

УДК 620.179.16

Ю.М. Туз, д-р техн. наук,
О.П. Красковський, О.О. Мосолаб

АНАЛІЗ ПОХИБОК СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Представлено ультразвукову інформаційно-вимірювальну систему для вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів в режимі випромінювання. Проаналізовані амплітудні та фазові похибки багатоканального тракту випромінювання та одноканального тракту прийому імпульсних сигналів.

Ключові слова: фазована антенна решітка, ультразвукова інформаційно-вимірювальна система, похибки вимірювання.

Y.M. Tuz, ScD.,
A.P. Kraskovskyi, A.A. Mosolab

ERROR ANALYSIS OF SYSTEM FOR TEMPORAL-SPATIAL CHARACTERISTICS MEASUREMENTS OF LINEAR ULTRASOUND PHASED ARRAYS

The article considers ultrasound information measurement system for spatial-temporal characteristics measurements of linear ultrasound phased arrays in emission mode. Amplitude and phase errors of multichannel block and receive channel for impulse signals were analyzed.

Keywords: phased array, information measurement system, measurement errors.

Ю.М.Туз, д-р техн. наук,
А.П.Красковский, А.А.Мосолаб

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Представлена ультразвуковая информационно-измерительная система для измерения пространственно-временных характеристик линейных фазированных антенных решеток пьезоэлектрических преобразователей в режиме излучения. Проанализированы амплитудные и фазовые погрешности многоканального тракта излучения и одноканального тракта приема импульсных сигналов.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, ультразвуковая информационно-измерительная система, погрешности измерения.

В даний час все більшого поширення для контролю виробів з матеріалів набувають ультразвукові дефектоскопи – томографи (УЗДТ) на основі фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів (ФАР ПЕП). На відміну від звичайних дефектоскопів вони забезпечують підвищену достовірність, точність та швидкодію контролю. Це обумовлене можливістю електронного керування напрямленістю, формою та енергією ультразвукового променя, а також можливістю формувати двомірні ультразвукові перерізи об'єктів контролю з метою виявлення дефектів типу порушення суцільності (раквини, тріщини) та структурні неоднорідності (вкраплення, зміна густини).

Якість та точність ультразвукового контролю визначається абсолютною акустичною чутливістю та просторовою роздільною здатністю УЗДТ. В свою чергу роздільна здатність залежить від просторово-часових характеристик (ПЧХ) ФАР ПЕП. Оскільки параметри та характеристики п'єзоелементів є неідентичними, потрібна система, що дасть змогу проводити вимірювання ПЧХ з підвищеною точністю, мінімально впливаючи на власні параметри ФАР.

Структурна схема системи для вимірювання ПЧХ зображена на рис.1. Вимірювання проводяться в режимі випромінювання імпульсних сигналів ФАР ПЕП [1].

© Туз Ю.М., Красковский А.П.,
Мосолаб О.О., 2012

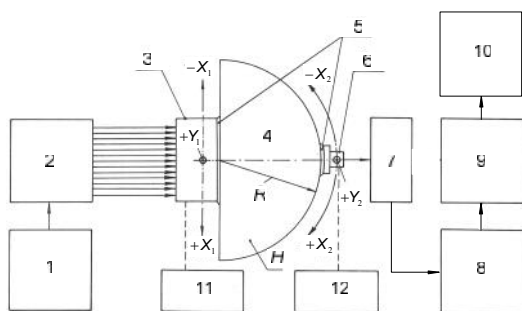


Рис. 1. Структурна схема системи для вимірювання ПЧХ лінійної ФАР ПЕП:

1 – генератор радіоімпульсів; 2 – багатоканальний пристрій керування часових затримок; 3 – ФАР ПЕП; 4 – імітатор робочого середовища та акустичне навантаження; 5 – контактна рідина; 6 – точковий п'єзoeлектричний перетворювач (ТПЕП); 7 – атенюатор; 8 – ширококутовий підсилювач; 9 – цифровий осцилограф; 10 – персональний комп'ютер; 11 – механічний пристрій орієнтації та фіксації ФАР ПЕП; 12 – механічний пристрій для переміщення ТПЕП

Систему можна розділити на дві основні частини: багатоканальний електронний тракт випромінювання та одноканальний тракт прийому. Багатоканальний тракт випромінювання складається з генератора радіоімпульсів 1 та багатоканального пристрою керування часових затримок 2. До складу одноканального тракту прийому входять точковий п'єзoeлектричний перетворювач (ТПЕП) 6, атенюатор 7, ширококутовий підсилювач 8 та цифровий осцилограф 9.

Для підвищення точності вимірювання ПЧХ ФАР ПЕП потрібно мінімізувати амплітудно-фазові похибки у кожному каналі багатоканального тракту випромінювання та одноканального тракту прийому. Не менш важливим є забезпечення міжканальної ідентичності електронного тракту випромінювання.

Для аналізу похибок використовується алгебраїчний метод визначення повних приростів функції багатьох змінних у залежності від приросту їх аргументів [2].

Проаналізуємо амплітудні та фазові похибки одного каналу, що входить до складу багатоканального електронного тракту випромінювання (рис.2).

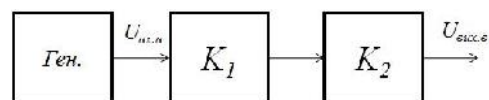


Рис. 2. Схема каналу багатоканального електронного тракту випромінювання: K_1 – лінія затримки, K_2 – підсилювач
Коефіцієнт перетворення для одного каналу

$$K = \frac{U_{вих.к}}{U_{вх.к}} = K_1 \cdot K_2 \quad (1)$$

Перейдемо до комплексних величин:

$$\dot{K} = K_1(\omega) \cdot e^{j\varphi_1(\omega)} \cdot K_2(\omega) \cdot e^{j\varphi_2(\omega)} \quad (2)$$

Модуль коефіцієнта перетворення

$$|K| = |K_1(\omega)| \cdot |K_2(\omega)| \quad (3)$$

Фазовий зсув каналу

$$\varphi = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) \quad (4)$$

Похибка модуля коефіцієнта перетворення має вигляд

$$\delta_{|K|} = \delta_{|K_1(\omega)|} + \delta_{|K_2(\omega)|} + \delta_{|K_1(\omega)|} \cdot \delta_{|K_2(\omega)|} \quad (5)$$

Фазова похибка каналу

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\varphi_1(\omega)} + \Delta\varphi_{\varphi_2(\omega)} \quad (6)$$

Для оцінки міжканальної неідентичності за амплітудою або за фазою багатоканального блоку випромінювання потрібно розрахувати відповідне середньоквадратичне відхилення (рис.3):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

де $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, y_i – виміряне значення фази або амплітуди для i -го каналу блоку випромінювання.

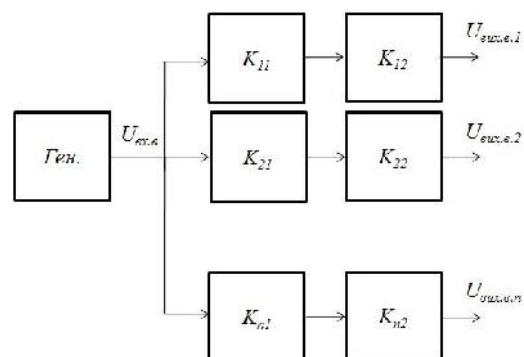


Рис. 3. Схема багатоканального тракту випромінювання:

K_1 – лінія затримки n -го каналу,
 K_2 – підсилювач n -го каналу

Визначимо амплітудні та фазові похибки одноканального тракту прийому. Для цього запишемо коефіцієнт перетворення схеми зображеної на рис.4.

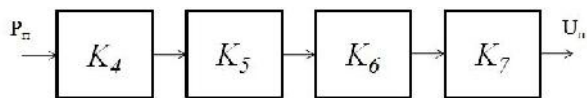


Рис. 4. Схема одноканального тракту прийому вимірювальної системи: K_4 – ТПЕП; K_5 – атенюатор; K_6 – широко-смуговий підсилювач; K_7 – цифровий осцилограф

Коефіцієнт перетворення тракту

$$K = \frac{U_n}{P_n} = K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7. \quad (8)$$

Запишемо коефіцієнт перетворення в комплексній формі:

$$\dot{K} = K_4(\omega) \cdot e^{j\varphi_4(\omega)} \cdot K_5(\omega) \cdot e^{j\varphi_5(\omega)} \times \times K_6(\omega) \cdot e^{j\varphi_6(\omega)} \cdot K_7(\omega) \cdot e^{j\varphi_7(\omega)}. \quad (9)$$

Модуль коефіцієнта перетворення

$$|K| = |K_4(\omega)| \cdot |K_5(\omega)| \cdot |K_6(\omega)| \cdot |K_7(\omega)|. \quad (10)$$

Фазовий зсув тракту прийому

$$\varphi = \varphi_4(\omega) + \varphi_5(\omega) + \varphi_6(\omega) + \varphi_7(\omega). \quad (11)$$

Тоді похибка модуля коефіцієнта перетворення

$$\begin{aligned} \delta_{|K|} = & \delta_{|K_4(\omega)|} + \delta_{|K_5(\omega)|} + \delta_{|K_6(\omega)|} + \delta_{|K_7(\omega)|} + \\ & + \delta_{|K_4(\omega)|} \cdot \delta_{|K_5(\omega)|} + \delta_{|K_4(\omega)|} \cdot \delta_{|K_6(\omega)|} + \\ & + \delta_{|K_4(\omega)|} \cdot \delta_{|K_7(\omega)|} + \delta_{|K_5(\omega)|} \cdot \delta_{|K_6(\omega)|} + \\ & + \delta_{|K_5(\omega)|} \cdot \delta_{|K_7(\omega)|} + \delta_{|K_6(\omega)|} \cdot \delta_{|K_7(\omega)|} + \\ & + \delta_{|K_4(\omega)|} \cdot \delta_{|K_5(\omega)|} \cdot \delta_{|K_6(\omega)|} + \\ & + \delta_{|K_4(\omega)|} \cdot \delta_{|K_5(\omega)|} \cdot \delta_{|K_7(\omega)|} + \\ & + \delta_{|K_5(\omega)|} \cdot \delta_{|K_6(\omega)|} \cdot \delta_{|K_7(\omega)|} + \\ & + \delta_{|K_4(\omega)|} \cdot \delta_{|K_5(\omega)|} \cdot \delta_{|K_6(\omega)|} \cdot \delta_{|K_7(\omega)|} \end{aligned} \quad (12)$$

та відповідно фазова похибка тракту

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_4(\omega) + \Delta\varphi_5(\omega) + \Delta\varphi_6(\omega) + \Delta\varphi_7(\omega). \quad (13)$$

За схемою, представленою на рис.5, амплітудна та фазова похибки системи визначаються наступним чином.

Коефіцієнт перетворення вимірювальної системи

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \left[\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^3 K_{ij} \right] \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \quad (14)$$

де $K_{n3} = \frac{P_n}{U_{\text{вих.в.н}}}$ – коефіцієнт перетворення

n -го п'єзоелемента ФАР; P_n – тиск на поверхні n -го п'єзоелемента ФАР.

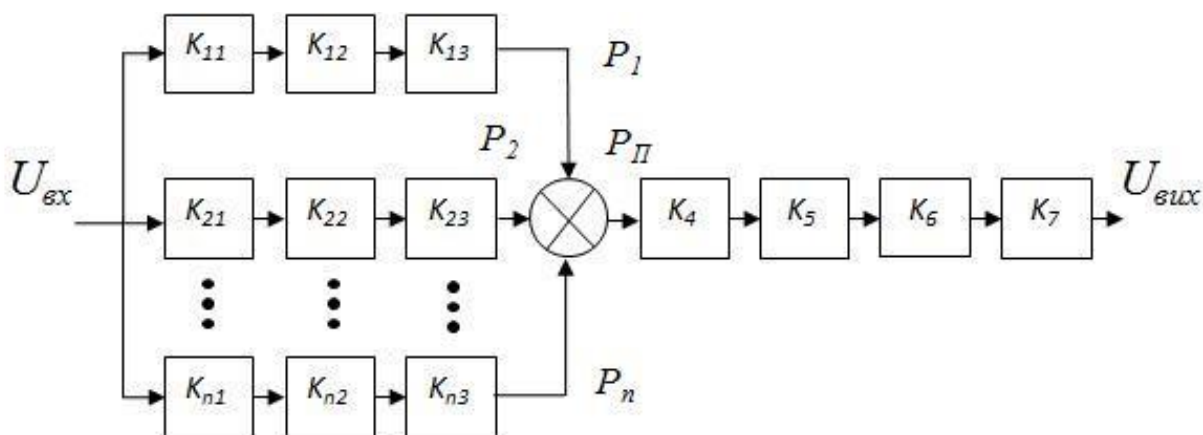


Рис. 5. Схема системи для вимірювання ПЧХ лінійної ФАР ПЕП:

K_{n1} – лінія затримки n -го каналу; K_{n2} – підсилювач n -го каналу; K_{n3} – n -й п'єзоелемент ФАР; K_4 – ТПЕП; K_5 – атенюатор; K_6 – широко-смуговий підсилювач; K_7 – цифровий осцилограф

Коефіцієнт перетворення в комплексній формі:

$$\dot{K} = \left[\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^3 K_{ij}(\omega) \cdot e^{j\varphi_{ij}(\omega)} \right] \times \\ \times K_4(\omega) \cdot e^{j\varphi_4(\omega)} \cdot K_5(\omega) \cdot e^{j\varphi_5(\omega)} \times \\ \times K_6(\omega) \cdot e^{j\varphi_6(\omega)} \cdot K_7(\omega) \cdot e^{j\varphi_7(\omega)} \quad (15)$$

Сумарний тиск P_n на поверхні вимірювального перетворювача на рис.5 є результатом вкладу акустичних тисків від кожного каналу ФАР ПЕП при випромінюванні [3]:

$$P_n(x, z, t) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \left[R_e(x_n, x, z) \cdot P_n(t - \frac{r_n}{c} - \Delta t_n) \right] \cdot e^{-\alpha(f)r_n} \cdot (16)$$

де $R_e(x_n, x, z)$ – діаграма напрямленості n -го п'єзоелемента; x_n – положення n -го елемента; P_n – часова залежність ультразвукового імпульсу п'єзоелемента; $\alpha(f)$ – коефіцієнт затухання в середовищі; Δt_n – часова затримка n -го п'єзоелемента; c – швидкість ультразвуку в середовищі; r_n – відстань між n -м елементом та точкою простору.

Для розрахунку похибок вираз (15) представимо низкою елементарних функцій:

$$\dot{A}_i = \prod_{j=1}^3 K_j(\omega) \cdot e^{j\varphi_j(\omega)} \quad (17)$$

$$\dot{B} = \sum_{i=1}^n A_i(\omega) \cdot e^{j\varphi_i(\omega)} \quad (18)$$

$$\dot{C} = K_4(\omega) \cdot e^{j\varphi_4(\omega)} \cdot K_5(\omega) \cdot e^{j\varphi_5(\omega)} \times \\ \times K_6(\omega) \cdot e^{j\varphi_6(\omega)} \cdot K_7(\omega) \cdot e^{j\varphi_7(\omega)} \quad (19)$$

Тоді модуль коефіцієнта перетворення системи

$$|K| = |B(\omega)| \cdot |C(\omega)|, \quad (20)$$

де

$$|B| = \sqrt{(\operatorname{Re}(B(\omega) \cdot e^{j\varphi_B(\omega)})^2 + (\operatorname{Im}(B(\omega) \cdot e^{j\varphi_B(\omega)}))^2};$$

$|C(\omega)|$ визначається за формулою (10).

Фазовий зсув системи

$$\varphi = \varphi_B(\omega) + \varphi_C(\omega), \quad (21)$$

$$\text{де } \varphi_B(\omega) = \arctg \frac{\operatorname{Im}(B(\omega) \cdot e^{j\varphi_B(\omega)})}{\operatorname{Re}(B(\omega) \cdot e^{j\varphi_B(\omega)})}, \quad \varphi_C(\omega)$$

визначається за формулою (11).

Похибка модуля коефіцієнта перетворення системи

$$\delta_{|K|} = \delta_{|B(\omega)|} + \delta_{|C(\omega)|} + \delta_{|B(\omega)|} \cdot \delta_{|C(\omega)|}. \quad (22)$$

Фазова похибка системи

$$\Delta\varphi = \Delta_{\varphi_B(\omega)} + \Delta_{\varphi_C(\omega)}. \quad (23)$$

Висновок

Роздільна здатність ультразвукових інформаційно-вимірювальних систем залежить від ПЧХ ФАР ПЕП. Останні є чутливими до похибок керування та міжканальної неідентичності трактів випромінювання та прийому. Для підвищення точності вимірювання ПЧХ необхідно мінімізувати амплітудно-фазові похибки багатоканального електронного тракту випромінювання та одноканального тракту прийому вимірювальної системи з метою уникнення впливу на власні параметри ФАР ПЕП. В даній роботі представлено аналіз похибок системи та окремих функціональних блоків з метою їх подальшої мінімізації.

Список використаної літератури

1. Красковский А. П. Измерение пространственно-временных характеристик ультразвуковых фазированных антенных решеток / А. П. Красковский // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія: Приладобудування – 2009. – Вип. 38. – С. 51–57.
2. Туз Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. – К.: Вища школа, 1976. – 256 с.
3. Gebhard W. G. Electronic beamforming, defect reconstruction & classification by ultrasound phased arrays / W. G. Gebhard // Ref. Tech. Nondest. testing. 1984. – 1984, – Vol.7. – P. 115–143.

Отримано 20.05.2012

References

1. Kraskovsky A P Measurement of spatio-temporal characteristics of ultrasonic phased arrays / A. P Kraskovsky // News of NTU "KPI". Seriya: Prila-dobuduvannya. – 2009. – VIP. 38. – P. 51–57 [in Russian].

2. Tuz Y. M. Structural methods to improve the accuracy of measuring devices / Y. M. Tuz. – Kiev: Vishcha School, 1976. – 256 p. [in Russian].

3. Gebhard W. G. Electronic beamforming, defect reconstruction & classification by ultrasound phased arrays / W. G. Gebhard // Ref. Tech. Nondest. testing. – 1984, – Vol.7. – P.115–143 [in English].



Туз
Юліан Михайлович,
д-р техн. наук, проф., зав.
каф. АЕД ФАКС НТУУ
«КПІ»,
e-mail:
tuz@aer.ntukpi.kiev.ua



Красковський
Олександр Павлович,
ст. науковий співробітник
каф. АЕД ФАКС, НТУУ
«КПІ»,
тел. (044) 241 76 20



Мосолаб
Олексій Олександрович,
аспірант каф. АЕД ФАКС,
НТУУ «КПІ»,
тел. (044) 241 76 20,
e-mail:
mosolab@aer.ntu-kpi.kiev.ua