

ТЕОРИЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗИЙНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 620.179.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОБОЧНЫХ МОД КОЛЕБАНИЙ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Красковский А.П., Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина

В статье рассмотрены причины возникновения побочных "паразитных" мод колебаний в пьезоэлектрических преобразовательных элементах ультразвуковых фазированных антенных решеток. Представлен новый метод подавления побочных мод колебаний пьезоэлементов по ширине. Дана оценка эффективности предложенного метода на основе результатов экспериментальных исследований.

***Ключевые слова:** преобразователи ультразвуковые, решетки пьезоэлектрические, типы колебаний, подавление побочных колебаний.*

Введение

Разрешающая способность и акустическая чувствительность ультразвуковых дефектоскопов-томографов (УЗДТ) на основе фазированных антенных решеток пьезоэлектрических преобразователей (ФАР ПЭП) в значительной мере зависит от пространственно-временных характеристик и чувствительности ФАР ПЭП.

В условиях практического конструирования в реальных ФАР ПЭП 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 пространственно-временные характеристики и чувствительность ФАР ПЭП, что в процессе ультразвукового контроля приводит к частичной или полной потере достоверной информации о величине, характере и местоположении дефектов.

В данной работе внимание уделено, главным образом, исследованию новых методов подавления побочных мод колебаний пьезоэлементов.

Цель и задачи исследований

Целью исследований является повышение продольной разрешающей способности УЗДТ за счет расширения полосы пропускания пьезопреобразовательных элементов ФАР.

Несмотря на то, что исследованию побочных мод колебаний пьезоэлементов ФАР посвящено немало публикаций в научно-технической и патентной литературе [1-3], разработка более эффективных методов расширения полосы пропускания пьезоэлементов путем подавления их побочных мод колебаний остается, несомненно, актуальной задачей, требующей дальнейших исследований.

Метод подавления побочных мод колебаний пьезоэлемента по ширине Причины возникновения побочных "паразитных" мод колебаний пьезоэле-

ментов по ширині обумовлені виконанням общепринятых вимог до проектування конструкцій лінійних ФАР ПЭП (рис. 1, № 1), в результаті чого пьезоелементи решітки мають геометричні розміри по довжині l значно більше, ніж по ширині w_0 і по товщині t_1 , при цьому розміри пьезоелементів по ширині w_0 і по товщині t_1 мають один порядок, т.е. являються соизмеримими.

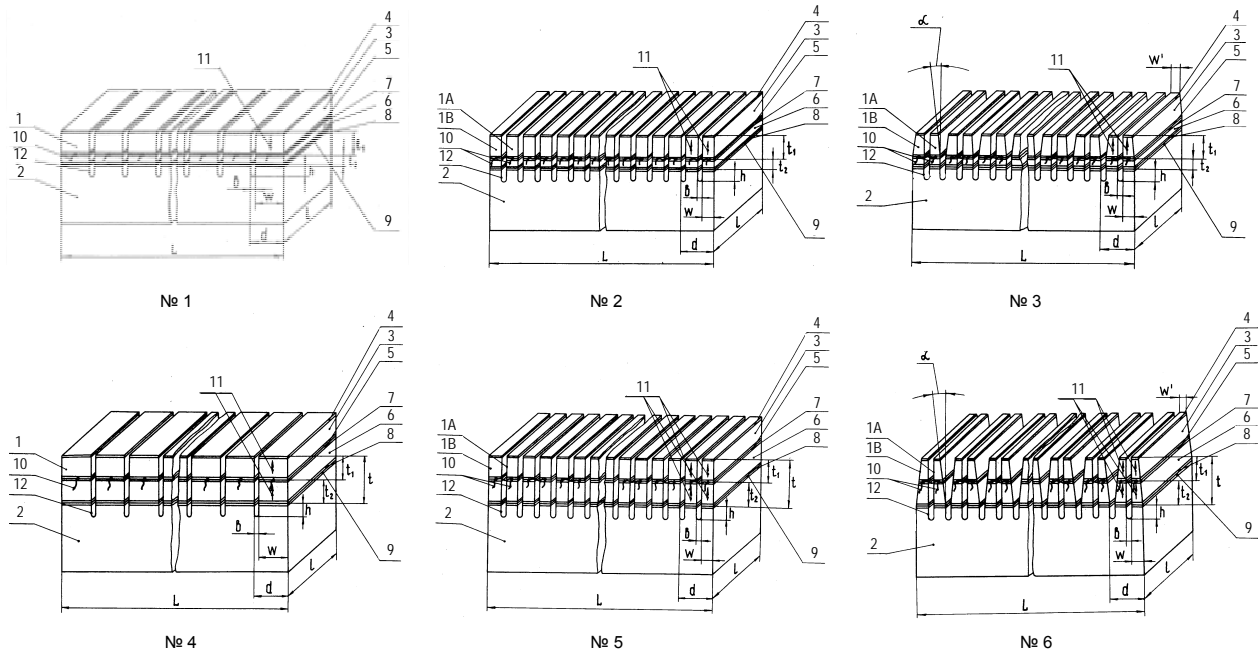


Рис. 1. Конструкції внутрішніх модулів лінійних ФАР ПЭП № 1 - № 6, где: 1 – преобразовательные элементы; 2 – демпфирующее основание; 3 – пьезо-керамика; 4, 5 – металлические электроды; 6 – изолятор – для ФАР ПЭП № 1, № 2, № 3; 6 – пьезокерамика – для ФАР ПЭП № 4, № 5, № 6; 7, 8, 9 – металлические пленки; 10 – проводники для возбуждения/приема акустических/электрических сигналов и для попарного электрического объединения пьезоэлементов 1А и 1В; 11 – направление векторов поляризации пьезоэлементов; 12 – пазы между элементами решетки

В общем случае, в пьезоэлектрических элементах с соизмеримыми размерами могут существовать три взаимодействующие системы резонансных колебаний, обусловленные связанными между собой: продольными модами колебаний по толщине t_1 , поперечными модами колебаний по ширине w_0 и поперечными модами колебаний по длине l , однако полезными можно считать только продольные нормальные моды колебаний по толщине, в направлении вектора поляризации 11 пьезоэлемента. Соотношения геометрических размеров пьезоэлементов ФАР определяют состав и значения собственных резонансных частот связанных мод колебаний.

Поскольку размеры пьезоэлементов по длине l значительно превышают их размеры по ширине w_0 и по толщине t_1 , то связь между модами колебаний по длине l и модами колебаний, как по ширине w_0 , так и по толщине t_1 можно пренебречь из-за существенного различия их собственных частот колебаний. Моды колебаний пьезоэлементов по ширине w_0 и по толщине t_1 можно рассматривать как связанные, так как их собственные частоты колебаний близки

друг к другу. Следовательно, в пьезоэлектрических элементах ФАР ПЭП № 1 существуют только две взаимодействующие системы колебаний, обусловленные связанными между собой продольными модами колебаний по толщине t_1 и поперечными модами колебаний по ширине w_0 .

Собственные частоты колебаний двух взаимодействующих систем с упругой связью определяются из выражения [2]:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left(K_1^2 + K_2^2 \pm \sqrt{(K_1^2 + K_2^2)^2 - 4K_1^2 K_2^2 (1 - \gamma^2)} \right), \quad (1)$$

где γ - коэффициент упругой связи, K_1, K_2 - парциальные частоты в связанной системе. Под парциальными частотами понимаются собственные частоты системы с одной степенью свободы (входящих в полную систему), если их рассматривают как изолированные. Выражение (1) можно представить в виде:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left(K_1^2 + K_2^2 \pm \sqrt{(K_1^2 + K_2^2)^2 + 4K_1^2 K_2^2 \gamma^2} \right). \quad (2)$$

С помощью коэффициента связанности σ , который определяется как

$$\sigma = \gamma \frac{2K_1 K_2}{K_1^2 - K_2^2}, \quad (3)$$

можно характеризовать взаимодействие между колебательными системами не только величиной коэффициента упругой связи γ , но и близостью парциальных частот относительно друг друга. Из выражения (3) видно, что при $K_1 \rightarrow K_2$, даже при малых значениях коэффициента упругой связи γ , связанность σ колебательных систем будет значительно возрасти и энергия возбуждающего электрического поля будет все в большей мере расходоваться на раскачку не только основного колебания по толщине t_1 , но и побочного "паразитного" колебания по ширине w_0 . В результате активность основного колебания по толщине t_1 в той или иной степени снизится.

Уменьшение связи в колебательной системе может быть достигнуто за счет расширения интервалов между резонансной и парциальными частотами и уменьшения связанностей в системе вследствие уменьшения взаимодействия между парциальными частотами.

На рис. 1 представлена конструкция линейной ФАР ПЭП № 2, в которой реализован известный метод подавления побочной моды колебаний пьезоэлементов по ширине [3], а именно: пьезопреобразовательные элементы 1, имеющие параллелепипедную форму, дополнительно разделены на ряд индивидуальных пьезопреобразовательных элементов, которые с помощью параллельного электрического соединения проводником 10 объединены в соответствующие группы по два элемента – 1А и 1В. Общая ширина поверхности излучения (приема) ультразвуковых колебаний каждой такой группы, включая ширину междуэлементных зазоров b примерно равна половине длины волны в среде, т.е. $\lambda_{cp}/2$, а ширина w каждого индивидуального пьезоэлемента группы меньше $\lambda_{cp}/4$. При уменьшении ширины w индивидуальных элементов увеличивается интервал между резонансной частотой основной моды колебаний по тол-

щине t_1 и резонансными частотами побочных мод колебаний по ширине w . Это ведет к ослаблению связи между основной и побочными модами колебаний, а также к увеличению полосы пропускания индивидуальных пьезоэлементов ФАР ПЭП № 2 по отношению к полосе пропускания пьезоэлементов без дополнительного деления ФАР ПЭП № 1.

Недостатком конструкции ФАР ПЭП № 2 является сравнительно узкая полоса пропускания пьезоэлементов, что обусловлено малым затуханием упругих волн, вызванных побочными колебаниями по ширине, из-за плоскопараллельности боковых граней пьезоэлементов.

На рис. 1 представлена конструкция линейной ФАР ПЭП № 3, в которой реализован разработанный автором метод подавления побочных мод колебаний пьезоэлементов по ширине, где уменьшение связанности в колебательной системе пьезоэлемента в отличие от ФАР ПЭП № 2, достигается за счет уменьшения ширины каждого индивидуального пьезоэлемента вдоль его высоты, причем одна боковая грань элемента составляет прямой угол с плоскостью поверхности демпфирующего основания, а другая – острый. При такой форме пьезоэлементов увеличивается интервал между резонансной частотой основной моды колебаний по толщине t_1 и резонансными частотами побочных мод колебаний по ширине w , что существенно уменьшает потери энергии на связанные колебания двух взаимодействующих колебательных систем. За счет наклона боковой грани пьезоэлемента упругие волны, вызванные побочными модами колебаний по ширине, распространяются в направлении демпфирующего основания и, претерпевая минимум отражений от граней, эффективно демпфируются, что приводит к перераспределению энергии между основным колебанием по толщине t_1 и нежелательными побочными колебаниями по ширине w в пользу основного колебания.

Эффективное демпфирование и устранение многократных переотражений упругих волн между гранями индивидуальных преобразовательных элементов ФАР ПЭП № 3, позволяет существенно расширить их полосу пропускания по сравнению с полосой пропускания пьезоэлементов ФАР ПЭП № 2 и обеспечить повышение продольной разрешающей способности ФАР ПЭП № 3.

На рис. 1 представлены конструкции ФАР ПЭП № 4 - № 6, пьезоэлементы которых содержат второй, дополнительный слой пьезоматериала, что позволяет по сравнению с ФАР ПЭП № 1 - № 3, более существенно подавить взаимную связь между пьезоэлементами решетки, а также улучшить соотношение сигнал – шум, за счет сокращения времени переходных процессов. Кроме того, значительно увеличивается идентичность параметров пьезоэлементов антенной решетки, так как их колебания, из-за отсутствия сдвига центра инерции (масс), становятся менее зависимыми от влияния акустических нагрузок демпфера и исследуемой среды.

Заметным недостатком ФАР ПЭП № 4 - № 6 по сравнению с ФАР ПЭП № 1 - № 3 является узкая полоса пропускания пьезоэлементов. Однако, не смотря на это, разработанный метод подавления побочных мод колебаний пьезоэлементов по ширине, рассмотренный ранее на примере конструкции ФАР ПЭП № 3, позволяет также эффективно увеличить полосу пропускания пьезоэлементов конструкции ФАР ПЭП № 6 по сравнению с конструкциями ФАР ПЭП № 4 и № 5.

Результаты экспериментальных исследований

Для проведения экспериментального исследования разработанного метода подавления побочных мод колебаний пьезоэлементов по ширине, был использован контактный вариант исполнения ФАР ПЭП № 1 - № 6. Конструкции внутренних модулей ФАР ПЭП № 1 - № 6, представленные на рис. 1, были изготовлены на единой технологической основе, что создало необходимые предпосылки для проведения сравнительного анализа их экспериментальных характеристик.

Для более наглядного представления "механизма" взаимодействия продольных мод колебаний по толщине $t_1(t_2)$ и поперечных мод колебаний по ширине $w_0(w)$ были использованы экспериментальные импедансно-частотные характеристики пьезоэлементов ФАР ПЭП № 1 - № 6, в частности их модуль $|Z|$, активную R и реактивную $-jX$ составляющие, которые были измерены при условии акустической нагрузки (механического демпфирования) нижних граней пьезоэлементов; остальные грани пьезоэлементов были акустически ненагружены.

Методика и стенд для измерения импедансно-частотных характеристик пьезоэлементов ФАР ПЭП подробно описаны в [4].

По измеренной характеристике активной составляющей R комплексного сопротивления пьезоэлемента можно оценить степень взаимодействия между его связанными модами колебаний, а также определить ширину полосы пропускания пьезоэлемента. При этом критерием оценки взаимодействия этих мод может служить величина интервала между их собственными частотами колебаний, а также соотношение величин сопротивлений на этих частотах, определяемое коэффициентом ослабления побочной моды колебаний по ширине $w_0(w)$ по отношению к основной моде колебаний по толщине $t_1(t_2)$.

На характеристиках активных составляющих R комплексных сопротивлений пьезоэлементов ФАР ПЭП № 1 - № 6 (рис. 2) явно видны четыре моды колебаний: основная (желательная) продольная мода колебаний по толщине $t_1(t_2)$ - Т1, более высокочастотная (нежелательная) продольная мода колебаний по толщине $t_1(t_2)$ - Т2, побочная (нежелательная) поперечная мода колебаний по ширине $w_0(w)$ - Ш1 и более высокочастотная (нежелательная) поперечная мода колебаний по ширине $w_0(w)$ - Ш2. При соотношении геометрических размеров пьезоэлементов ФАР ПЭП № 1, № 4 $w_0/t_1(t_2) = 1,53$ основная продольная мода колебаний по толщине Т1 оказывается сильно связанной с побочной поперечной модой колебаний по ширине Ш1. Собственные частоты основной продольной моды колебаний по толщине Т1 и побочной поперечной моды колебаний по ширине Ш1 очень близки между собой, а величины их импедансов соизмеримы. Отсюда следует, что энергия возбуждающего электрического импульса все в большей мере расходуется на раскачку не только основной продольной моды колебаний по толщине Т1, но и других мод Ш1, Т2, Ш2. В результате, в импульсных характеристиках пьезоэлементов появляются составляющие, обусловленные резонансными частотами всех четырех мод колебаний Т1, Т2, Ш1, Ш2, что ведет к увеличению переходных процессов, сужению полосы пропускания и ухудшению продольной разрешающей способности ФАР ПЭП.

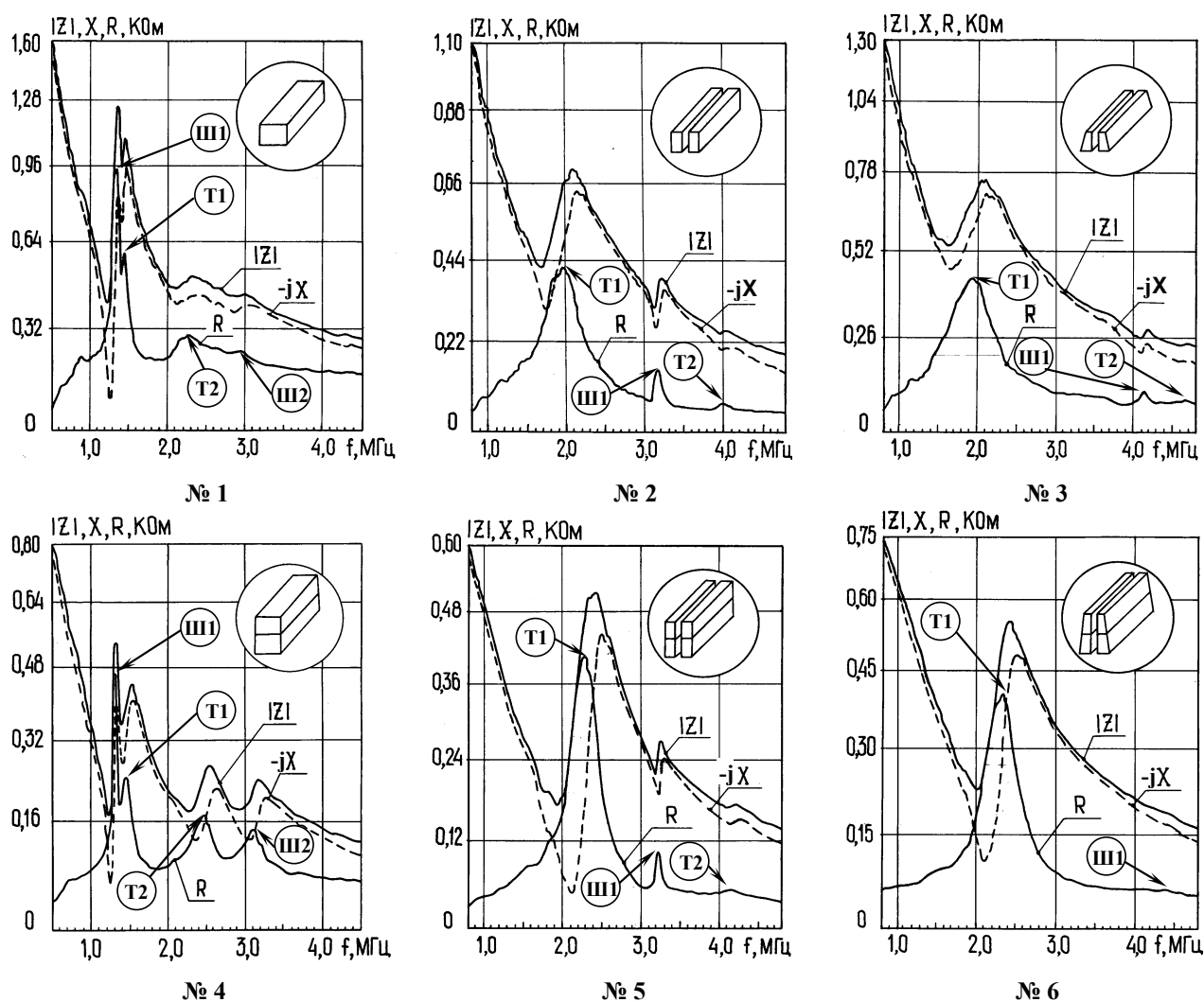


Рис. 2. Експериментальні імпедансно-частотні характеристики пьезоелементів ФАР ПЭП № 1 - № 6 (Т і Ш – моди коливань пьезоелемента відповідно по товщині і ширині)

На рис. 2 пьезопреобразовательные элементы ФАР ПЭП № 2 и № 5 разделены на индивидуальные элементы, которые имеют соотношение толщины t_1 (t_2) пьезоэлемента к его ширине w равное $w/t = 0,63$, при этом полезная мода колебаний по толщине Т1 и побочная мода колебаний по ширине Ш1 разнесены по частоте и имеют слабую взаимосвязь, а величины импедансов, соответствующие этим модам, значительно различаются, что обеспечивает расширение полосы пропускания пьезоэлементов и повышение продольной разрешающей способности антенной решетки.

На рис. 2 пьезопреобразовательные элементы ФАР ПЭП № 3 и № 6 разделены на индивидуальные элементы, которые имеют соотношение толщины t_1 (t_2) пьезоэлемента к ширине w его основания равное $w/t = 0,63$, при этом основная мода колебаний по толщине Т1 и побочная мода колебаний по ширине Ш1 значительно разнесены по частоте и имеют более слабую взаимосвязь по сравнению с соответствующими пьезоэлементами ФАР ПЭП № 2 и № 5, что позволяет

еще более существенно расширить полосу пропускания пьезоэлементов и, тем самым, повысить продольную разрешающую способность антенной решетки.

Таким образом, в пьезопреобразовательных элементах ФАР ПЭП № 2 и № 5, а также ФАР ПЭП № 3 и № 6 за счет увеличения интервала между собственными частотами основной продольной моды колебаний по толщине $T1$ и побочной поперечной моды колебаний по ширине $Ш1$ уменьшаются потери энергии возбуждающего электрического импульса на связанные колебания, что приводит к перераспределению энергии между основной продольной модой колебаний по толщине $T1$ и побочной поперечной модой колебаний по ширине $Ш1$ в пользу основной моды $T1$.

В результате, импульсные характеристики пьезоэлементов ФАР ПЭП № 2, № 3, № 5, № 6 будут иметь частоту, соответствующую собственной резонансной частоте колебаний пьезоэлемента по толщине $T1$.

Основные параметры экспериментальных импедансно-частотных характеристик пьезоэлементов ФАР ПЭП № 1 - № 6 приведены в табл. 1.

Для оценки эффективности предложенного метода подавления побочной моды колебаний пьезоэлемента по ширине и возможности проведения сравнительного анализа, на рис. 3 представлены пространственно-временные характеристики ФАР ПЭП № 1 - № 6 в режиме излучения, при возбуждении δ -импульсом, измеренные согласно методике, изложенной в [5]. На осциллограммах видно, что при сильной связи между полезной модой колебаний по толщине $T1$ и побочной поперечной модой колебаний по ширине $Ш1$ пьезоэлементов ФАР ПЭП № 1 и № 4, т.е. при $w/t_1(t_2) = 1,53$ импульсные (временные) характеристики имеют длительность примерно 3 – 3,5 значимых периода колебаний, что существенно ухудшает продольную разрешающую способность ФАР ПЭП. В случае уменьшения связи между вышеуказанными модами, за счет дополнительного деления пьезоэлементов на подэлементы, т.е. при $w/t_1(t_2) = 0,63$, длина импульсных характеристик уменьшается до 1,5 – 1,0 периода для ФАР ПЭП № 2, № 3 и до 2,5 – 2,0 для ФАР ПЭП № 5, № 6, что обеспечивает повышенную продольную разрешающую способность ФАР ПЭП.

Выводы

Предложенные методы подавления побочных мод колебаний позволяют увеличить относительную полосу пропускания пьезоэлементов примерно на 15% - 25%, что соответственно повышает продольную разрешающую способность дефектоскопов- томографов с исследованными ФАР ПЭП.

Полученные практические результаты создают необходимые предпосылки для разработки аналитико-экспериментального метода исследования ФАР ПЭП с учетом влияния побочных мод колебаний.

Литература

1. J.Sato, H.Fukukita, M.Kawabuchi, A.Fukumoto. Farfield angular radiation pattern generated from arrayed piezoelectric transducers // J.Acoust. Soc.Am. 67(1), Jan.1980. – P. 333-335.
2. Смагин А.Г., Ярославский М.И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. – М.: Энергия, 1970. – 488 с.

3. Патент США № 4305014, МКИ H01L 41/08. Пьезоэлектрическая решетка с использованием параллельно соединенных элементов для образования групп. ширина которых равна $\approx 1/2$ / Барбух Я. 1981 г. Заявка № 49898. Опубл. 08.12.1981 г.
4. Туз Ю.М. Измерение импедансно-частотных характеристик пьезоэлектрических преобразовательных элементов ультразвуковых фазированных антенных решеток / Ю.М.Туз, А.П.Красковский // Вісник Інженерної академії України, 2009. – № 3-4. – С. 133-137.
5. Красковский А.П. Измерение пространственно-временных характеристик ультразвуковых фазированных антенных решеток // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування, 2009. – № 38. – С. 51-57.

Таблица 1 – Основные параметры импедансно-частотных характеристик пьезоэлементов внутренних модулей линейных ФАР ПЭП № 1 - № 6

Порядковый номер ФАР ПЭП	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Отношение ширины w пьезоэлемента к его высоте $t_1 (t_2)$: w/t	1,53	0,63	0,63	1,53	0,63	0,63
Собственные частоты мод колебаний пьезоэлементов, кГц:						
f_{T1}	1400	1950	1940	1450	2300	2310
f_{T2}	2240	3950	4630	2470	4080	---
$f_{Ш1}$	1330	3150	4100	1295	3190	4230
$f_{Ш2}$	2900	---	---	3080	---	---
Величина частотного интервала между модами колебаний пьезоэлемента T1 и Ш1: $ f_{T1} - f_{Ш1} $, кГц	70	1200	2160	155	890	1920
Максимальное значение действительной части комплексного сопротивления R на собственной частоте соответствующей моды колебания пьезоэлемента, Ом:						
R_{T1}	600	420	440	250	410	410
R_{T2}	300	70	90	170	50	---
$R_{Ш1}$	950	150	110	470	100	60
$R_{Ш2}$	250	---	---	150	---	---
Коэффициент ослабления побочной моды колебаний по ширине Ш1: $M = R_{\emptyset 1} / R_{T1}$	1,58	0,36	0,25	1,88	0,24	0,15
Относительная полоса пропускания пьезоэлементов:						
по уровню 0,7 $\Delta f_{T1}^{0,7}$, %	---	20	27	---	13	15
по уровню 0,5 $\Delta f_{T1}^{0,5}$, %	---	36	46	---	20	26

*Примечание. Полоса пропускания пьезоэлементов антенных решеток оценивалась по активной составляющей R комплексного сопротивления по уровню 0,7 и 0,5.

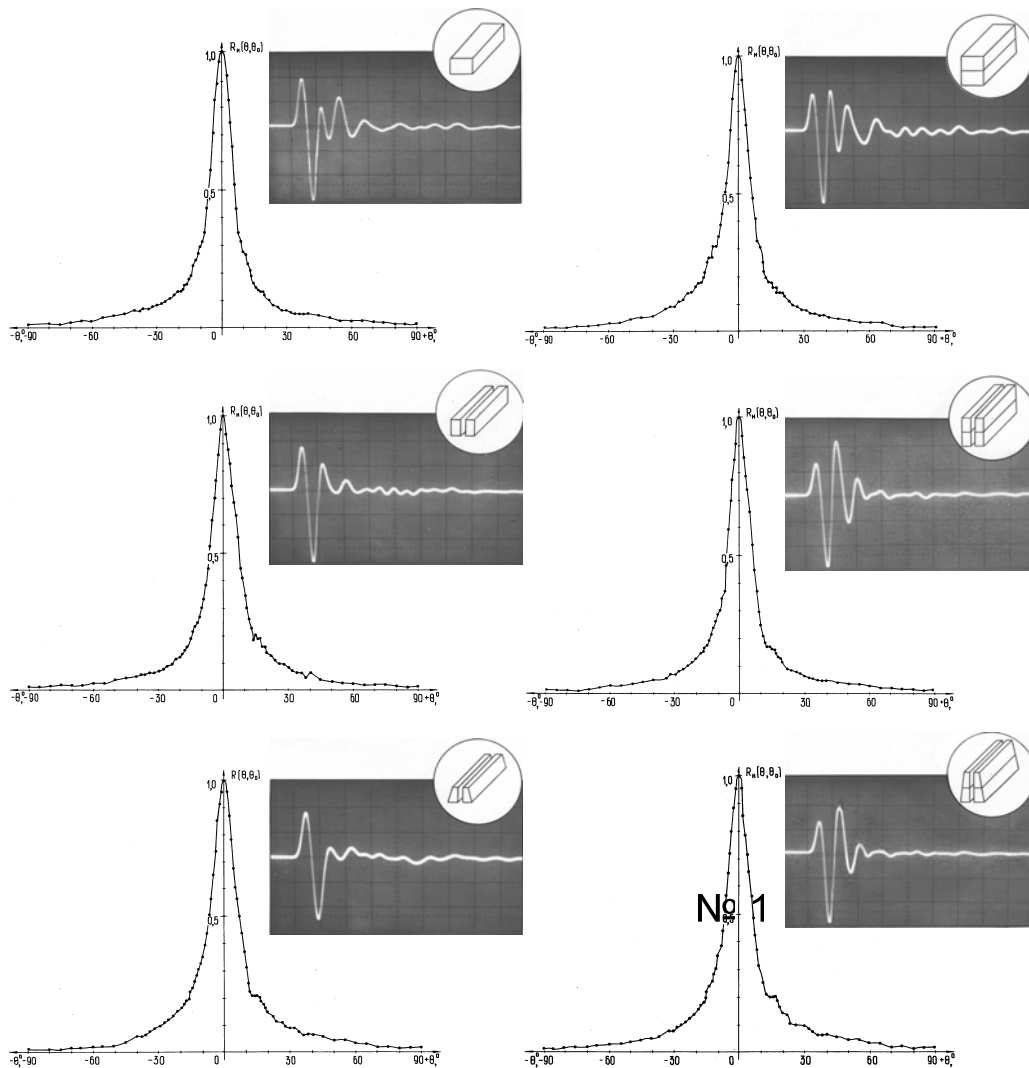


Рис. 3. Пространственно-временные характеристики линейных ФАР ПЭП № 1 – № 6 в режиме излучения при угле сканирования $\theta_0 = 0^\circ$

Красковський О.П. Дослідження побічних мод коливань в п'єзоелектричних перетворювальних елементах ультразвукових фазованих антенних ґратках

В статті розглянуто причини виникнення побічних "паразитних" мод коливань в п'єзоелектричних перетворювальних елементах ультразвукових фазованих антенних ґратках. Представлений новий метод пригнічення побічних мод коливань п'єзоелементів по ширині. Дана оцінка ефективності запропонованого методу на основі результатів експериментальних досліджень.

Ключові слова: перетворювачі ультразвукові, ґратки п'єзоелектричні, типи коливань, пригнічення побічних коливань

Kraskovsky A.P. Research of collateral oscillation modes in piezoelectric transformative elements of ultrasonic phased-array

This article considers the reasons of collateral parasite oscillation mode appearance in piezoelectric transformative elements of ultrasonic phased arrays. The new methods of collateral oscillation by width mode reduction are presented. The estimation of suggested method' efficiency, based on experimental research results, is given.

Keywords: ultrasonic transformative elements, piezoelectric array, oscillation types, reduction of collateral oscillations

Надійшла до редакції
4 березня 2010 року