

УДК 621.317.39.084.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380413201570700>

Гуз Ю. М.<sup>1</sup>, завідувач кафедру, д.т.н., Красковський О. П.<sup>2</sup>, інженер 1 категорії, к.т.н., Мосолаб О. О.<sup>3</sup>, провідний інженер-програміст

## **МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЛІНІЙНИХ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК**

**En**

Ultrasound nondestructive testing system with linear phased array is widely used during aircraft maintenance. Resolution of such systems depends on spatial-temporal characteristics of linear phased array.

The article describes the methods for ultrasonic linear phased array spatial-temporal characteristics measurements. Mathematical models and block diagrams of designed measurement systems are presented. Output parameters for designed systems are measured and their values are used for simulation.

The comparative analysis results of theoretical and experimental linear phased array temporal-spatial characteristics research are presented. The results of simulation are in good agreement with experimental data. Simulated data allowed to estimate measurement systems output parameters influence their own ultrasound linear phased array parameters.

---

<sup>1</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
Кафедра автоматизації експериментальних досліджень

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
Кафедра автоматизації експериментальних досліджень

<sup>3</sup> ТОВ "Самсунг Електронікс Компані Україна"

**Ru**

Рассмотрены методы измерения пространственно-временных характеристик ультразвуковых линейных фазированных антенных решеток. Представлены структурные схемы разработанных систем измерения. Приведены результаты сравнительного анализа теоретических и экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик линейной фазированной антенной решетки.

### **Вступ**

Системи ультразвукового неруйнівного контролю (НК) до складу, яких входять лінійні фазовані антенні решітки (ФАР) п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) широко використовуються під час технічного обслуговування повітряних суден [1]. Точність та вірогідність контролю визначається акустичною чутливістю та роздільною здатністю систем НК. Роздільна здатність цих систем залежить від параметрів просторово-часових характеристик (ПЧХ) лінійних ФАР ПЕП.

Відомі методи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП з сумісним збудженням п'єзоперетворювачів передбачають використання багатоканальних систем [2-4]. Недоліком таких систем є наявність міжканальних відхилень багатоканальних трактів випромінювання та прийому. На основі проведеного аналізу [5], для зменшення впливу цих відхилень використовується метод вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів в режимі випромінювання імпульсних сигналів.

### **Постановка задачі**

Метою даної роботи є підвищення точності вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП за рахунок удосконалення методів та засобів вимірювань.

### **Методи вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП**

Для вирішення поставленої задачі розроблено математичні моделі систем вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП, що дозволяє врахувати похибки вимірювання, а також створено системи вимірювання для проведення експериментальних досліджень ПЧХ реальних лінійних ФАР. При побудові математичних моделей використано геометричні співвідношення, які зображені на рис. 1.

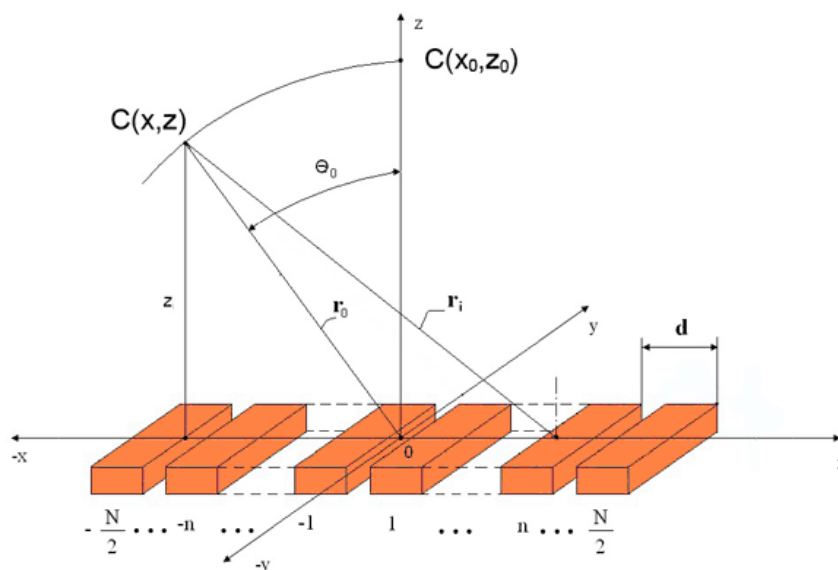


Рис. 1. Геометричні співвідношення прийняті при побудові математичних моделей систем вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП

Математична модель системи вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з сумісним збудженням  $n$ -езоперетворювачів. Для реалізації методу вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з сумісним збудженням  $n$ -езоперетворювачів використовується схема вимірювання, що зображена на рис. 2.

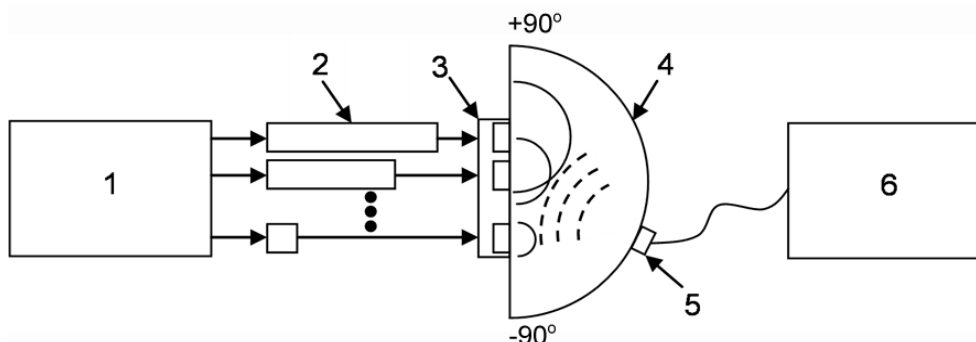


Рис. 2. Схема вимірювання ПЧХ лінійної ФАР ПЕП на основі методу з сумісним збудженням  $n$ -езоперетворювачів в режимі випромінювання імпульсних сигналів:

1 – багатоканальний генератор радіоімпульсів; 2 – багатоканальна лінія затримок; 3 – ФАР ПЕП; 4 – акустичне навантаження; 5 – ТПЕП; 6 – одноканальний блок прийому

Відповідно до рис. 1 та рис. 2, при збудженні електричним імпульсом, сформованим  $i$ -им електронним каналом багатоканального тракту випромінювання, форма акустичного тиску на випромінюючій поверхні  $i$ -го  $n$ -езоперетворювача ФАР визначається наступним чином:

$$\bar{P}_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{ex}(j\omega) \cdot K_{Ei}(j\omega) \cdot K_{Pui}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (1)$$

де  $U_{ex}(j\omega)$  – частотний спектр електричного імпульсу збудження  $U_{ex}(t)$ ;  $K_{Ei}(j\omega)$  – передаточна функція вхідного  $i$ -го електричного каналу багатоканального тракту випромінювання;  $K_{Pui}(j\omega)$  – передаточна функція  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР по напрузі.

При випромінюванні  $N$  п'єзоперетворювачами ФАР, середнє значення акустичного тиску в довільній точці  $C(x, z)$ , в якій розташований центр прийомної поверхні точкового п'єзоелектричного перетворювача (ТПЕП), може бути представлено:

$$\bar{\sigma}_{S_T}(x, z, t) = \frac{1}{S_T} \int_{S_T} \sum_{i=1}^N \frac{1}{S_{E_i}} \int_{S_{E_i}} \frac{A_i(x, y)}{r_i} \cdot P_i\left(t - \frac{r_i}{c} - \Delta t_i\right) \cdot e^{-\alpha(f) \cdot r_i} \cdot dS_{E_i} \cdot dS_T, \quad (2)$$

де  $A_i(x, y)$  – розподіл амплітуди акустичного тиску над випромінюючою поверхнею  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР,  $P_i\left(t - \frac{r_i}{c} - \Delta t_i\right)$  – часова залежність ультразвукового імпульсу  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР,  $r_i$  – відстань між  $i$ -им п'єзоперетворювачем ФАР та точкою простору  $C(x, z)$ ,  $\Delta t_i = \frac{i \cdot d}{c} \cdot \sin(\theta_0)$  – часова затримка для  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР,  $d$  – крок між елементами ФАР,  $c$  – швидкість ультразвуку в середовищі,  $\theta_0$  – кут між віссю  $Z$  та напрямком на точку  $C(x, z)$  в площині сканування,  $\alpha(f)$  – коефіцієнт затухання ультразвукових коливань в середовищі,  $S_{E_i}$  – площа  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР,  $S_T$  – площа ТПЕП.

Через сумірність геометричних розмірів довжини хвилі та прийомної поверхні ТПЕП, форму середнього акустичного тиску  $\bar{\sigma}_{S_T}(x, z, t)$  можна вважати однаковою для кожної точки прийомної поверхні.

Прийнятий електричний сигнал ФАР може бути визначений:

$$U(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\sigma}_{S_T}(x, z, j\omega) \cdot K_{U\sigma}(j\omega) \cdot K_{II}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (3)$$

де  $K_{U\sigma}(j\omega)$  – передаточна функція ТПЕП по напрузі,  $K_{II}(j\omega)$  – передаточна функція електронного одноканального тракту прийому,  $U(x, z, t)$  – електрична напруга на виході електронного одноканального тракту прийому.

## Розділ 1. Інформаційні системи

Математична модель систем вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів. Для реалізації методу вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів використовується схема вимірювання, що зображена на рис. 3.

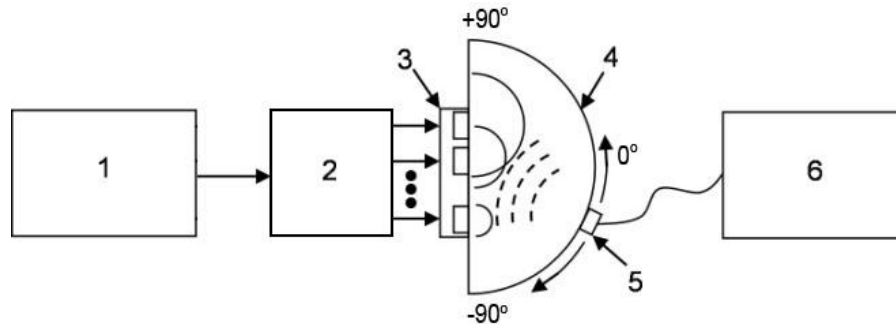


Рис. 3. Схема вимірювання ПЧХ лінійної ФАР на основі методу з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів в режимі випромінювання імпульсних сигналів:

1 – генератор радіоімпульсів; 2 – аналоговий перемикач; 3 – ФАР ПЕП; 4 – акустичне навантаження; 5 – ТПЕП; 6 – одноканальний програмований блок прийому

Відповідно до рис. 1 та рис. 3, при збудженні електричним імпульсом, сформованим одноканальним трактом випромінювання, форма акустичного тиску на випромінюючій поверхні  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР визначається наступним чином:

$$\bar{P}_{Bi}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ex}}(j\omega) \cdot K_E(j\omega) \cdot K_{P_{Ui}}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (4)$$

де  $K_E(j\omega)$  – передаточна функція вхідного електронного одноканального тракту випромінювання.

При випромінюванні  $i$ -им п'єзоперетворювачем ФАР, середнє значення акустичного тиску в довільній точці  $S(x, z)$ , в якій розташована прийомна поверхня ТПЕП, може бути представлено:

$$\bar{\sigma}_{S_{Ti}}(x, z, t) = \frac{1}{S_T} \int_{S_T} \frac{1}{S_{E_i}} \int_{S_{E_i}} \frac{A_i(x, y)}{r_i} \cdot P_i\left(t - \frac{r_i}{c}\right) \cdot e^{-\alpha(f)r_i} \cdot dS_{E_i} \cdot dS_T, \quad (5)$$

$P_i\left(t - \frac{r_i}{c}\right)$  – часова залежність ультразвукового імпульсу  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР.

Прийнятий електричний сигнал від  $i$ -го п'єзоперетворювача ФАР може бути визначений як:

$$U_i(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\sigma}_{s_{T_i}}(x, z, j\omega) \cdot K_{U\sigma}(j\omega) \cdot K_{II}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (6)$$

де  $\bar{\sigma}_{s_{T_i}}(x, z, j\omega)$  – частотний спектр прийнятого акустичного сигналу,  
 $U_i(x, z, t)$  – електрична напруга на виході електронного одноканального тракту прийому.

Приведені формули дозволяють визначити прийняті електричні сигнали від кожного п'єзоперетворювача ФАР. Подальше формування ПЧХ лінійної ФАР ПЕП виконується в пам'яті комп'ютера на основі принципу суперпозиції – введенням відповідних часових затримок до збережених відліків прийнятих сигналів та їх сумування. Сумарний сигнал ФАР на виході програмованого суматора для заданого положення ТПЕП визначається:

$$U(x, z, t) = \sum_{i=1}^N U_i(x, z, t - \Delta t_i). \quad (7)$$

### Експериментальні дослідження

Для проведення експериментальних досліджень використовувалась 12-ти елементна лінійна ФАР ПЕП з частотою 2,25 МГц, яка виконана у контактному варіанті для навантаження на сталь.

*Система вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з сумісним збудженням п'єзоперетворювачів.* Структурна схема розробленої системи зображена на рис. 4.

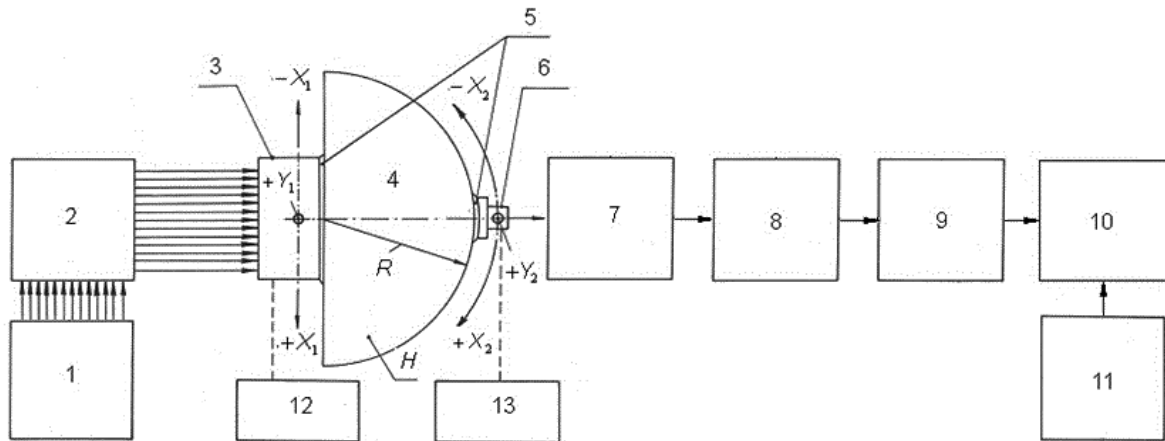


Рис. 4. Структурна схема системи вимірювання ПЧХ лінійної ФАР з сумісним збудженням п'єзоперетворювачів:

1 – багатоканальний генератор імпульсів затримок; 2 – багатоканальний блок підсилення; 3 – ФАР ПЕП; 4 – імітатор робочого середовища та акустичне навантаження; 5 – контактна рідина; 6 – ТПЕП; 7 – атенюатор; 8 – широко-смуговий підсилювач; 9 – цифровий осцилограф; 10 – персональний ком-п'ютер; 11 – програмне забезпечення; 12 – механічний пристрій орієнтації та фіксації ФАР ПЕП; 13 – механічний пристрій переміщення ТПЕП

Для проведення експериментальних досліджень виконано вимірювання вихідних параметрів багатоканального тракту випромінювання (амплітуди електричних імпульсів та часові затримки між ними) та одноканального тракту прийому (амплітундо- та фазо-частотна характеристики). Отримані значення вихідних параметрів використані при моделюванні системи вимірювання ПЧХ лінійної ФАР ПЕП з сумісним збудженням п'єзоперетворювачів в режимі випромінювання імпульсних сигналів.

Для даної системи точність встановлення часових затримок обмежена параметрами тактового генератора багатоканального генератора імпульсів. При частоті тактового генератора 100 МГц, крок формування часових затримок складає 10 нс. При заданому кроці, межа похибки встановлення часових затримок для заданих кутів відхилення характеристики напрямленості складає 14,2%.

*Система вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів.* Структурна схема розробленої системи приведена на рис. 5. Розроблено додаткове програмне забезпечення 11 (рис. 5), яке дозволяє виконувати багатоканальне програмове формування часових характеристик ФАР на основі принципу лінійної суперпозиції з збереженням відліків прийнятих сигналів від окремих п'єзоперетворювачів.

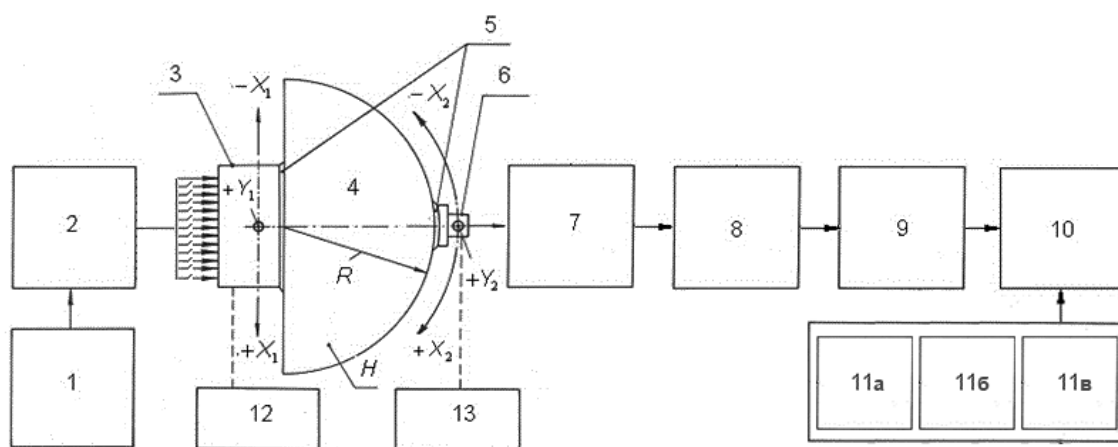


Рис. 5. Структурна схема системи вимірювання ПЧХ лінійної ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів:

- 1 – генератор імпульсів; 2 – аналоговий перемикач та комутатор;  
 3 – ФАР ПЕП; 4 – імітатор робочого середовища; 5 – контактна рідина;  
 6 – точковий п'єзоелектричний перетворювач (ТПЕП); 7 – атенюатор;  
 8 – широкосмуговий підсилювач; 9 – цифровий осцилограф; 10 – персональний комп'ютер; 11 – програмне забезпечення: а – , б – , в – ;  
 12 – механічний пристрій орієнтації та фіксації ФАР ПЕП; 13 – механічний пристрій переміщення ТПЕП

Для проведення експериментальних досліджень виконано вимірювання вихідних параметрів одноканального тракту випромінювання (амплітуда електричних імпульсів) та одноканального тракту прийому (амплітундо- та фазо-частотні характеристики). Отримані значення вихідних параметрів використані при моделюванні системи вимірювання ПЧХ лінійної ФАР ПЕП з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів в режимі випромінювання імпульсних сигналів.

Система вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів позбавлена обмежень, що пов'язані з неточністю встановлення часових затримок. Це обумовлено використанням математичного алгоритму багатоканальної інтерполяції. В свою чергу цей, алгоритм дозволяє формувати часові затримки для збережених відліків прийнятих сигналів окремих п'єзоперетворювачів ФАР з заданою точністю.

### Результати теоретичних та експериментальних досліджень

В даному розділі приведені результати порівняльного аналізу теоретичних та експериментальних ПЧХ лінійних ФАР ПЕП при навантаженні на сталь в режимі випромінювання імпульсних сигналів. Основні конструктивні параметри лінійної ФАР ПЕП, що використані при розрахунках приведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Конструктивні параметри лінійної ФАР ПЕП

Тип решітки	Контактна
Число фазокерованих перетворювачів	12
Номінальна частота, $F_H$	2,25 МГц
Ширина п'єзоелемента	1,1 мм
Крок решітки	1,3 мм
Проміжок між елементами	0,2 мм

Критерієм даного аналізу є значення величин параметрів, що визначають поперечну та повздовжню роздільну здатність систем НК, а саме:

- ширина діаграми напрямленості на рівні  $0,707 - \Delta\theta$ ;
- тривалість часової характеристики на рівні  $-20$  дБ –  $t_N$ .

Для розрахунку теоретичних ПЧХ лінійної ФАР ПЕП використовуються формули (1-3) та (3-6) без та з урахуванням похибок вимірювання.



## Розділ 1. Інформаційні системи

На рис. 6 приведені ідеалізовані характеристики напрямленості та часові характеристики лінійної ФАР ПЕП для кутів відхилення  $\theta=0^\circ$  та  $\theta=20^\circ$ , тобто без врахування похибок вимірювання.

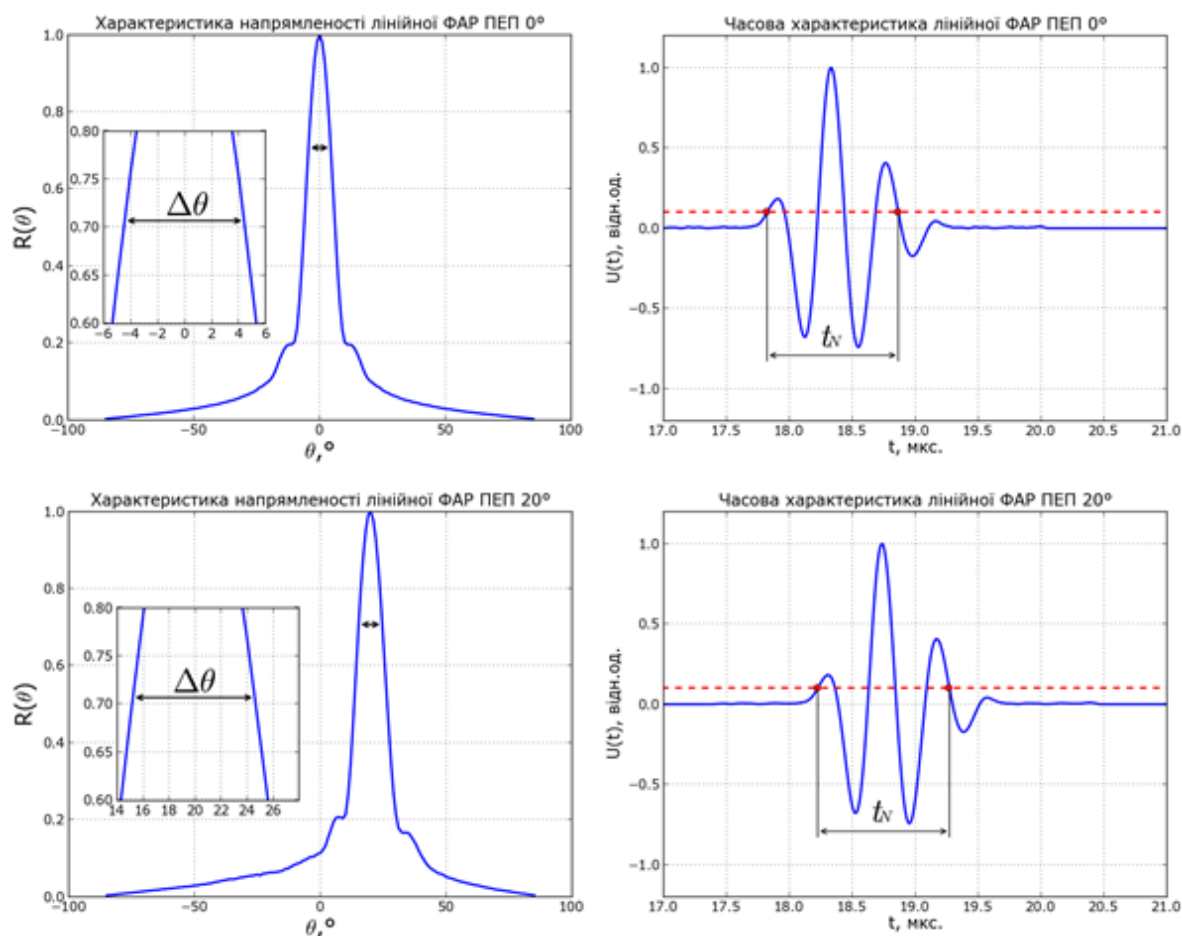


Рис. 6. Ідеалізовані характеристики напрямленості та часові характеристики лінійної ФАР ПЕП для кутів відхилення  $\theta=0^\circ$  та  $\theta=20^\circ$

Параметри розрахованих ПЧХ з урахуванням похибок вимірювання та експериментальних ПЧХ порівнювалися з параметрами ідеалізованих ПЧХ. Результати порівняння зведені у табл. 2 та табл. 3.

**Таблиця 2.**

Основні параметри розрахованих та експериментальних ПЧХ лінійної ФАР при сумісному збудженні п'єзоперетворювачів

	Ідеалізована модель		Модель з врахуванням похибок вимірювання		Експеримент	
	0	20	0	20	0	20
Кут відхилення $\theta_0,^\circ$						
Ширина характеристики напрямленості на рівні 0,707дБ $\Delta\theta,^\circ$	8,83	9,38	8,72	9,30	8,44	9,39

	Ідеалізована модель		Модель з врахуванням похибок вимірювання		Експеримент	
	0	20	0	20	0	20
Кут відхилення $\theta_0, ^\circ$	0	20	0	20	0	20
Відносна похибка, %	-	-	1,18	0,83	4,38	0,135
Тривалість часової характеристики на рівні -20дБ $t_N$ , мкс	1,04	1,05	1,053	1,08	1,06	1,11
Відносна похибка, %	-	-	1,25	2,85	1,9	4,9

Таблиця 3.

Основні параметри розрахованих та експериментальних ПЧХ лінійної ФАР при індивідуальному збудженні п'єзоперетворювачів

	Ідеалізована модель		Модель з врахуванням похибок вимірювання		Експеримент	
	0	20	0	20	0	20
Кут відхилення $\theta_0, ^\circ$	0	20	0	20	0	20
Ширина характеристики напрямленості на рівні 0,707дБ $\Delta\theta, ^\circ$	8,83	9,38	8,81	9,36	8,58	9,48
Відносна похибка, %	-	-	0,175	0,224	2,83	0,97
Тривалість часової характеристики на рівні -20дБ $t_N$ , мкс	1,04	1,05	1,047	1,06	1,05	1,07
Відносна похибка, %	-	-	0,67	0,95	0,96	1,9

Згідно з даними, приведеними в табл. 2 та табл. 3, при порівняльному аналізі між ідеалізованими та розрахованим ПЧХ лінійної ФАР ПЕП з урахуванням похибок вимірювання, відносна похибка вимірювання параметрів ПЧХ для системи з індивідуальним збудженням є меншою в порівнянні з відносною похибкою вимірювання для системи з сумісним збудженням для кутів відхилення характеристики напрямленості  $0^\circ$  та  $20^\circ$ . Різниця між похибками вимірювання ширини характеристики напрямленості при куті відхилення характеристики напрямленості  $0^\circ$  – 1,0%, при  $20^\circ$  – 0,6%, а різниця між похибками вимірювання тривалості часової характеристики при куті  $0^\circ$  – 0,58%, при  $20^\circ$  – 1,9%.

В свою чергу, при порівняльному аналізі між ідеалізованими та експериментальними ПЧХ лінійної ФАР ПЕП, відносна похибка вимірювання параметрів ПЧХ для системи з індивідуальним збудженням є меншою в порівнянні з відносною похибкою вимірювання для системи з сумісним збудженням для кутів відхилення характеристики напрямленості  $0^\circ$  та  $20^\circ$ . Різниця між похибками вимірювання ширини характеристики напрямленості при куті відхилення характеристики напрямленості  $0^\circ$  – 1,55 %, а різниця між похибками вимірювання тривалості часової характеристики при куті  $0^\circ$  – 0,94%, при  $20^\circ$  – 3,0%. Для кута відхилення  $20^\circ$  відносна похибка вимірювання ширини характеристики напрямленості для системи з сумісним збудженням є меншою за відносну похибку для системи з індивідуальним збудженням, дана різниця складає – 0,83%.

### **Висновки**

Розроблені математичні моделі систем вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з сумісним та індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів, при використанні вимірних вихідних параметрів електронних трактів випромінювання та прийому, дозволили врахувати похибки вимірювання, завдяки чому досягнута адекватність між розрахунковими та експериментальними ПЧХ лінійних ФАР в режимі випромінювання імпульсних сигналів.

В свою чергу, врахування похибок вимірювання дозволило підвищити точність обох розглянутих методів вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП. В результаті проведеного порівняльного аналізу обох систем, використання системи з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів дозволило провести вимірювання параметрів ПЧХ з меншою похибкою вимірювання за рахунок меншого впливу параметрів електронних трактів випромінювання та прийому системи на власні параметри ФАР.

### **Список використаної літератури**

1. Lamarre A. Ultrasonic phased-array for aircraft maintenance / A. Lamarre // Innovation in NDT. – Electronic data. – [Olympus, Amsterdam, 2009].
2. Mode of access: World Wide Web: <http://ndt.aero/images/docs/UTPAfor%20maintenance.pdf> – Title from the screen.
3. Kraskovsky A. P. Piezoelectric phased arrays for ultrasonic imaging system – flaw detector/tomograph / A.P. Kraskovsky // International conference „Sensors and Systems”: Proceedings. – St.Petersburg, Russia, 2002. – Vol.2.-p.p.28-32.
4. McNab A. Monolithic phased array for the transmission of ultrasound in NDT ultrasonics / A. McNab // Ultrasonics. – 1986. – V.24. – P.148-155.

5. Clay A. C. Experimental Study of Phased Array Beam Steering Characteristics / Clay A. C., Wooh S. C., Azar L., Wang J. Y. // Journal of Nondestructive Evaluation. – 1999. – V.18(2). – P.59-71.
6. Туз Ю.М. Вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів в режимі випромінювання на основі принципу суперпозиції / Туз Ю.М., Красковський О.П., Мосолаб О.О. // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – Харків. – 2014. - №1 II (45). С.223-228.