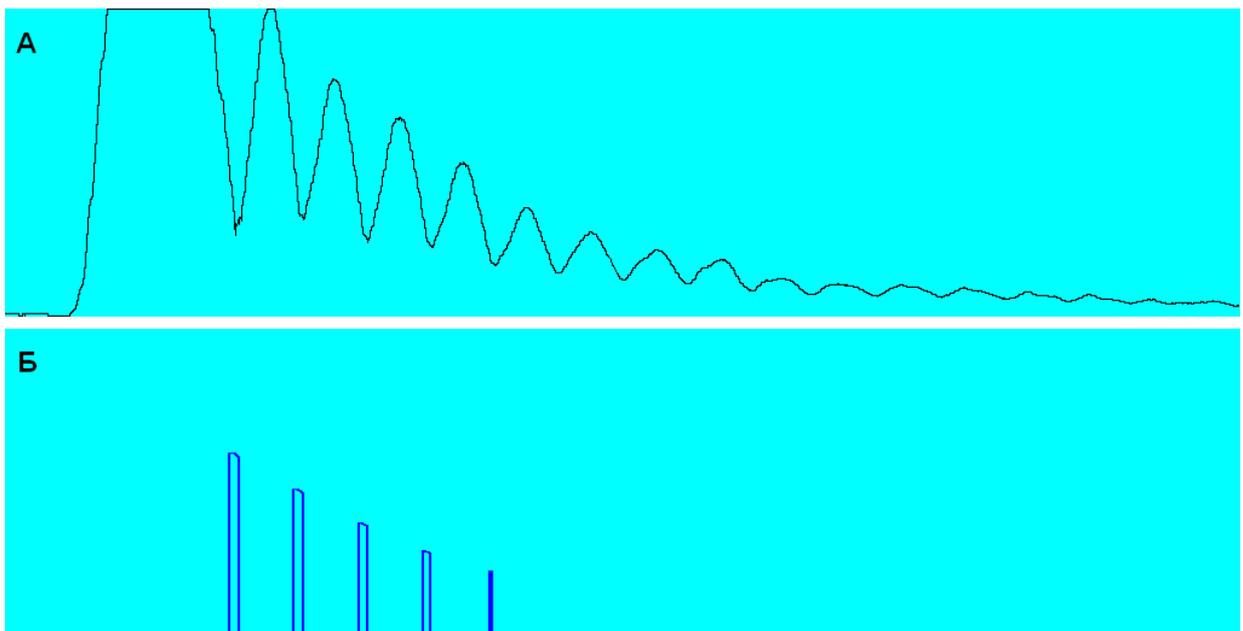


Рис.5. Прозвучивание стального листа толщиной 4мм. Преобразователь П111-2,5-Ø14.

- А) Вид эхосигналов в бездефектном листе.
- Б) Результат распознавания образа Рис.4А. Коэффициент обобщения 0,05.

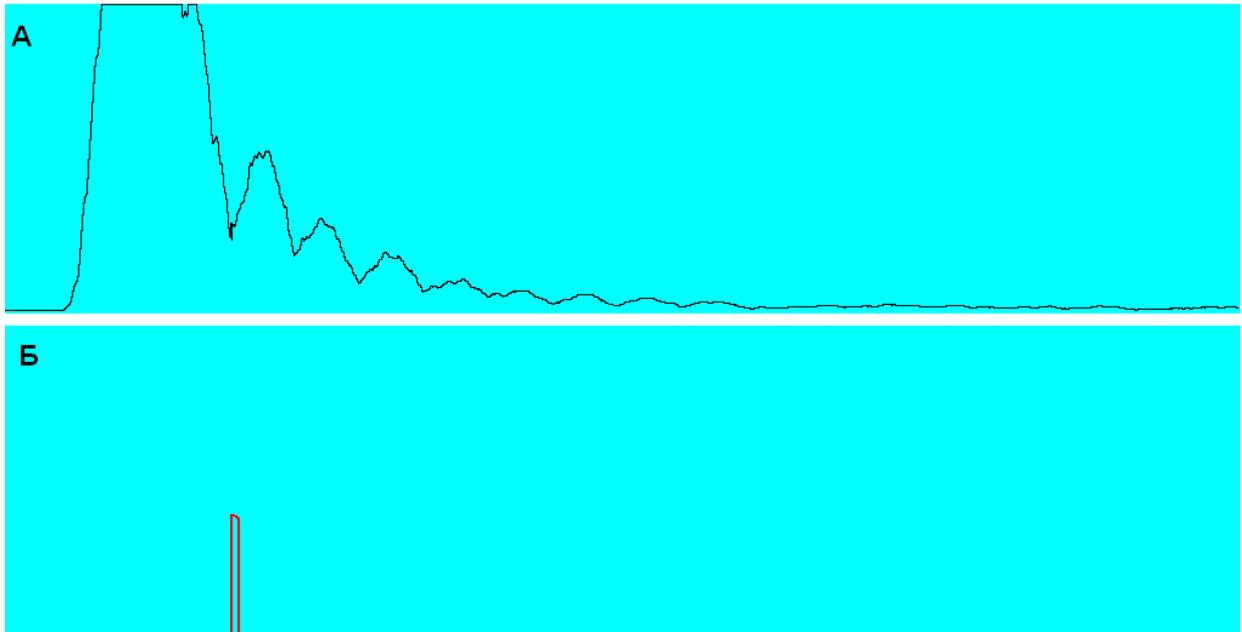


Рис.6. Обнаружение дефекта в стальном листе толщиной 4мм. Преобразователь П111-2,5-Ø14.

А) Вид эхосигналов при наличии небольших расслоений.

Б) Результат распознавания образа Рис.4Б. Коэффициент обобщения 0,05.

Представленные примеры показывают перспективность использования техники распознавания образов в ультразвуковой дефектоскопии. Применение оконных функций имеет следующие преимущества.

1. При рациональном выборе оконной функции можно получить более узкую автокорреляционную характеристику и, следовательно, положение эхосигнала на А-скане определяется с более высокой точностью.
2. Использование оконной функции позволяет обнаружить ультразвуковой импульс, который почти сливается с другими эхосигналами большой амплитуды.

Технология распознавания образов дает новые возможности в создании различных автоматических сигнализаторов дефектов, которые анализируют форму сигнала и его амплитуду.

Способ распознавания, изложенный в данной работе, обладает универсальностью. Его можно применять для обработки одномерных массивов данных, получаемых в магнитных и вихретоковых дефектоскопах.

Список литературы

1. Бархатов В.А Обнаружение сигналов и их классификация с помощью распознавания образов. Дефектоскопия, №4, 2006, с. 14-27.
2. Бархатов В.А. Распознавание образов класса, заданного параметрически. Дефектоскопия, №2, 2009, с. 3-17.
3. Робин У. Функциональный анализ. 2-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2005. – 448с.
4. Ахиезер Н.И., Глазман И.Н. Теория линейных операторов в гильбертовом пространстве, «Наука», М., 1966г.
5. Хилле Э., Филипс П. Функциональный анализ и полугруппы, ИЛ, М., 1962г.