

Д.С. Астахов, Ю.П. Дьяченко, Д.П. Вириенко, А.В. Кошулян  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ  
ИЗМЕРЕНИЙ ТЕНЕВОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ  
ПО МЕТОДУ SSA – “ГУСЕНИЦА”**

*Аннотация. Экспериментально исследован вопрос выбора числа компонент и длины окна для фильтрации по методу SSA - “Гусеница” ультразвуковых измерений, полученных теневым методом на металлическом образце с искусственным отражателем, имитирующим дефект.*

*Ключевые слова: Неразрушающий контроль, теневой метод, шум, фильтрация, SSA - “Гусеница”.*

### **Постановка задачи**

Для контроля качества металлических изделий получил распространение теневой ультразвуковой (УЗ) метод неразрушающего контроля. Он основан на явлении затухания амплитуды УЗ колебаний при их распространении через область изделия, содержащую несплошность. Для возбуждения и приёма импульсных УЗ колебаний используются два пьезоэлектрических преобразователя (ПЭП), расположенные соосно контролируемому участку изделия. Проходя через металл, УЗ-луч подвергается множественным переотражениям, что в основном обусловлено зернистой структурой металла [1]. Это приводит к тому, что на приемник вместе с полезным сигналом поступает шумовой сигнал. Такой шум снижает достоверность контроля и увеличивает риск не обнаружить полезный сигнал от дефекта. В связи с этим, является актуальным вопрос фильтрации таких сигналов. В данной работе рассмотрена практическая возможность применения для этой цели метода сингулярного спектрального анализа «Гусеница» [2].

### **Фильтрация по методу SSA - «гусеница»**

Предполагается аддитивная модель выборок УЗ измерений:

$$x(t_i) = s(t_i) + \varepsilon(t_i),$$

где  $x(t_i)$  - зашумлённый сигнал, поступающий на приёмник,  $s(t_i)$  - полезный сигнал (низкочастотный),  $\varepsilon(t_i)$  - шумовой сигнал (высокочастотный),  $t_i$  - временные отсчеты прихода УЗ импульсов,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  - количество отсчетов.

Используя временной ряд  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ , где  $x_i = x(t_i)$ , можно сформировать траекторную матрицу  $X$ , предварительно выбрав длину окна  $L$ :

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_K \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_{K+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \cdots & x_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & x_{L+2} & \cdots & x_{K+L-1} \end{pmatrix}.$$

Для обработки этой матрицы используется SVD разложение, т.е. представление матрицы  $X$  в виде произведения  $X = U\Lambda^{\frac{1}{2}}V^T$ , где  $U$  - ортогональная матрица левых собственных векторов,  $V$  - ортогональная матрица правых собственных векторов, а  $\Lambda^{\frac{1}{2}}$  - матрица сингулярных чисел. Разложение матрицы  $X$  можно записать в виде суммы матриц единичного ранга:

$$X = \sum_{j=1}^d X_j,$$

где  $d$  - количество ненулевых сингулярных чисел,  $X_j = \sqrt{\lambda_j} u_{:,j} v_{:,j}^*$ ,  $u_{:,j}$  -  $j$ -й вектор столбец матрицы  $U$ ,  $v_{:,j}^T$  - транспонированный  $j$ -й вектор столбец матрицы  $V$ .

Операцией усреднения побочных диагоналей  $\mathbf{x}_j = \text{diag}(X_j)$ , каждая матрица  $X_j$  переводится в вектор  $\mathbf{x}_j$ , причем сумма таких составляющих векторов даёт исходный вектор  $\mathbf{x}$ :

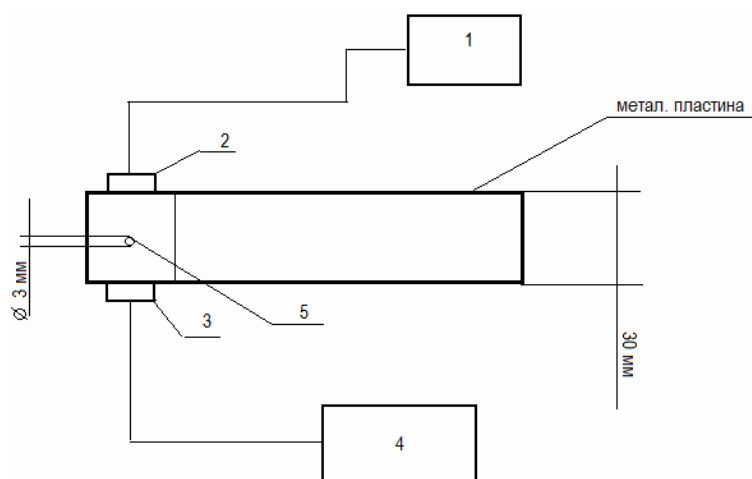
$$\mathbf{x} = \sum_{j=1}^d \mathbf{x}_j.$$

Номера  $j=1,2,\dots,d$  выбираются таким образом, чтобы составляющая  $x_1$  соответствовала первому по величине сингулярному числу  $\sqrt{\lambda_1}$ , а составляющая  $x_d$  - последнему ненулевому  $\sqrt{\lambda_d}$ . При этом первые составляющие содержат низкочастотные компоненты временного ряда (трендовые и периодические), а последующие – высокочастотные. На этом явлении и основана фильтрация методом «гусеница» [2].

Параметрами фильтрации являются, собственно, количество и номера первых компонент, сумма которых даст интересующую составляющую ряда, а также длина окна  $L$ . Очевидно, что различные значения этих параметров определяют качество фильтрации, которое численно можно выразить, как отношение амплитуды сигнала от дефекта к среднеквадратическому значению шума. Вопрос по выбору количества компонент и длины окна, при которых наблюдается максимальное отношение сигнал-шум, исследуется далее экспериментально.

### Эксперимент

Измерения были выполнены на стальном образце – пластине толщиной 30мм. с искусственным отражателем диаметром 3мм (сквозное отверстие). Для возбуждения УЗ колебаний использовались ПЭП с частотой 5МГц. Функциональная схема экспериментальной установки изображена на рис.1.

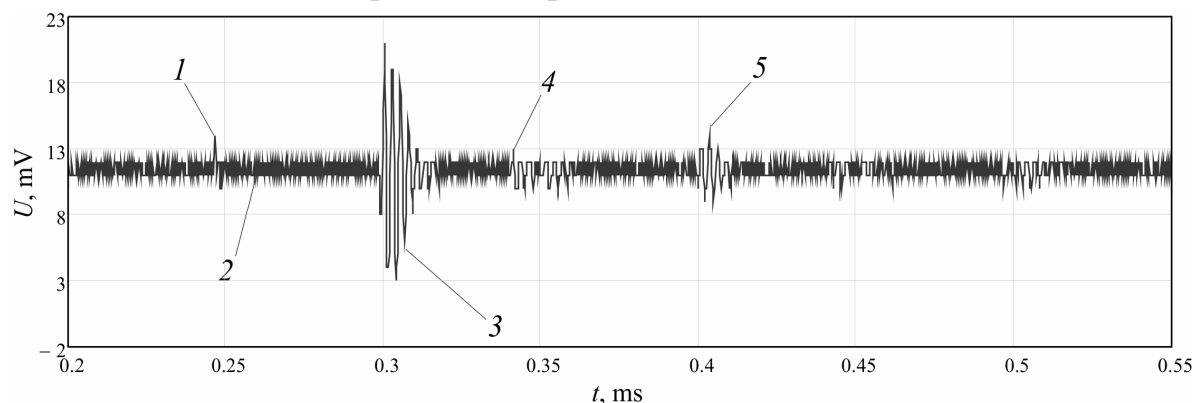


1- УЗ дефектоскоп УД2-12; 2,3 -УЗ ПЭП;

4 – цифровой осциллограф (DSO2300); 5 – искусственный отражатель

Рисунок 1 –Функциональная схема экспериментальной установки

Измерения, полученные в результате эксперимента, представлены в виде осциллограммы на рис.2.



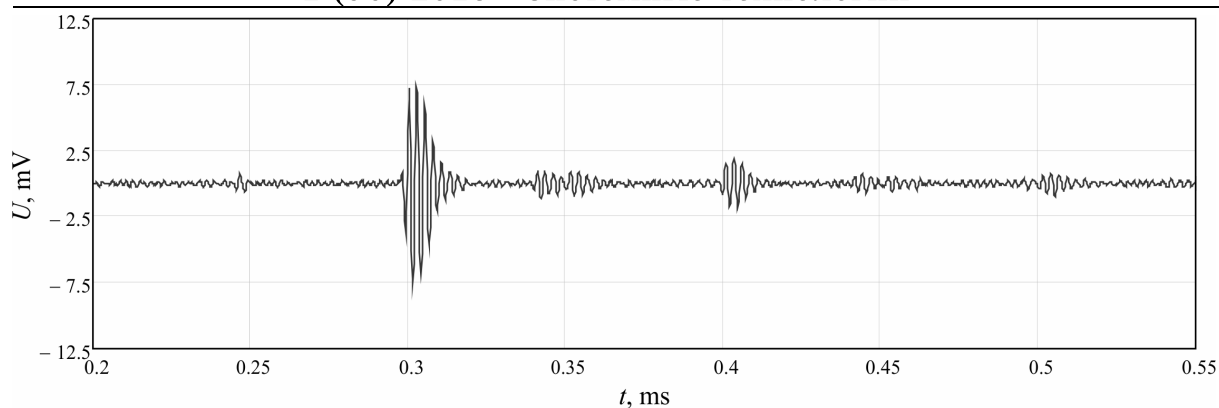
- 1 – помеха от наводок; 2 – шум; 3 – прошедший импульс;  
 4 – зона появления импульсов от дефектов;  
 5 – первый переотраженный импульс

Рисунок 2 – Осциллограмма УЗ измерений теневым методом

На рис.2 импульс с максимальной амплитудой – это теневой импульс 1, излученный ПЭП, прошедший образец и затем принятый приёмным ПЭП. Далее, часть этого импульса отражается от поверхности раздела сталь-воздух обратно в направлении излучающего ПЭП. На своем пути этот отраженный импульс встречает искусственный отражатель и снова отбивается в направлении приёмного ПЭП. Такой импульс от искусственного отражателя должен появиться в зоне 4. Импульс 5 – это первый переотраженный импульс – который три раза прошел сечение пластины. Импульсы от отражателя и многократно переотраженные импульсы формируют периодическую структуру сигнала, искаженного шумом 2. Задача фильтрации в данном случае – это выделить периодическую структуру такого сигнала.

#### **Фильтрация экспериментальных измерений по методу SSA-«Гусеница»**

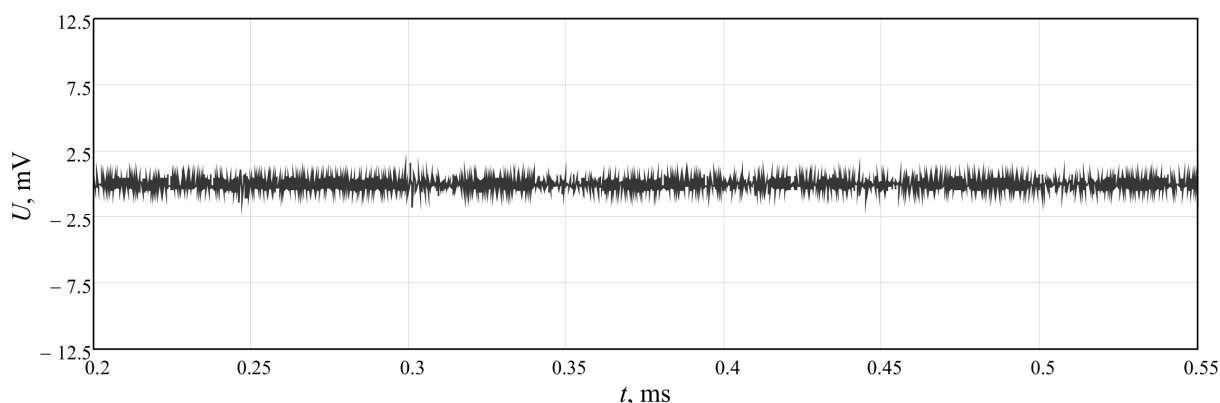
Вектор экспериментальных измерений раскладывался на компоненты по методу «гусеница». После этого, исследовалось соотношение амплитуды сигнала от дефекта из зоны 4 к среднеквадратическому отклонению шума в этой зоне. Было выяснено, что наилучшее соотношение сигнал-шум наблюдается, если число компонент выбрано равным двум (вторая и третья компоненты), а длина окна равной  $L=10$ . Для этих параметров отфильтрованный сигнал представлен на рис.3.



(сумма компонент 2 и 3, длина окна  $L=10$ )

Рисунок 3 – УЗ измерения после фильтрации

Сумма компонент с 4-й по 10-ю позволяет выделить шумовой сигнал, показанный на рис.4.



(сумма компонент с 4-й по 10-ю, длина окна  $L=10$ )

Рисунок 4 – Выделенный шумовой сигнал

Как видно на рис.3, фильтрация по методу SSA “Гусеница” позволяет выделить периодическую структуру полезного сигнала, повысив отношение сигнал-шум, что особенно заметно для зоны 4, в которой отчётливо наблюдается сигнал от искусственного отражателя. Значения отношений сигнал шум для различного количества рассмотренных компонент и длин окон сведены в табл.1.

Таблица 1

Отношение сигнал-шум после фильтрации

Длина окна, $L$	Сумма компонент	сигнал/шум, Дб
10	2,3	16,9
30	2,3,4	2,9
50	2,3,4,5	2,7
70	2,3,4,5,6	7,0
100	2,3,4,5,6,7	4,3

### Выводы

1. Фильтрация по методу SSA-«Гусеница» (фильтр собственных векторов) позволяет выделить на фоне шума периодическую структуру ультразвуковых измерений.

2. Наилучшее отношение амплитуды сигнала, отраженного от дефекта, к среднеквадратическому значению шума получается, если в качестве параметров фильтра выбраны 2-я и 3-я компоненты разложения при длине окна равной 10.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль: [Справочник «Неразрушающий контроль»] / И. Н. Ермолов, Ю.В. Ланге // под ред. В.В. Ключева – М: Машиностроение. – 2004. Том III . – 864 с.
2. Голяндина Н.Э. Метод "Гусеница"-SSA: анализ временных рядов: Учебное пособие/ Голяндина Н.Э. -СПб.:Издательство СПбГУ, 2004. - 76с.