УДК 620.179.16

ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

Ю.М. Туз, А.П. Красковский, И.В. Богачев

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", пр. Победы, 37, г. Киев, e-mail: tuz@aer.ntu-kpi.kiev.ua

Описані метод та експериментальна установка для вимірювання акустичного взаємного зв'язку між п'єзоелектричними елементами в ультразвукових фазованих антенних ґратках при використанні твердотільного акустичного навантаження.
Ключові слова: фазова антенна решітка, дефект, п'єзоелемент, акустичний взаємний зв'язок, установка, модуль, акустичне навантаження.

Рассмотрены метод и экспериментальная установка для измерения акустической взаимной связи между пьезоэлектрическими элементами в ультразвуковых фазированных антенных решетках при использовании твердотельной акустической нагрузки.
Ключевые слова: фазовая антенная решетка, дефект, пьєзоэлемент, акустическая взаимная связь, установка, модуль, акустическая нагрузка.

The article considers the method and experimental installation for measuring cross-coupling between piezoelectric elements in ultrasonic phased arrays wile using solid acoustic load are considered.
Keywords: phase array, defect, piezoelement, acoustic interconnection, setting, module, acoustic loading.

Достоверность и точность ультра-звукового контроля с использованием дефектоскопов-томографов (ДТ) в значительной мере зависит от чувствительности и пространственно-временных характеристик входящих в их состав фазированных антенных решеток (ФАР) пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП).

В условиях практического конструирования, при создании реальных ФАР возникают различного рода побочные "паразитные" эффекты: инерционность колебаний пьезоэлементов, действие побочных мод колебаний пьезоэлементов, взаимная связь между пьезоэлементами, неидентичность пьезоэлементов, неточность их пространственного положения и другие, которые оказывают существенное негативное влияние на чувствительность и пространственно-временные характеристики ФАР ПЭП. Проявление этих эффектов в процессе ультразвукового контроля приводит к частичной или полной потере достоверной информации о величине, характере и местоположении дефектов.

Основными проблемами становятся, как правило, побочные моды колебаний, взаимная связь и инерционность колебаний пьезоэлементов [1,2].

В данной работе наибольшее внимание уделено экспериментальным исследованиям акустической взаимной связи между пьезоэлементами ФАР, предназначенными для ультразвукового контроля металлов.

Экспериментальным исследованиям акустической взаимной связи между пьезоэлементами ФАР посвящено немало публикаций [3,4]. Однако, в большинстве работ при измерении взаимной связи в качестве акустической нагрузки элементов ФАР используют воду или воздух, что закономерно для распространения полученных результатов на ФАР ПЭП медицинского назначения или иммерсионных – для неразрушающего контроля.

В нашем случае задачей является создание метода и установки для измерения взаимной связи между пьезоэлементами ФАР с использованием твердотельной акустической нагрузки, что соответствует реальным условиям работы ФАР при ультразвуковом контроле металлических материалов и изделий.

Измерения акустической взаимной связи между пьезоэлементами линейной ФАР производились в режиме излучения импульсных сигналов на установке, структурная схема которой приведена на рис. 1.

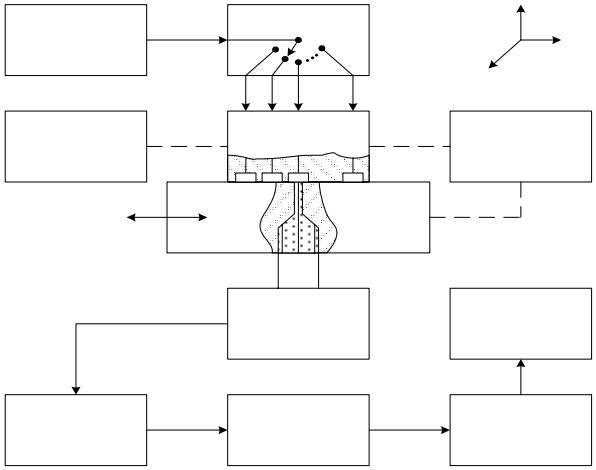
В состав установки входит:

– передающий тракт, который формирует видеоимпульсные сигналы, предназначенные для возбуждения пьезоэлементов ФАР и коммутацию каналов (пьезоэлементов) и который включает генератор видеоимпульсов 1 (генератор ударного возбуждения), который должен обеспечить возбуждение пьезоэлементов ФАР импульсом тока экспоненциальной формы и имеет следующие параметры: амплитуда импульса тока на нагрузке $C = 1000$ пФ в пределах диапазона от 2 А до 15 А; постоянная времени экспоненциального импульса $\tau_э = (1/f - \tau_{ф.э}) \pm 0{,}1/f$ мкс, где f – номинальные значения частоты f_{UU} или $f_э$ поверяемого пьезоэлемента в МГц; длительность фронта $\tau_{ф.э} \le 1/2f$ мкс [5], и коммутатор 2, который обеспечивает переключение каналов (пьезоэлементов ФАР);

– приемный тракт, который преобразует акустические сигналы в электрические, обеспечивает их усиление до нормированного уровня, индикацию на экране осциллографа, измерение и обработку информативных параметров на ПК и включает: точечный магнитострикционный преобразователь (ТМСП) 5, широкополосное согласующее устройство (ШСУ) 6, аттенюатор 7, широкополосный усилитель 8, цифровой осциллограф 9, персональный компьютер (ПК) 10.

В приемном тракте установки используется специально разработанный точечный магнитострикционный преобразователь, диаметр рабочей (контактной) поверхности которого составляет 50 мкм. Преобразователь 5 используется совместно со встроенным ШСУ 6, которое осуществляет согласование низкого сопротивления (ТМСП), равного 1-2 Ом с высоким входным сопротивлением аттенюатора 7 в диапазоне частот от 0,5 МГц до 5,0 МГц при передаче активной мощности принятого эхо-сигнала от ТМСП к нагрузке ($R_{вх.ат.}$) наилучшим образом.

Аттенюатор 7 выполняет дискретное ослабление принятых эхо-сигналов в диапазоне от 0 дБ до 40 дБ с шагом 1 дБ. Входное сопротивление аттенюатора отвечает условию $Z_{вх.ат} \ge 20 Z_{вых.ШСУ}(\omega)$, где $Z_{вых.ШСУ}(\omega)$ – выходное электрическое сопротивление ШСУ 6. Широкополосный усилитель 8 производит усиление эхо-импульсов в диапазоне частот от 0,1 МГц до 10 МГц с чувствительностью 10 мВ и регулировкой в диапазоне от 0 дБ до 40 дБ. Выходное нормированное напряжение усилителя 1,0 В. Отображение принятых эхо-сигналов, их измерение и обработку информативных параметров осуществляет цифровой осциллограф 9 и персональный компьютер 10.



1 – генератор видеоимпульсов; 2 – коммутатор каналов (пьезоэлементов ФАР); 3 – ФАР ПЭП; 4 – акустическая нагрузка; 5 – точечный магнитострикционный преобразователь (ТМСП); 6 – широкополосное согласующее устройство; 7 – аттенюатор; 8 – широкополосный усилитель; 9 – цифровой осциллограф; 10 – персональный компьютер; 11 – механическое устройство ориентации и фиксации ФАР ПЭП; 12 – механическое устройство перемещения акустической нагрузки по координатам X1, X2, X3

Рисунок 1 – Структурная схема установки для измерения акустической взаимной связи между пьезоэлементами в ультразвуковой линейной ФАР

Акустическая нагрузка 4 служит имитатором рабочей среды для пьезоэлектрических преобразователей ФАР, а также корпусом для встроенного в нее точечного магнитострикционного преобразователя 5, она выполнена в форме прямоугольного бруска и имеет следующие параметры: материал - Ст.45; геометрические размеры - $100 \times 60 \times 20$ мм; шероховатость рабочей поверхности - не более $R_a \le 0{,}63$ мкм; допуск по плоскости в области установки ФАР ПЭП - 0,002 мм; рабочие поверхности акустической нагрузки и ТМСП расположены в одной плоскости за счет их изготовления путем совместного шлифования.

В качестве контактной жидкости при проведении исследований используется касторовое масло.

Механическое устройство ориентации и фиксации ФАР ПЭП 11 обеспечивает ее перемещение по координате *X*3 в диапазоне от 0 до 10 мм, а также прижим к плоской поверхности акустической нагрузки с использованием пружинящей подвески с регулируемой силой. Кроме того, устройство позволяет поворачивать ФАР ПЭП в диапазоне углов ± 45° относительно оси (координаты) *X*3 для выполнения ориентации граней пьезоэлементов ФАР вдоль координат *X*1 и *X*2.

Механическое устройство 12 обеспечивает прецизионное перемещение акустической нагрузки 4 по координатам *X*1, *X*2, *X*3 с погрешностью не хуже ± 0,01 мм.

Процедура подготовки и проведения измерений является следующей.

ФАР ПЭП, подлежащую исследованию, закрепляют в узле держателя механического устройства 11. На рабочие поверхности ФАР ПЭП и акустической нагрузки наносят тонкий слой контактной смазки. Прижав поверхности друг к другу, производят их притирку путем неоднократного перемещения акустической нагрузки с ТМСП вдоль координаты *X*2 относительно закрепленной в держателе ФАР ПЭП.

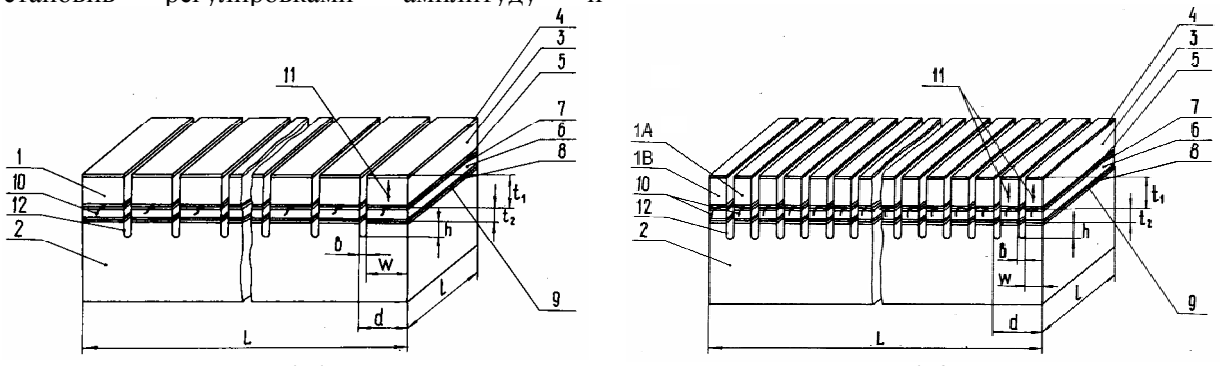
Используя возможность поворота держателя механического устройства 11 относительно *X*3, достигают ориентации соответствующих граней пьезоэлементов параллельно и перпендикулярно направлениям осей координат *X*1 и *X*2.

Коммутатором 2 подключают к выходу генератора видеоимпульсов 1 необходимый канал (пьезоэлемент) ФАР №1, предварительно установив регулировками амплитуду и длительность импульса возбуждения. Затем, перемещая акустическую нагрузку с ТМСП вдоль *X*2, устанавливают ТМСП на поверхность пьезоэлемента № 1 в точку, где принятый импульс будет иметь максимальное значение на экране осциллографа. Сигнал, полученный на ТМСП с ШСУ, ослабляется аттенюатором для согласования выходного сигнала ШСУ со стандартной амплитудой. Измеряют значение максимальной амплитуды принятого сигнала при выбранном ослаблении. Переключают выход генератора 1 на пьезоэлемент №2. Измеряют амплитуду сигнала, уменьшая ослабление аттенюатора до значений, принятых на элементе №1. Подключая поочередно следующие пьезоэлементы ФАР к выходу генератора 1, измерения повторяют. Полученая зависимость показаний аттенюатора в дБ элемента является зависимостью коэффициента взаимной связи C_p его из соответствующим пьезоэлементом.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы два образца линейных ультразвуковых ФАР ПЭП: № 1 и № 2, в условиях:

- отсутствия акустической нагрузки на излучающих поверхностях пьезопреобразователей ФАР (среда – воздух);
- присутствия акустической нагрузки на излучающих поверхностях пьезопреобразователей ФАР (среда – сталь).

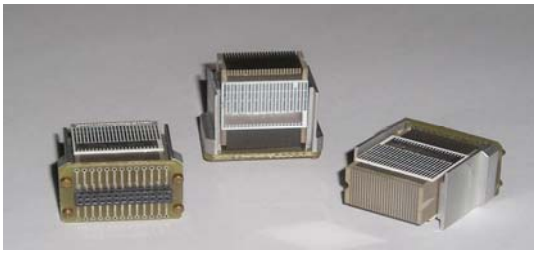
Ниже приведены конструкции внутренних модулей (рис. 2) и внешний вид готовых образцов внутренних модулей и ФАР ПЭП № 1 и № 2 (рис. 3).



№ 1 *№ 2*

1 – пьезоэлементы; 2 – токопроводящий демпфер (вольфрам-фенопласт); 3 – пьезокерамика (цирконат-титанат-свинца); 4, 5 – металлические электроды; 6 – изолятор (оксид алюминия); 7, 8, 9 – металлические пленки; 10 – проводники для индивидуальных пьезоэлементов 1, для попарного электрического объединения пьезоэлементов (1А, 1В) и для возбуждения/приема акустических/электрических колебаний; 11 – направление вектора поляризации пьезоэлементов; 12 – пазы между элементами решетки

Рисунок 2 – Конструкция внутренних модулей № 1 и № 2 линейных ультразвуковых антенных решеток пьезоэлектрических преобразователей



а)



б)

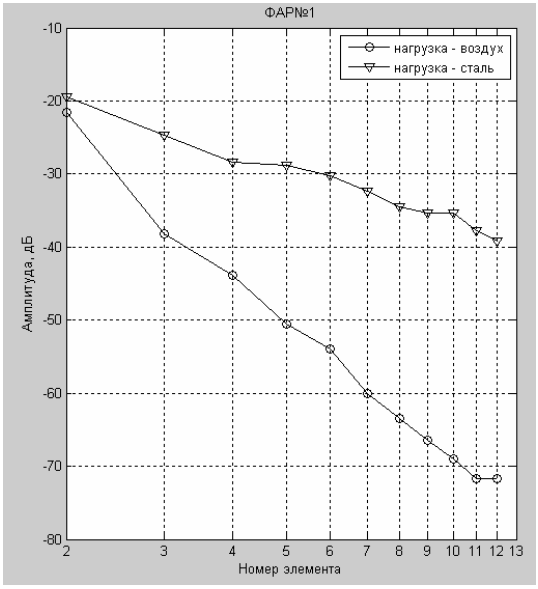
Рисунок 3 – Внешний вид готовых образцов внутренних модулей (*а*) и линейных ультразвуковых фазированных антенных решеток (*б*) пьезоэлектрических преобразователей № 1 и № 2

Таблица 1 – Основные конструктивные параметры внутренних модулей линейных ультразвуковых ФАР ПЭП № 1 и № 2

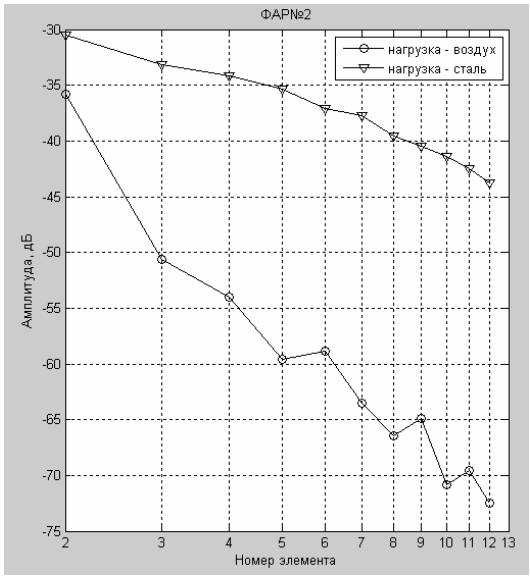
Порядковый номер ФАР ПЭП	№ 1	№ 2
Ширина решетки l, мм	10,0 ± 0,01	
Длина решетки l, мм	15,4 ± 0,015	
Общее число пьезоэлементов n	12	24
Число пьезоэлементов, электрически объединенных в группу n	–	2
Число групп пьезоэлементов (число каналов)	12	
Шаг решетки $d' = b + W$, мм	0,65 ± 0,0055	
Ширина паза между пьезоэлементами b, мм	0,20 ± 0,005	
Ширина пьезоэлемента W, мм	0,45 ± 0,0055	
Высота элемента t_1, мм, не хуже	0,72 ± 0,001	
Допуск на неточность пространственного расположения элементов в плоскости апертуры решетки в осевом направлении ΔZ, мм, не хуже	0,005	
в угловом направлении $\Delta\gamma$, °, не хуже	0,1	
Глубина паза в демпфирующем слое h, мм	1,0	
Высота изоляционного слоя t_2, мм	0,2	
Толщина защитного слоя t_3, мм	0,2	

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости акустической взаимной связи соответствующего элемента ФАР (расстояния между измеряемыми пьезоэлементами ФАР (рис.4) для двух видов ФАР, модули которых представлены на рис. 2.

Основные конструктивные параметры линейных ультразвуковых ФАР ПЭП № 1 и № 2 приведены в табл. 1.



№ 1, где W / t = 1,5



№ 2, где W / t = 0,6

Рисунок 4 – Измеренные зависимости акустической взаимной связи соответствующего элемента ФАР ПЭП при нагрузке на сталь и на воздух

ВЫВОДЫ

Предложенная методика и полученные практические результаты исследований ФАР ПЭП позволяют произвести измерения акустической взаимной связи между пьезоэлектрическими преобразовательными элементами ФАР в реальных условиях – при использовании твердотельной акустической нагрузки, а также дают возможность при поиске новых конструктивно-технологических решений, нацеленных на подавление взаимной связи, адекватно оценивать их эффективность при необходимых вариациях параметров конструкций и режимов технологических процессов изготовления ФАР ПЭП.

1. Amitay Theory and Analysis of Phased Array Antennas, Wiley / Amitay, Galindo, Wu. – New York : Interscience, 1972 – P. 145–147. 2. Pappalardo M. Some Experimental Data for the Design of Acoustic Arrays / M. Pappalardo / /J. of Sound and Vibrations – 1977. – 52 – No. 4, – P. 579–586. 3. Measurement of normal surface displacements for the characterization of rectangular acoustic array elements / R.L.Jungerman, P.Bennett, A.R.Selfridge [and others] // J.Acoust. Soc. Am. – August, 1984. – 76 (2). – P. 516–524. 4. Фалькевич С.А. Исследование линейной решетки пьезовибраторов с электрическим сканированием / С.А. Фалькевич // Дефектоскопия – 1979. – № 4. – С. 60-66. 5. Преобразователи ультразвуковые. Контроль неразрушающий. Методы измерения основных параметров: ГОСТ 23702–85. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 61 с.

Поступила в редакцію 01.12.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Куц Ю. В.

УДК 621.396.6,696.2

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ГАЗОПРОВОДАХ

В.А. Стороженко, А.В. Мягкий, С.А. Сапрыкин, С.Н. Мешков

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, тел (8 – 057) 70 – 21 – 345, e – mail: fizika@kture.kharkov.ua

Розглянуто можливість застосування термографічного методу для визначення рівня і вмісту рідкої фази в забрудненні у магістральних газопроводах. Побудована теплофізична модель газопроводу із двофазним наповнювачем (газ - рідина). Наведено експериментальні і розрахункові дані, що підтверджують принципову можливість застосування термографічного методу для контролю рівня конденсату в газопроводі.
Ключові слова: газопровід, газ, рідина, термографічний метод контролю, конденсована вода, емульсія, забруднення, газовий конденсат, рівень, температура.

Рассмотрена возможность применения термографического метода для определения уровня и содержания жидкой фазы в загрязнениях в магистральных газопроводах. Построена теплофизическая модель газопровода с двухфазным содержимым (газ - жидкость). Приведены экспериментальные и расчетные данные, подтверждающую принципиальную возможность применения термографического метода для контроля уровня конденсата в газопроводе. Проанализировано влияние температуры окружающей среды на чувствительность метода.
Ключевые слова: газопровод, газ, жидкость, термографический метод контроля, конденсируемая вода, эмульсия, загрязнение, газовый конденсат, уровень, температура.

The possibility of thermographic method application to the estimation of gas-main pipeline liquid phase contamination content level is considered. The gas pipeline with two-phase innage (gas and liquid) thermalphysical model is built. The experimental and calculation data that confirm the principal possibility of thermographic method application to pipeline condensate level control are given.
Keywords: gas pipeline, gas, liquid, thermografhic method of control, condensed water, emulsion, contamination, gas runback, level, temperature.