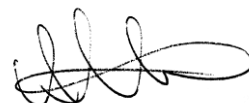


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**



МОСОЛАБ ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 006.91:53.082.4

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

Спеціальність 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та
метрологічне забезпечення

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Туз Юліан Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,
завідувач кафедри автоматизації експериментальних
досліджень

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сурду Михайло Миколайович,
академік Академії метрології України


кандидат технічних наук,
Шевкун Сергій Миколайович,
Державне підприємство «Укрметртестстандарт», м. Київ,
начальник науково-дослідного відділу державних еталонів
електромагнітних величин, часу і частоти

Захист відбудеться 21 грудня 2016 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 по захисту дисертації при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий __ листопада 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20,
к. т. н.


А. М. Ковальчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для підвищення рівня автоматизації ультразвукового (УЗ) неруйнівного контролю (НК) значного поширення набувають УЗ дефектоскопотографи на основі фазованих антенних решіток (ФАР) п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП).

Вірогідність та точність ультразвукового контролю, значною мірою, визначається параметрами просторово-часових характеристик (ПЧХ) лінійних ФАР ПЕП. Для вимірювання цих характеристик необхідно використовувати засоби, що забезпечують мінімальний вплив власних параметрів на параметри ФАР ПЕП.

На даний час для вимірювання характеристик та параметрів ФАР ПЕП використовується ДСТУ EN 16392-2:2015, який введено в дію з 01 січня 2016 р. Проте, в даному стандарті відсутні методики та схеми вимірювання параметрів ПЧХ з заданою точністю. Це призводить до необхідності розроблення та створення нових методів та засобів вимірювання параметрів ПЧХ.

Проведений аналіз відомих методів і засобів вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП дозволив виявити потенційні можливості підвищення точності вимірювання. Використання цих можливостей вимагає розроблення нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання, які дозволять зменшити вплив похибок багатоканальних трактів УЗ систем на точність вимірювання параметрів ПЧХ лінійних ФАР ПЕП.

Питанням вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП за допомогою багатоканальних УЗ систем при навантаженні на сталь присвячені роботи вчених: McNab A., Clay A.C., Wooh S.-C., Azar L., Wang J.-Y., Точинського Є.Г., Красковського О.П., Самокрутова А.А., Туза Ю.М.

Для оцінки ефективності методів вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП необхідним є створення математичних моделей трактів випромінювання та прийому систем, що враховують вплив похибок вимірювання. Використання цих моделей дозволить провести порівняльний аналіз між розрахунковими та експериментальними ПЧХ та оцінити ступінь їх близькості. Хоча моделюванню УЗ систем із урахуванням похибок електронних трактів випромінювання та прийому присвячено достатню кількість публікацій, а саме: Пілецкаса Э.Л., Ноен Р.Л., Lancee С.Т., Wustenberg Н., Erhard А., здебільшого розглядається вплив окремо амплітудних або фазових похибок електронних трактів випромінювання та прийому цих систем на ПЧХ лінійних ФАР ПЕП, тобто без урахування спільного впливу амплітудно-фазових похибок.

Таким чином, актуальною задачею є розробка нових методів і засобів вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП, які зменшують сумісний вплив амплітудно-фазових похибок трактів випромінювання та прийому УЗ систем, що забезпечує підвищення точності вимірювання параметрів ПЧХ. Необхідним також є створення математичних моделей трактів випромінювання та прийому УЗ систем з урахуванням похибок вимірювання, які дозволяють отримати розрахункові ПЧХ адекватні експериментальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України "Київський політехнічний

інститут" у відповідності з планами науково-дослідних робіт та в рамках господарських тем:

- НДР "Розробка та виготовлення ультразвукових п'єзоелектричних фазованих решіток для автоматизованої системи неруйнівного контролю колісних пар залізничних вагонів" (договір № 0-001/2006, 2006-2009 рр.);
- НДР "Розробка та виготовлення ультразвукових п'єзоелектричних імерсійних датчиків для систем автоматизованого контролю залізничних коліс" (договір № 87/2007, 2007 р.);
- НДР "Підготовка до розробки ватметра для вимірювання потужності витрат в індуктивних елементах при несинусоїдальному струмі" (договір М/330-2012, 2012 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є розробка методів і засобів підвищення точності вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП у режимі випромінювання імпульсних сигналів шляхом урахування та зменшення сумісного впливу амплітудно-фазових похибок вимірювання.

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено наступні задачі:

1. Аналіз існуючих методів і засобів вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП.
2. Побудова математичних моделей систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП у режимі випромінювання імпульсних сигналів, з урахуванням похибок вимірювання.
3. Розроблення методик і програмного забезпечення для чисельних розрахунків ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП на основі створених математичних моделей.
4. Створення систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП із підвищеною точністю для проведення експериментальних досліджень у режимі випромінювання імпульсних сигналів.
5. Проведення експериментальних досліджень ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП у режимі випромінювання імпульсних сигналів із використанням розроблених систем вимірювання.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання просторово-часових характеристик ультразвукових лінійних ФАР ПЕП.

Предмет дослідження – методи та засоби підвищення точності вимірювання просторово-часових характеристик ультразвукових лінійних ФАР ПЕП при навантаженні на сталь в режимі випромінювання імпульсних сигналів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувалися методи теорії вимірювання, математичного аналізу та моделювання, теорії ультразвукового неруйнівного контролю, цифрової обробки сигналів. Чисельне моделювання з використанням комп'ютерної техніки виконано за допомогою комплексу комп'ютерної математики NumPy, пакету програм MatLAB та середовища розробки програмного забезпечення National Instruments LabView 9.0.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше створено класифікацію похибок, які виникають при вимірюванні ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП, на основі якої обґрунтовано вибір тих похибок, що найбільш негативно впливають на точність вимірювання параметрів ПЧХ.

2. Створено математичну модель системи вимірювання ПЧХ із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів лінійних ФАР, яка відрізняється введенням коригуючих коефіцієнтів, що враховують похибки багатоканального тракту випромінювання та одноканального тракту прийому, завдяки чому досягається зближення значень параметрів розрахованих та експериментальних ПЧХ у режимі випромінювання імпульсних сигналів.

3. Створено математичну модель системи вимірювання ПЧХ з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів лінійних ФАР, яка відрізняється введенням коригуючих коефіцієнтів, що враховують похибки одноканального тракту випромінювання та програмованого багатоканального тракту прийому, завдяки чому досягається зближення значень параметрів розрахованих та експериментальних ПЧХ в режимі випромінювання імпульсних сигналів.

4. Розроблено метод вимірювання ПЧХ з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів лінійних ФАР з інтерполяцією відліків прийнятих сигналів, що дозволяє ввести ідентичні часові затримки з підвищеною точністю в програмованому багатоканальному тракті прийому, завдяки чому досягається збільшення точності вимірювання ПЧХ у режимі випромінювання імпульсних сигналів.

Практичне значення одержаних результатів. Створено та впроваджено експериментальну систему вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП при навантаженні на сталь в режимі випромінювання імпульсних сигналів. В основу реалізації цієї системи покладено розроблений метод вимірювання ПЧХ з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів, а також нову математичну модель системи вимірювання ПЧХ з урахуванням похибок вимірювання. Це дозволило, на відміну від системи вимірювання ПЧХ із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів, досягти більшого зближення значень параметрів розрахункових та експериментальних ПЧХ лінійних ФАР ПЕП та, тим самим, підвищити точність їх вимірювання.

Розроблено інженерні методики та програмне забезпечення для чисельних розрахунків ПЧХ лінійних ФАР ПЕП на основі розроблених математичних моделей.

Результати досліджень, проведених в роботі, використано у навчальному процесі на кафедрі автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» і впроваджено на Державному підприємстві «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної Академії Наук України» (м. Київ) і в Науково-виробничій фірмі «Ультракон» (м. Київ), що підтверджуються відповідними актами, наведеними в додатку.

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення та результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. Роботи [10, 15] написані автором особисто. В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, дисертантом зроблено наступне: проведено аналіз методів та засобів вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП [8, 9], проведено аналіз впливу похибок багатоканального тракту випромінювання на точність вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП в режимі випромінювання імпульсних сигналів [2, 13], запропоновано методику чисельного моделювання ПЧХ ультразвукових

лінійних ФАР ПЕП з урахуванням похибок вимірювання в режимі випромінювання імпульсних сигналів [4], розроблено методи вимірювання та проведено експериментальні дослідження ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП [1, 3, 5, 6, 12, 14], представлено розроблені системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП та результати експериментальних досліджень [11, 16]. Автор особисто представляв результати дисертаційних досліджень на міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: IX, X, XI Міжнародних технічних конференціях "Приладобудування: стан і перспективи" (м. Київ, Україна, 2010, 2011, 2012 рр.); IX Міжнародній науково-технічній конференції "Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки" (м. Київ, Україна, 2013 р.), XI, XII, XIII Міжнародних науково-практичних конференціях "Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments" (м. Москва, Російська Федерація, 2012, 2013, 2014 рр.), XV Міжнародній науково-технічній конференції "Системний аналіз та інформаційні технології" (м. Київ, Україна, 2013 р.), IV науково-практичній конференції "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання" (м. Івано-Франківськ, Україна, 2014 р.).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 16 наукових праць, а саме: 6 статей у наукових фахових виданнях (5 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 1 без співавторів), 1 патент України на корисну модель, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 133 найменувань і 5 додатків, які містять акти впровадження. Загальний обсяг дисертації складає 190 сторінки, з яких основний текст викладено на 134 сторінках друкованого тексту, містить 44 рисунки, 10 таблиць. Додатки, викладено на 56 сторінках, містять матеріали, які не увійшли до основної частини дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, темами та планами, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет досліджень, наведено методи виконання досліджень, описано наукову новизну та практичне значення отриманих в дисертації результатів дослідження, вказано особистий внесок здобувача, наведено дані про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації, описано структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі дисертаційної роботи дано визначення просторової (ПХ) та часової (ЧХ) характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів у режимі випромінювання, прийому, випромінювання-прийому імпульсних сигналів. Наведено основні параметри ПЧХ, які визначають поперечну та поздовжню роздільну здатність лінійних ФАР ПЕП при ультразвуковому неруйнівному контролю досліджуваних об'єктів.

Створено класифікацію похибок, що виникають при вимірюванні ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП при навантаженні на сталь (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація похибок вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП

На основі запропонованої класифікації обґрунтовано вибір похибок, що мають найбільший негативний вплив на точність вимірювання параметрів ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП, а саме – похибки, обумовлені сумісним впливом амплітудних та фазових відхилень вихідної напруги багатоканальних електронних трактів випромінювання та прийому.

На основі проведеного аналізу УЗ методів вимірювання ПЧХ лінійних ФАР ПЕП, обґрунтовано доцільність розроблення нових методів і засобів вимірювання, які дозволяють зменшити сумісний вплив амплітудних та фазових похибок трактів випромінювання та прийому на точність вимірювання параметрів ПЧХ.

За результатами проведеного аналізу сформульовані мета та задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі основна увага приділяється обґрунтуванню математичних моделей систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП у режимі випромінювання імпульсних сигналів та математичних моделей похибок цих систем.

Для побудови математичних моделей систем вимірювання використано геометричні співвідношення, зображені на рис. 2.

Математичну модель системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів створено на основі схеми вимірювання, яка реалізує традиційний метод (рис. 3).

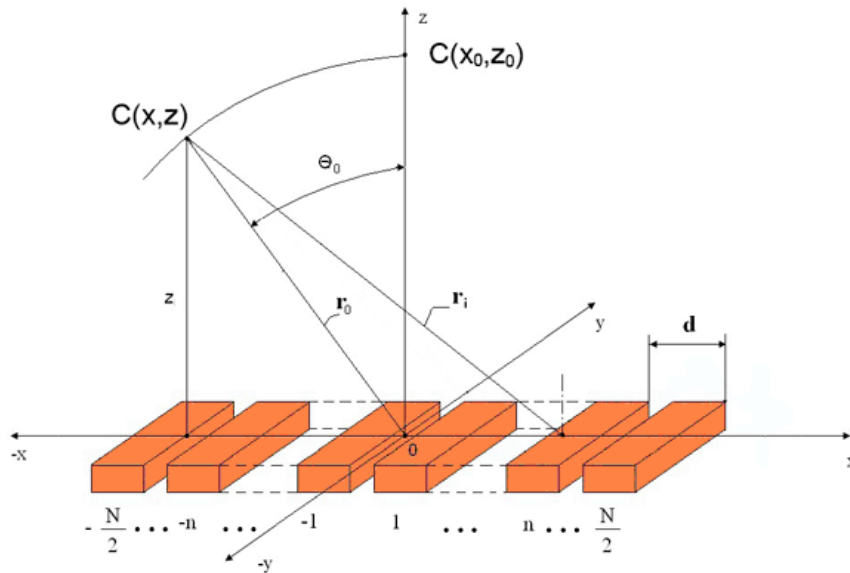


Рис. 2. Геометричні співвідношення, прийняті при створенні математичних моделей систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП

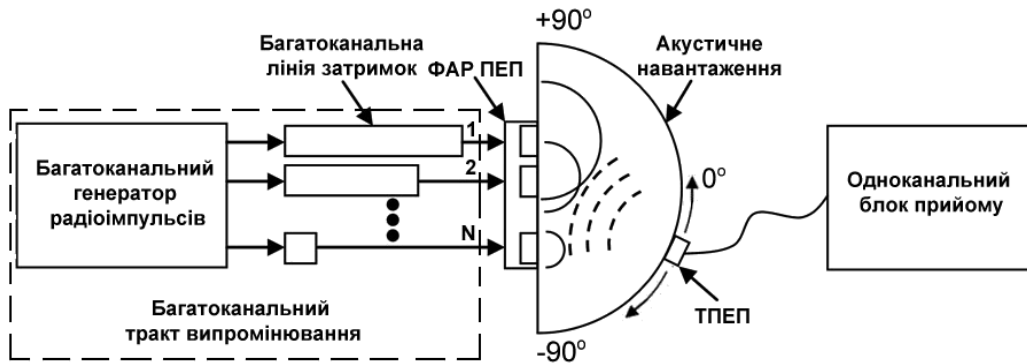


Рис. 3. Схема вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП на основі традиційного методу

Відповідно до рис. 2 та рис. 3, при збудженні електричним імпульсом, сформованим i -им електронним каналом багатоканального тракту випромінювання, форма акустичного тиску на випромінюючій поверхні i -го п'єзоперетворювача ФАР:

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

де $U_{\text{вх}}(j\omega)$ – частотний спектр електричного імпульсу збудження $U_{\text{вх}}(t)$; $K_{Ei}(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі i -го електричного каналу багатоканального тракту випромінювання; $K_{Pui}(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі i -го п'єзоперетворювача ФАР по напрузі.

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

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

де $A_i(x, y)$ – розподіл амплітуди акустичного тиску на випромінюючій поверхні i -го п'єзоперетворювача ФАР; $\bar{P}_i\left(t - \frac{r_i}{c} - \Delta t_i\right)$ – часова залежність УЗ 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 п'єзоперетворювачами ФАР; c – швидкість ультразвуку; θ_0 – кут між віссю z та напрямком на точку $C(x, z)$ в площині сканування; β – коефіцієнт втрат; $\alpha(f)$ – коефіцієнт загасання ультразвукових коливань; 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 визначається залежністю:

$$U_0(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\sigma}_{S_T}(x, z, j\omega) \cdot K_{U\sigma}(j\omega) \cdot K_{\Pi}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (3)$$

де $K_{U\sigma}(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі ТПЕП по напрузі; $K_{\Pi}(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі електронного одноканального тракту прийому; $U_0(x, z, t)$ – електрична напруга на виході електронного одноканального тракту прийому.

Вимірний електричний сигнал ФАР ПЕП з урахуванням похибки вимірювання:

$$\dot{U}_{\text{Твих}} = |U_0| \cdot (1 + \gamma_{|K_T|}) \cdot e^{j(\varphi_0 + \Delta\varphi_{K_T})}, \quad (4)$$

де $|U_0|$ та φ_0 – номінальні значення модуля та фази напруги прийнятого електричного сигналу, відповідно; $\gamma_{|K_T|}$ та $\Delta\varphi_{K_T}$ – похибки модуля амплітуди та фази напруги прийнятого електричного сигналу, відповідно.

Математичну модель системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів створено на основі схеми вимірювання, яка реалізує метод суперпозиції (рис. 4).

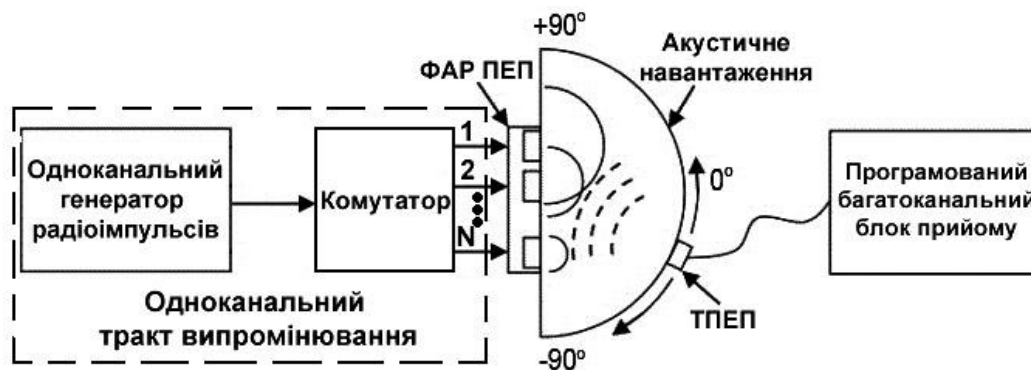


Рис. 4. Схема вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП на основі методу суперпозиції

Відповідно до рис. 2 та рис. 4, при збудженні електричним імпульсом, сформованим одноканальним трактом випромінювання, форма акустичного тиску на випромінюючій поверхні i -го п'єзоперетворювача ФАР визначається залежністю:

$$\bar{P}_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{вх}}(j\omega) \cdot K_E(j\omega) \cdot K_{PUI}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (5)$$

де $K_E(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі електронного одноканального тракту випромінювання.

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

$$\bar{\sigma}_{S_{T_i}}(x, z, t) = \frac{1}{S_T} \int_{S_T} \frac{1}{S_{E_i}} \int_{S_{E_i}} A_i(x, y) \cdot \bar{P}_i\left(t - \frac{r_i}{c}\right) \cdot \frac{\beta \cdot e^{-\alpha(f)r_i}}{r_i} \cdot dS_{E_i} \cdot dS_T, \quad (6)$$

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

Прийнятий електричний сигнал від i -го п'єзоперетворювача ФАР визначається залежністю:

$$U_{oi}(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\sigma}_{S_{T_i}}(x, z, j\omega) \cdot K_{UG}(j\omega) \cdot K_{II}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (7)$$

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.

Наведені формули дозволяють визначити прийняті електричні сигнали від кожного п'єзоперетворювача ФАР. Формування ПЧХ лінійної ФАР ПЕП виконується на основі принципу суперпозиції введенням часових затримок для збережених відліків прийнятих сигналів та їх подальшим підсумовуванням. Сумарний сигнал ФАР на виході програмованого багатоканального суматора для заданого положення ТПЕП:

$$U_0(x, z, t) = \sum_{i=1}^N U_{oi}(x, z, t - \Delta t_i). \quad (8)$$

Вимірний сумарний сигнал ФАР ПЕП з урахуванням похибки вимірювання:

$$\dot{U}_{\text{свих}} = \sum_{i=1}^N |U_{oi}| \cdot (1 + \gamma_{|K_{Ci}|}) \cdot e^{j(\varphi_{oi} + \Delta\varphi_{K_{Ci}})} = |U_0| \cdot (1 + \gamma_{|K_C|}) \cdot e^{j(\varphi_0 + \Delta\varphi_{K_C})}, \quad (9)$$

де $|U_{oi}|$ та φ_{oi} – номінальні значення модуля та фази напруги електричного сигналу, прийнятого від i -го п'єзоперетворювача ФАР, відповідно; $\gamma_{|K_{Ci}|}$ та $\Delta\varphi_{K_{Ci}}$ – похибки модуля амплітуди та фази напруги електричного сигналу, прийнятого від i -го п'єзоперетворювача ФАР, відповідно; $\gamma_{|K_C|}$ та $\Delta\varphi_{K_C}$ – похибки модуля амплітуди та фази напруги сумарного електричного сигналу.

Для побудови математичних моделей розглянутих систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП з урахуванням похибок вимірювання використано розроблені структурні схеми, визначено їх рівняння перетворення та комплексні коефіцієнти передачі.

Розроблена структурна схема системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів зображена на рис. 5.

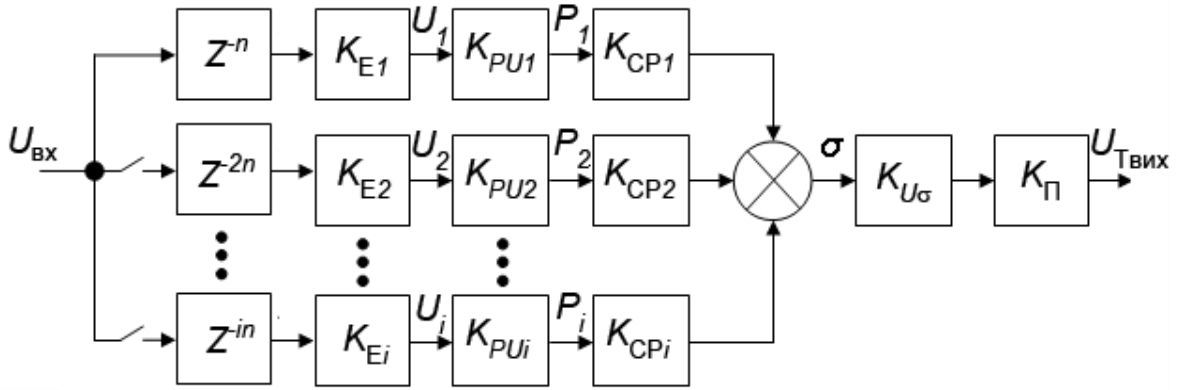


Рис. 5. Структурна схема системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів

Рівняння перетворення та комплексний коефіцієнт передачі, відповідно:

$$U_{\text{ТВИХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot K_{U\sigma} \cdot K_{\Pi} \cdot \sum_{i=1}^N K_{Ei} \cdot K_{PUI} \cdot K_{CPI}, \quad (10)$$

$$K_{\text{T}} = |K_{U\sigma}| e^{j\varphi_{K_{U\sigma}}} \cdot |K_{\Pi}| e^{j\varphi_{K_{\Pi}}} \cdot \sum_{i=1}^N |K_{Ei}| e^{j\varphi_{K_{Ei}}} \cdot |K_{PUI}| e^{j\varphi_{K_{PUI}}} \cdot |K_{CPI}| e^{j\varphi_{K_{CPI}}} \cdot e^{j\varphi_{Zi}}, \quad (11)$$

де K_{Ei} – коефіцієнт передачі i -го електронного каналу багатоканального тракту випромінювання; K_{PUI} – коефіцієнт передачі i -го п'єзоперетворювача ФАР; K_{CPI} – коефіцієнт передачі акустичного навантаження для i -го п'єзоперетворювача ФАР; $K_{U\sigma}$ – коефіцієнт передачі ТПЕП по напрузі; K_{Π} – коефіцієнт передачі електронного одноканального тракту прийому; φ_{Zi} – фазовий зсув, що вноситься i -им каналом багатоканального тракту випромінювання.

Відповідно, відносна похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів:

$$\begin{aligned} \gamma_{|K_{\text{T}}|} = & (\gamma_{U\sigma} + \gamma_{\Pi}) + \left(\sum_{i=1}^N (\gamma_{Ei} + \gamma_{PUI} + \gamma_{CPI}) + \right. \\ & + \sum_{i,j=1, j \neq i}^N (\gamma_{Ei} + \gamma_{PUI} + \gamma_{CPI} + \gamma_{Ej} + \gamma_{PUj} + \gamma_{CPj} - (\Delta\varphi_{Zi} - \Delta\varphi_{Zj}) \cdot \text{tg}(k\Delta_{ij} + \varphi_{Zi} - \varphi_{Zj})) \times \\ & \left. \times \cos(k\Delta_{ij} + \varphi_{Zi} - \varphi_{Zj}) \right) \cdot \left(N + 2 \cdot \sum_{i,j=1, j \neq i}^N \cos(k\Delta_{ij} + \varphi_{Zi} - \varphi_{Zj}) \right)^{-1}, \quad (12) \end{aligned}$$

де γ_{Ei} – похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі i -го електронного каналу багатоканального тракту випромінювання; γ_{PUI} – похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі i -го п'єзоперетворювача ФАР; γ_{CPI} – похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі акустичного навантаження для i -го п'єзоперетворювача ФАР; $\gamma_{U\sigma}$ – похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі ТПЕП; γ_{Π} – похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі електронного

одноканального тракту прийому; $\Delta\varphi_{zi}$ – похибка фазового зсуву, що вноситься i -им каналом багатоканального тракту випромінювання; k – хвильове число; $\Delta_{ij} = r_i - r_j$ – різниця ходу між i -им та j -им п'єзоперетворювачами ФАР; r_i і r_j – відстань від i -ого та j -ого п'єзоперетворювача ФАР до точки $C(x, z)$; $\varphi_{zi} = \frac{i \cdot 2\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\theta_0)$ – фазовий зсув i -го каналу багатоканального тракту випромінювання; d – крок між п'єзоперетворювачами ФАР; λ – довжина акустичної хвилі в імітаторі середовища; θ_0 – кут від осі z на точку $C(x, z)$.

Розроблена структурна схема системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів зображена на рис. 6.

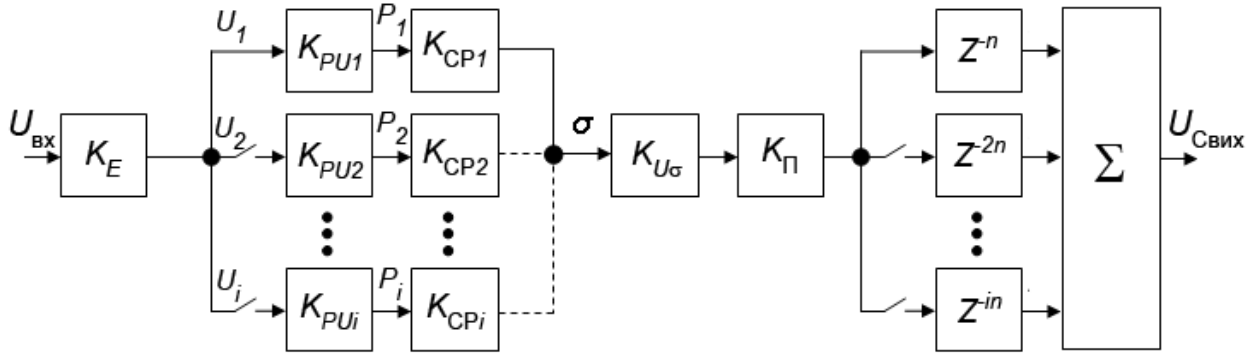


Рис. 6. Структурна схема системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів

Рівняння перетворення та комплексний коефіцієнт передачі, відповідно:

$$U_{\text{Свих}} = \sum_{i=1}^N U_{\text{вих}_i} = U_{\text{ВХ}} \cdot K_E \cdot K_{U\sigma} \cdot K_{\Pi} \cdot \sum_{i=1}^N K_{P_{U_i}} \cdot K_{C_{P_i}}, \quad (13)$$

$$K_C = |K_E| e^{j\varphi_{K_E}} \cdot |K_{U\sigma}| e^{j\varphi_{K_{U\sigma}}} \cdot |K_{\Pi}| e^{j\varphi_{K_{\Pi}}} \cdot \sum_{i=1}^N |K_{P_{U_i}}| e^{j\varphi_{K_{P_{U_i}}}} \cdot |K_{C_{P_i}}| e^{j\varphi_{K_{C_{P_i}}}} \cdot e^{j\varphi_{z_i}}, \quad (14)$$

де K_E – коефіцієнт передачі електронного одноканального тракту випромінювання.

Відповідно, відносна похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів:

$$\begin{aligned} \gamma_{|K_C|} = & (\gamma_E + \gamma_{U\sigma} + \gamma_{\Pi}) + \left(\sum_{i=1}^N (\gamma_{P_{U_i}} + \gamma_{C_{P_i}}) + \right. \\ & \left. + \sum_{i,j=1, j \neq i}^N (\gamma_{P_{U_i}} + \gamma_{C_{P_i}} + \gamma_{P_{U_j}} + \gamma_{C_{P_j}}) \cdot \cos(k\Delta_{ij} + \varphi_{z_i} - \varphi_{z_j}) \right) \times \\ & \times \left(N + 2 \cdot \sum_{i,j=1, j \neq i}^N \cos(k\Delta_{ij} + \varphi_{z_i} - \varphi_{z_j}) \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (15)$$

де γ_E – похибка модуля комплексного коефіцієнта передачі електронного одноканального тракту випромінювання.

Отримані відносні похибки модулів комплексних коефіцієнтів передачі систем із сумісним (12) та з індивідуальним (15) збудженням п'єзоперетворювачів УЗ лінійних ФАР дозволяють урахувати та оцінити вплив похибок трактів випромінювання та прийому на точність вимірювання параметрів ПЧХ лінійних ФАР ПЕП.

Проведено порівняльний аналіз математичних моделей похибок вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП з урахуванням та без урахування фазових затримок. Доведено, що система вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів забезпечує меншу похибку вимірювання ніж система із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів при виконанні умови:

$$\gamma_{|K_T|} - \gamma_{|K_C|} \geq 0. \quad (16)$$

У третьому розділі представлено технічні характеристики та структурні схеми розроблених систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним (рис. 7) та з індивідуальним (рис. 8) збудженням п'єзоперетворювачів.

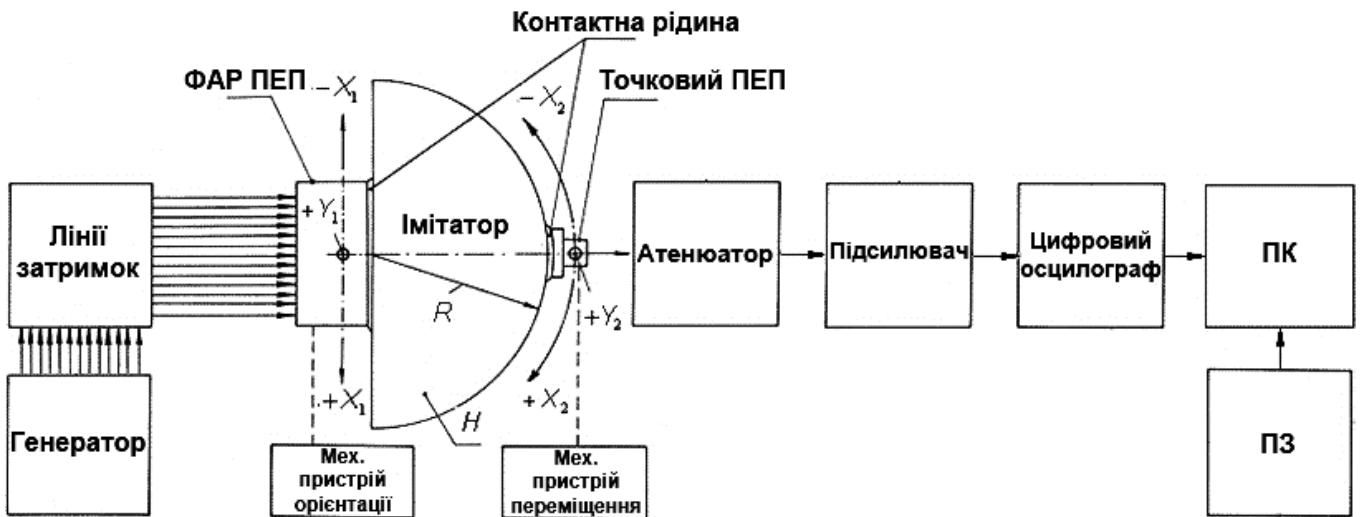


Рис. 7 Структурна схема розробленої системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів



Рис. 8. Структурна схема розробленої системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів

Система вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів включає 12-ти каналний тракт випромінювання та одноканальний тракт прийому.

Система вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням включає одноканальний тракт випромінювання та програмований багатоканальний тракт прийому для формування ПЧХ в пам'яті комп'ютера.

Дані системи забезпечують вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних контактних ФАР ПЕП у діапазоні частот від 1,0 до 10,0 МГц в секторі сканування від 0° до 45° .

Для вимірювання параметрів ПЧХ ультразвукової лінійної ФАР ПЕП у режимі випромінювання імпульсних сигналів для обох систем використовувалось акустичне навантаження (імітатор середовища) у вигляді напівциліндру з параметрами, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри акустичного навантаження

Назва параметру	Значення параметру
Матеріал	сталь 45
Висота, мм	$200 \pm 2,0$
Радіус, мм	$100 \pm 1,0$
Шорсткість Ra , мкм	$\leq 0,63$
Допуск на відхилення від площинності M , мм	0,005
Допуск циліндричності K , мм	0,02
Загасання звуку $\alpha(f)$, дБ/мм	$< 0,05$
Швидкість звуку, м/с	5915 ± 100

Наведено схеми вимірювання метрологічних характеристик трактів випромінювання та прийому розроблених систем. Їх використання дозволило визначити:

- а) для системи із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів:
 - міжканальні амплітудні похибки багатоканального тракту випромінювання;
 - міжканальні часові похибки багатоканального тракту випромінювання;
 - амплітудно- та фазо-частотні характеристики одноканального тракту прийому;
- б) для системи з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів:
 - амплітудну похибку одноканального тракту випромінювання;
 - амплітудно- та фазо-частотні характеристики тракту прийому.

Для системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів наведено розроблений алгоритм інтерполяції збережених відліків сигналів, який дозволяє ввести ідентичні часові затримки із підвищеною точністю в програмованому багатоканальному тракті прийому при формуванні ПЧХ.

У четвертому розділі представлено конструктивні та електроакустичні параметри досліджуваної 12-ти елементної ультразвукової контактної лінійної ФАР ПЕП з номінальною частотою 2,25 МГц.

Проведено порівняльний аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень впливу параметрів обох систем вимірювання на власні параметри

лінійної ФАР ПЕП. Результати порівняльного аналізу між теоретичними ПЧХ без урахування та з урахуванням похибок вимірювання і експериментальними ПЧХ для кутів відхилення характеристики напрямленості 0° та 20° наведені в табл. 2. (рис. 9) та табл. 3 (рис. 10), відповідно.

Таблиця 2

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

Кут відхилення $\theta, ^\circ$	Ідеалізована модель		Модель із урахуванням похибок вимірювання		Експеримент	
	0	20	0	20	0	20
Ширина характеристики напрямленості на рівні $0,707\text{дБ } \Delta\theta, ^\circ$	8,83	9,38	8,72	9,30	8,44	9,39
Відносна похибка, %	-	-	1,18	0,83	4,38	0,135
Тривалість часової характеристики на рівні $-20\text{дБ } t_N, \text{ мкс}$	1,04	1,05	1,053	1,08	1,06	1,11
Відносна похибка, %	-	-	1,25	2,85	1,9	4,9

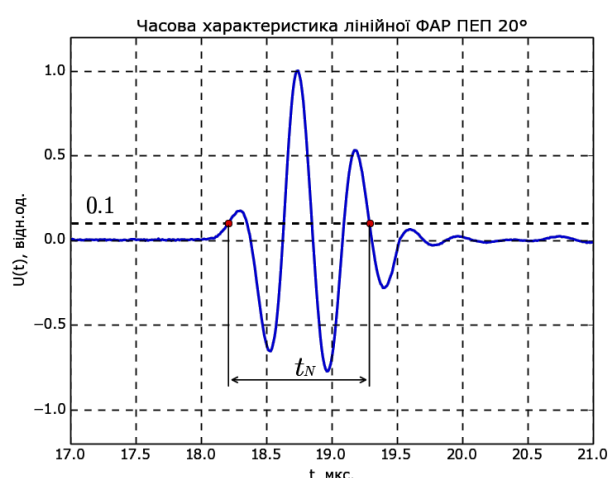
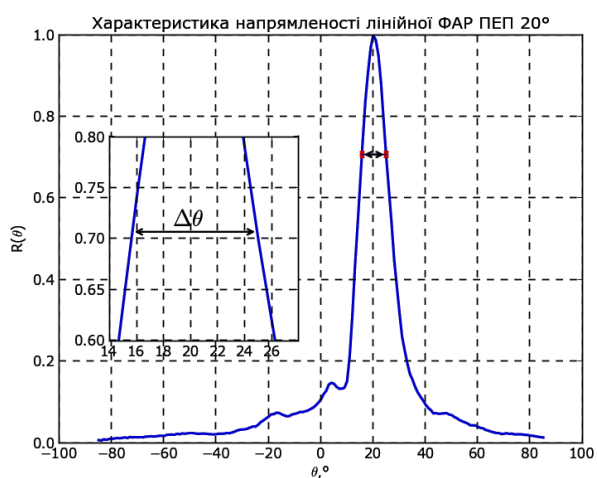
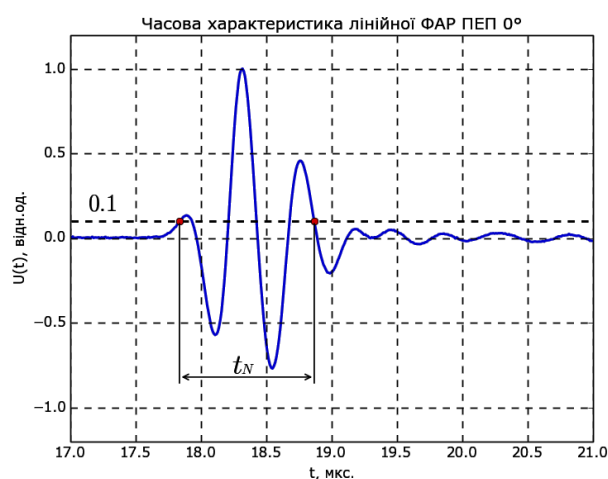
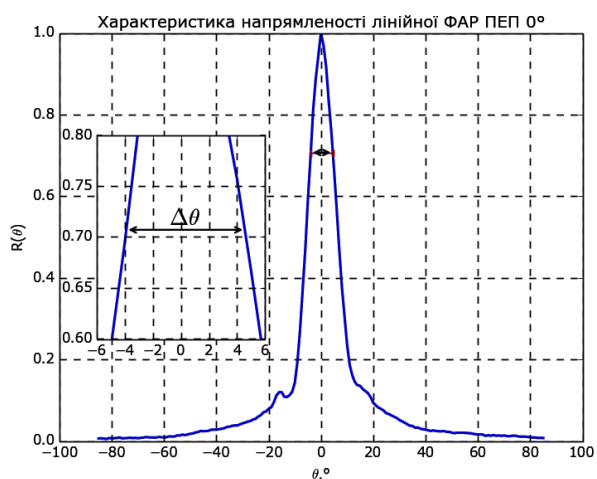


Рис. 9. Експериментальні просторові та часові характеристики УЗ лінійної ФАР при сумісному збудженні п'єзоперетворювачів для кутів $\theta=0^\circ$ та $\theta=20^\circ$

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

	Ідеалізована модель		Модель із урахуванням похибок вимірювання		Експеримент	
	0	20	0	20	0	20
Кут відхилення $\theta, ^\circ$	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 $t_N, \text{мкс}$	1,04	1,05	1,047	1,06	1,05	1,07
Відносна похибка, %	-	-	0,67	0,95	0,96	1,9

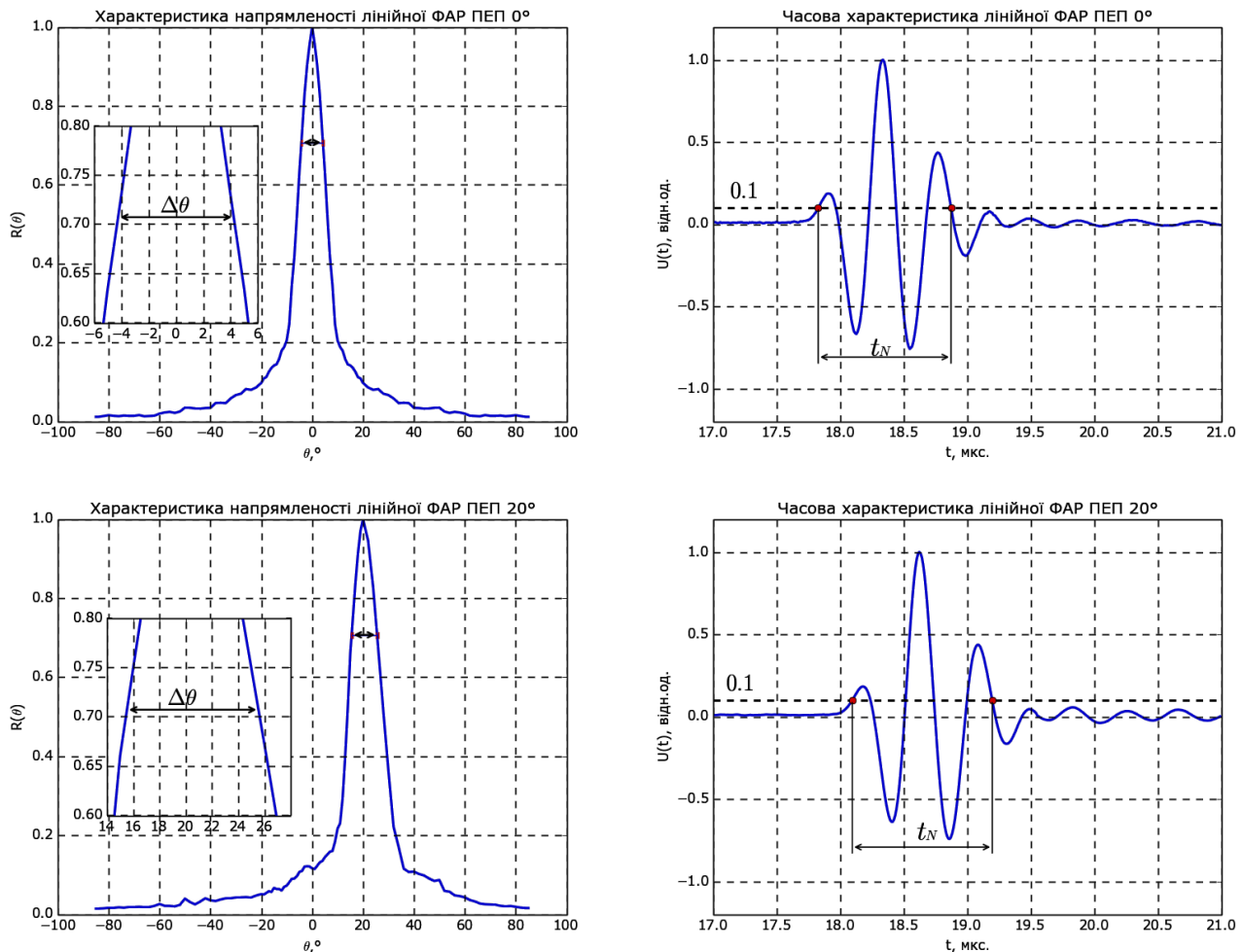


Рис. 10. Експериментальні просторові та часові характеристики УЗ лінійної ФАР при індивідуальному збудженні п'єзоперетворювачів для кутів $\theta=0^\circ$ та $\theta=20^\circ$

Оцінка ефективності розроблених систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП проведена на основі порівняльного аналізу параметрів непевності результатів багаторазових вимірювань параметрів ПЧХ – ширини характеристики напрямленості на рівні 0,707 та тривалості часової характеристики на рівні -20дБ.

На основі визначених параметрів непевності результатів вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП показано, що при заданому рівні довіри $p=0,95$ розширена непевність результату вимірювання параметрів ПЧХ для системи з індивідуальним збудженням є меншою ніж для системи із сумісним збудженням:

- ширини характеристики напрямленості при кутах відхилення 0° та 20° , відповідно, становить $\pm 0,68^\circ < \pm 1,26^\circ$ та $\pm 0,94^\circ < \pm 1,78^\circ$;
- тривалості часової характеристики при кутах відхилення 0° та 20° , відповідно, становить $\pm 19,0 \cdot 10^{-9} \text{ с} < \pm 24,4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ та $\pm 42,6 \cdot 10^{-9} \text{ с} < \pm 68,2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.

У висновках сформульовано основні теоретичні та практичні результати проведених досліджень.

У додатках наведено матеріали, що не увійшли до основного тексту. Зокрема, акти впровадження основних результатів дисертаційної роботи, вихідний код програмного забезпечення, методику проведення чисельних розрахунків ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП, розрахунки метрологічних характеристики трактів випромінювання та прийому розроблених систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП, результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Вперше здійснено класифікацію похибок, які виникають при вимірюванні ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП, що дозволило виділити ті з них, які найбільш негативно впливають на точність вимірювання параметрів ПЧХ, а саме похибки, обумовлені амплітудними та фазовими відхиленнями вихідної напруги багатоканальних трактів випромінювання та прийому імпульсних сигналів.

2. Розроблено новий метод вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів, який на відміну від традиційного методу із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів дозволяє в режимі випромінювання імпульсних сигналів підвищити точність вимірювання параметрів ПЧХ, а саме: ширини характеристики напрямленості на 5 % та тривалості часової характеристики на 2 %.

3. Побудовано нові математичні моделі систем вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП, а саме – системи із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів, з коригуючими коефіцієнтами, що враховують похибки багатоканального тракту випромінювання та одноканального тракту прийому, а також системи з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів, з коригуючими коефіцієнтами, що враховують похибки одноканального тракту випромінювання та програмованого багатоканального тракту прийому, завдяки чому досягається більше зближення значень параметрів розрахованих та експериментальних ПЧХ для системи з індивідуальним збудженням ніж для системи із сумісним збудженням, що підтверджено результатами порівняльного аналізу.

4. На основі створених математичних моделей розроблено методики та програмне забезпечення, які дозволяють проводити розрахунок ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП з урахуванням похибок вимірювання.

5. Створено та експериментально досліджено системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР із сумісним та з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів, у основу яких покладені традиційний метод та метод суперпозиції, що дозволило провести порівняльний аналіз параметрів ПЧХ та підтвердити, що система з індивідуальним збудженням п'єзоперетворювачів має менші похибки вимірювання ніж система із сумісним збудженням п'єзоперетворювачів, а саме: для ширини характеристики напрямленості на 1,55 % та тривалості часової характеристики на 0,94 %.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено на Державному підприємстві «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної Академії Наук України» і в Науково-виробничій фірмі «Ультракон» та можуть бути використані для розробки та виробництва УЗ багатоканальних дефектоскопів-томографів на основі лінійних ФАР ПЕП, призначених для неруйнівного контролю виробів з металу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Туз Ю.М. Метод та система вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал. – 2012. – № 1 (28). – С. 148-153.

2. Туз Ю.М. Аналіз похибок системи вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – 2012. – № 6 (82). – С. 62-66. (Журнал включено до Міжнародних наукометричних баз даних *Ulrich's Periodical Directory*, РІНЦ).

3. Туз Ю.М. Метод вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоперетворювачів на основі принципу суперпозиції / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – 2013. – № 2 (41). – С. 239-244. (Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних *Index Copernicus*).

4. Мосолаб О.О. Комп'ютерна модель системи вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоперетворювачів на основі принципу суперпозиції / О.О. Мосолаб // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – 2014. – № 1 II (45). – С. 172-176. (Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних *Index Copernicus*).

5. Туз Ю.М. Вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів в режимі випромінювання на основі принципу суперпозиції / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – 2014. – № 1 II (45). – С. 223-228. (Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних *Index Copernicus*).

6. Туз Ю.М. Методи та засоби вимірювання просторово-часових характеристик ультразвукових лінійних фазованих антенних решіток / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // Інформаційні системи, механіка та керування.

Науково-технічний збірник. – 2015. – № 13. – С. 37-47. (*Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus*).

7. Патент на корисну модель № 93323, Україна, МПК G01 H 17/00. Спосіб вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів на основі принципу суперпозиції / Туз Ю.М., Красковський О.П., Мосолаб О.О. – № u201404463; заяв. 29.04.2014. Опубл. 25.09.2014. Бюл. №18.

8. Туз Ю.М. Автоматизована система вимірювання імпульсної характеристики напрямленості фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // X Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи": тези доповідей. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – С. 203-204.

9. Туз Ю.М. Метод вимірювання просторово-часових характеристик фазованої антенної решітки п'єзоелектричних перетворювачів / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // XI Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи": тези доповідей. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – С. 215-216.

10. Туз Ю.М. Виртуальный стенд автоматизированной системы измерения пространственно-временных характеристик линейных фазированных антенных решеток пьезоэлектрических преобразователей / Ю.М. Туз, А.А. Мосолаб // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012: Сборник трудов. XI МНПК. – Москва: ДМК-пресс, 2012. – С. 423-425.

11. Туз Ю.М. Приемный тракт систем вимірювання просторово-часових характеристик фазованих антенних решіток п'єзоперетворювачів в режимі випромінювання / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // IX Міжнародна НТК "Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки": Збірка доповідей. Київ: НТУУ "КПІ", 2013. – С. 539-544.

12. Туз Ю.М. Вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоперетворювачів на основі принципу суперпозицій / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // XII Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування: стан і перспективи": тези доповідей. – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. – С. 232-233.

13. Туз Ю.М. Моделювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоперетворювачів з урахуванням амплітудних та фазових міжканальних відхилень блоку випромінювання / Ю.М. Туз, О.П. Красковський, О.О. Мосолаб // 15-а міжнародна науково-технічна конференція "Системний аналіз та інформаційні технології": тези доповідей. – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. – С. 488-489.

14. Туз Ю.М. Установка для измерения пространственно-временных характеристик линейных фазированных антенных решеток с повышенной точностью / Ю.М. Туз, А.А. Мосолаб // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2013: Сборник трудов XII МНПК. – Москва: ДМК-пресс, 2013. – С. 237-239.

15. Мосолаб О.О. Цифрове формування просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток на основі принципу суперпозиції / О.О. Мосолаб // IV науково-практична конференція студентів та молодих учених

"Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання": тези доповідей. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – С. 127-128.

16. Туз Ю.М. Системы метрологической аттестации пространственно-временных характеристик линейных фазированных антенных решеток пьезоэлектрических преобразователей / Ю.М. Туз, А.А. Мосолаб // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments NIDays – 2014: Сборник трудов XIII МНПК. – Москва: ДМК-пресс, 2014. – С. 332-334.

АНОТАЦІЯ

Мосолаб О.О. Методи та засоби підвищення точності вимірювання просторово-часових характеристик ультразвукових лінійних фазованих антенних решіток. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2016.

Роботу присвячено удосконаленню існуючих і розробленню нових методів та засобів підвищення точності вимірювання просторово-часових характеристик (ПЧХ) ультразвукових (УЗ) лінійних фазованих антенних решіток (ФАР) п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП).

У роботі здійснено класифікацію похибок, які виникають при вимірюванні ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП. Це дозволило виділити похибки, які мають найбільший негативний вплив на точність вимірювання параметрів ПЧХ.

Розроблено математичні моделі систем вимірювання ПЧХ лінійних ФАР із сумісним та з індивідуальним збудженням ПЕП, що реалізують традиційний метод та метод суперпозиції. Проведено порівняльний аналіз математичних моделей похибок систем вимірювання.

Створено системи вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП із сумісним та з індивідуальним збудженням. Проведено розрахунок та вимірювання метрологічних характеристик трактів випромінювання та прийому систем.

Проведено порівняльний аналіз між теоретичними ПЧХ без урахування та з урахуванням похибок вимірювання і експериментальними ПЧХ. Визначено параметри непевності результатів вимірювання ПЧХ ультразвукових лінійних ФАР ПЕП. Показано, що метод вимірювання ПЧХ лінійних ФАР з індивідуальним збудженням, на відміну від традиційного методу із сумісним збудженням, дозволяє підвищити точність вимірювання параметрів ПЧХ.

Ключові слова: фазована антенна решітка, п'єзоелектричний перетворювач, просторово-часова характеристика, суперпозиція, характеристика напрямленості.

АННОТАЦИЯ

Мосолаб А.А. Методы и средства повышения точности измерения пространственно-временных характеристик ультразвуковых линейных фазированных антенных решеток. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по

специальности 05.01.02 – стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2016.

Работа посвящена созданию новых и усовершенствованию существующих методов и средств повышения точности измерения пространственно-временных характеристик (ПВХ) ультразвуковых линейных фазированных антенных решеток (ФАР) пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП).

В диссертационной работе классифицированы погрешности, возникающие при измерении ПВХ ультразвуковых линейных ФАР ПЭП. Это позволило выделить погрешности, которые имеют наибольшее негативное влияние на точность измерения ПВХ, а именно – погрешности, обусловленные амплитудными и фазовыми отклонениями выходного напряжения многоканальных трактов излучения и приема.

Созданы математические модели систем измерения ПВХ линейных ФАР с совместным и индивидуальным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей в режиме излучения импульсных сигналов, которые реализуют традиционный метод и метод суперпозиции. На основе созданных математических моделей разработаны методики и программное обеспечение для проведения численных расчетов ПВХ ультразвуковых линейных ФАР ПЭП в режиме излучения импульсных сигналов с учетом погрешностей измерения.

Разработаны математические модели погрешностей систем измерения ПВХ линейных ФАР с совместным и индивидуальным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей. Проведен сравнительный анализ математических моделей погрешностей систем измерения. Показано, что система измерения ПВХ с индивидуальным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей обеспечивает меньшую погрешность измерения, чем система измерения с совместным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей.

Созданы системы измерения ПВХ ультразвуковых линейных ФАР с совместным и индивидуальным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей для проведения экспериментальных исследований при нагрузке на сталь в режиме излучения импульсных сигналов. Проведены расчет и экспериментальные исследования метрологических характеристик трактов излучения и приема систем измерения ПВХ.

Для системы измерения ПВХ ультразвуковых линейных ФАР с индивидуальным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей приведен разработанный алгоритм интерполяции сохраненных отсчетов принятых сигналов, который позволяет ввести идентичные временные задержки с повышенной точностью в программируемом многоканальном тракте приема, благодаря чему достигается повышенная точность измерения параметров ПВХ в режиме излучения импульсных сигналов.

Разработанные системы обеспечивают измерение ПВХ ультразвуковых линейных ФАР ПЭП в диапазоне частот от 1,0 до 10,0 МГц в секторе сканирования от 0° до 45° и могут быть использованы при разработке и производстве ультразвуковых дефектоскопов-томографов на основе линейных ФАР ПЭП, которые предназначены для неразрушающего контроля изделий из металлов.

Представлены конструктивные и электроакустические параметры исследуемой 12-ти элементной ультразвуковой линейной контактной ФАР ПЭП с номинальной частотой 2,25 МГц.

Проведен сравнительный анализ между теоретическими ПВХ без учета и с учетом погрешностей измерений и экспериментальными ПВХ. Определены параметры неопределённости результатов измерения ПВХ ультразвуковых линейных ФАР ПЭП.

Показано, что метод измерения ПВХ ультразвуковых линейных ФАР ПЭП с индивидуальным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей, в отличие от традиционного метода с совместным возбуждением пьезоэлектрических преобразователей, позволяет в режиме излучения импульсных сигналов повысить точность измерения параметров ПВХ, а именно: ширины характеристики направленности на 5 % и длительности временной характеристики на 2 %.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, пьезоэлектрический преобразователь, пространственно-временная характеристика, суперпозиция, характеристика направленности.

ABSTRACT

Mosolab O.O. Methods and tools for accuracy improvement of spatio-temporal characteristics measurements of ultrasound linear phased arrays. – Manuscript.

Dissertation for candidate degree of technical sciences on specialty 05.01.02 – Standardization, certification and metrology assurance. – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2016.

The study is dedicated to creation of new and improvement of existing methods and tools for accuracy improving of spatio-temporal characteristics measurements of ultrasound phased arrays.

The study involves spatio-temporal characteristics measurement errors analysis. This allowed to identify errors that most affect the accuracy of measurements.

Mathematical models of systems for ultrasound phased arrays spatio-temporal characteristics measurements with simultaneous and individual transmission based on traditional method and method of superposition are developed. Measurement errors models of systems for spatio-temporal characteristics measurements are analyzed.

Systems for ultrasound linear phased arrays spatio-temporal characteristic measurements with simultaneous and individual transmission are designed for experimental research. The calculation and experimental research of metrological characteristics of the transmission and reception paths of designed systems are done.

Comparative analysis between theoretical spatio-temporal characteristics without measurement errors and with measurement errors and experimental spatio-temporal characteristics is done. Uncertainty parameters of ultrasound phased array spatio-temporal characteristics measurements are determined. It is shown that method with individual transmission allows to improve accuracy of spatio-temporal characteristics measurements in comparison to traditional method with simultaneous transmission.

Keywords: phased array, piezoelectric transducer, spatio-temporal characteristics, superposition, directivity pattern.

**Підписано до друку 17.11.2016 р. Формат 60х90 1/16.
Папір офсетний. Умовн. др. арк. 0,9
Друк різнограф. Тираж 100 прим. Зам. № 1711/01.**

**Підприємство «УВОІ «Допомога» УСІ»
Свідоцтво про державну реєстрацію №31245580
03056, м. Київ, пров. Політехнічний, 6, корп. 5 (КШ)
Тел.: 277-80-08.**