

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 534.86

В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Н. И. Казаченко, Е. Н. Прокопенко

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЭП В ВИДЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЗОННОЙ ФРЕНЕЛЕВСКОЙ ПЛАСТИНКИ

UDC 534.86

V. I. Borisov, S. S. Sergeev, N. I. Kazachenko, E. N. Prokopenko

ACOUSTIC RADIATION FIELD OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS IN THE FORM OF A RECTANGULAR FRESNEL ZONE PLATE

Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения фокусирующих акустических преобразователей на основе одномерных фазированных решеток в виде зонной пластинки Френеля. Показано, что в акустическом поле излучения таких пьезопреобразователей наблюдается два фокуса, один из которых определяется конструкцией преобразователя, а второй располагается в ближней зоне. При изменении сдвига фаз на пьезоэлементах решетки наблюдается изменение фокусного расстояния.

Ключевые слова:

акустическое поле, зонная пластинка Френеля, акустическая фазированная решетка, пьезоэлектрический преобразователь, акустическая ось, дальняя зона, акустическая волна, акустическое давление, фокальная плоскость, фокус.

Abstract

Using the numerical analysis method, the acoustic radiation field of focusing acoustic transducers based on one-dimensional phased arrays in the form of a Fresnel zone plate was calculated. It is shown that in the acoustic field of the radiation of such piezoelectric transducers, there are two focuses, one of which is determined by the design of the transducer, and the second is located in the near zone. With a change in the phase shift on the piezoelectric elements of the array, a change in the focal length is observed.

Keywords:

acoustic field, Fresnel zone plate, acoustic phased array, piezoelectric transducer, acoustic axis, far zone, near zone, acoustic wave, acoustic pressure, focal plane, focus.

В настоящее время для решения задач акустического неразрушающего контроля материалов и изделий в качестве источников и приемников ультразвука находят широкое применение фазированные акустические решетки (ФАР), которые обеспечивают возможность динамической перестройки их акустического поля излучения-приема

[1, 2]. Формы, размеры и конструкции современных ФАР весьма разнообразны.

В предлагаемой работе приведены результаты моделирования акустического поля излучения пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) в виде плоской прямоугольной фазированной решетки, представляющей собой аналог оптической зонной дифракционной пла-



стинки Френеля. Схема центральной части пьезопреобразователя, содержащей семь элементарных прямоугольных пьезопластин, приведена на рис. 1.

Пьезопреобразователь содержит ряд прямоугольных элементарных пьезопластин шириной d и длиной L , расположенных параллельно друг другу.

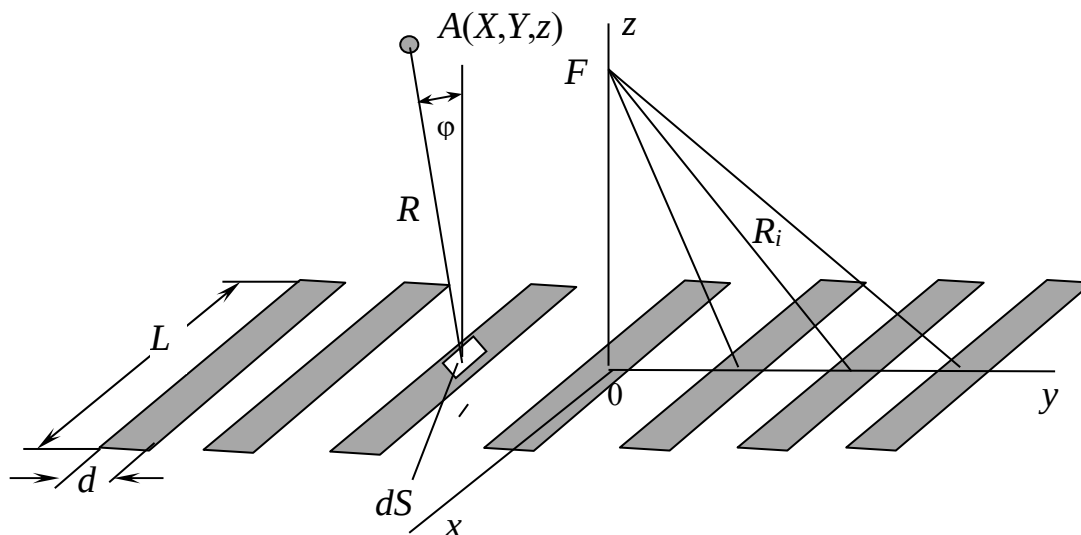


Рис. 1. Схема плоской прямоугольной фазированной решетки

Расстояние между центрами элементарных прямоугольных пьезоизлучателей и фокальной точкой F в плоскости uoz выбиралось таким образом, чтобы оно от соседних излучателей отличалось на длину акустической волны, распространяющейся в объекте, на который нагружен пьезопреобразователь. ПЭП представляет собой фазированную решетку, настроенную на фокусировку акустического излучения в плоскости, перпендикулярной оси пьезопреобразователя, отстоящей на расстоянии OF от плоскости решетки.

В работе приведены результаты расчетов акустического поля излучения такой фазированной решетки в ви-

де 17 элементарных излучателей с общими размерами апертуры 40×44 мм, настроенного на фокусное расстояние 100 мм. Расчеты акустического поля проводились для пьезоизлучателей с длиной элементарных излучателей 40 мм и шириной от 0,3 до 1,2 мм. Расчеты проводились для непрерывного режима работы элементарных пьезопреобразователей, работающих на частоте 5 МГц, нагруженных на воду, что соответствует длине акустической волны 0,3 мм.

Результирующая величина давления в точке A с координатами X, Y, z будет пропорциональна следующему интегралу [3]:

$$P(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} R + \psi_i \right) \right) dS, \quad (1)$$

где R – расстояние от точечного излучателя площадью dS , расположенного в точке с координатами $x, y, 0$ до точки A ;

$\frac{2\pi}{\lambda}$ – модуль волнового вектора (волно-



вое число), $\frac{2\pi}{\lambda} = k$; λ – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна; φ – угол, учитывающий наклон элементарной площадки dS к направлению на рассматриваемую точку; ψ_i – начальная фаза акустической волны, дополнительно вводимая при работе ПЭП в режиме фазирован-

ной решетки.

Расчет интеграла (1) проводился по методике, приведенной в [3].

Например, на рис. 2 приведено распределение акустического давления P вдоль оси z для ПЭП с шириной элементарных излучателей $d = 0,3$ мм (одна длина волны).

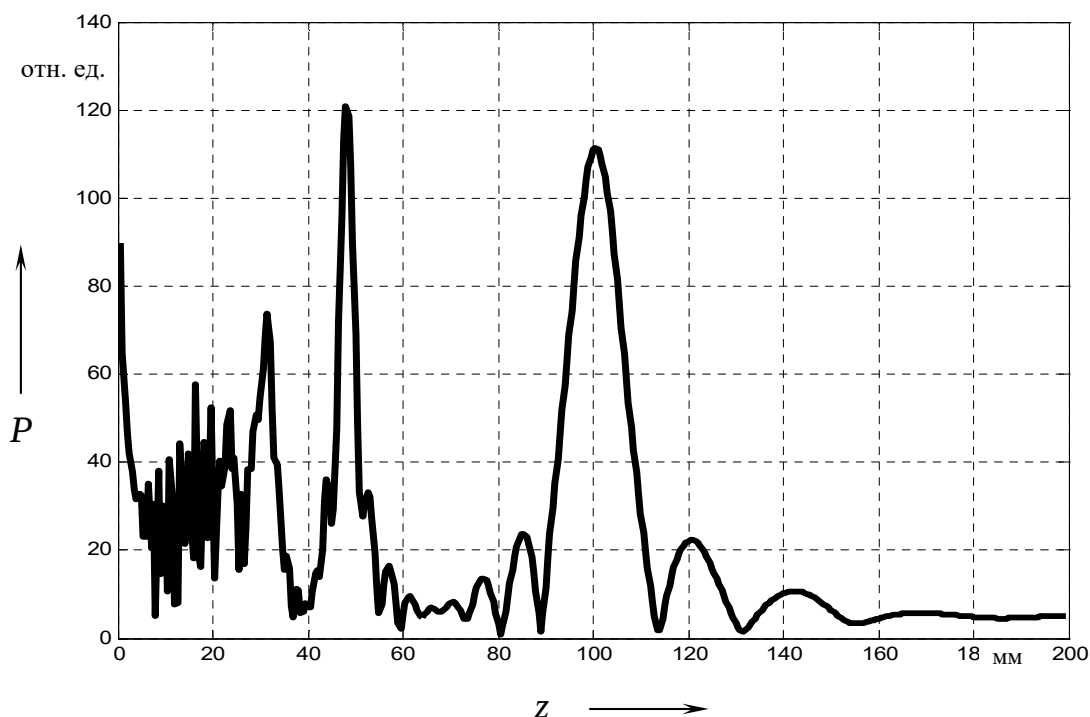


Рис. 2. Распределение давления акустических волн вдоль оси пьезопреобразователя в виде одномерной френелевской фазированной решетки, рассчитанной на фокусное расстояние 100 мм

Из рис. 2 видно, что распределение акустического давления вдоль оси ПЭП носит неоднородный характер. При этом наблюдается интересная особенность: кроме основного фокуса, расположенного на расстоянии 100 мм, на которое был рассчитан пьезопреобразователь, в ближней зоне наблюдается дополнительный фокус, располагающийся приблизительно на половинном расстоянии рассчитанного фокусного расстояния ПЭП. Амплитуда акустических волн в дополнительном фокусе больше амплитуды волн в основном фокусе.

Ширина акустического пучка по уровню половинной амплитуды вдоль оси z , представляющей собой акустическую ось ПЭП, равна 14 мм в области основного фокуса и 4,3 мм в области дополнительного фокуса.

Проведенные расчеты для ПЭП, рассчитанных на другие фокусные расстояния, показали, что такие же особенности акустического поля наблюдаются и для других ПЭП. При этом соотношения амплитуд акустического давления в основном и дополнительном фокусах различаются.



Так как для стандартных фазированных решеток ширина отдельных элементарных пьезопреобразователей выбирается равной половине длины акустической волны [5], а для фазированной решетки в виде зонной пластинки Френеля расстояние между соседними элементарными пьезоизлучателями превышает половину длины волны, то

для увеличения интенсивности акустических волн в фокальной плоскости желательно увеличить ширину отдельных элементарных пьезопреобразователей.

Например, на рис. 3 показано распределение акустического давления P вдоль оси z для ПЭП с шириной элементарных излучателей $d = 1,2$ мм (четыре длины акустической волны).

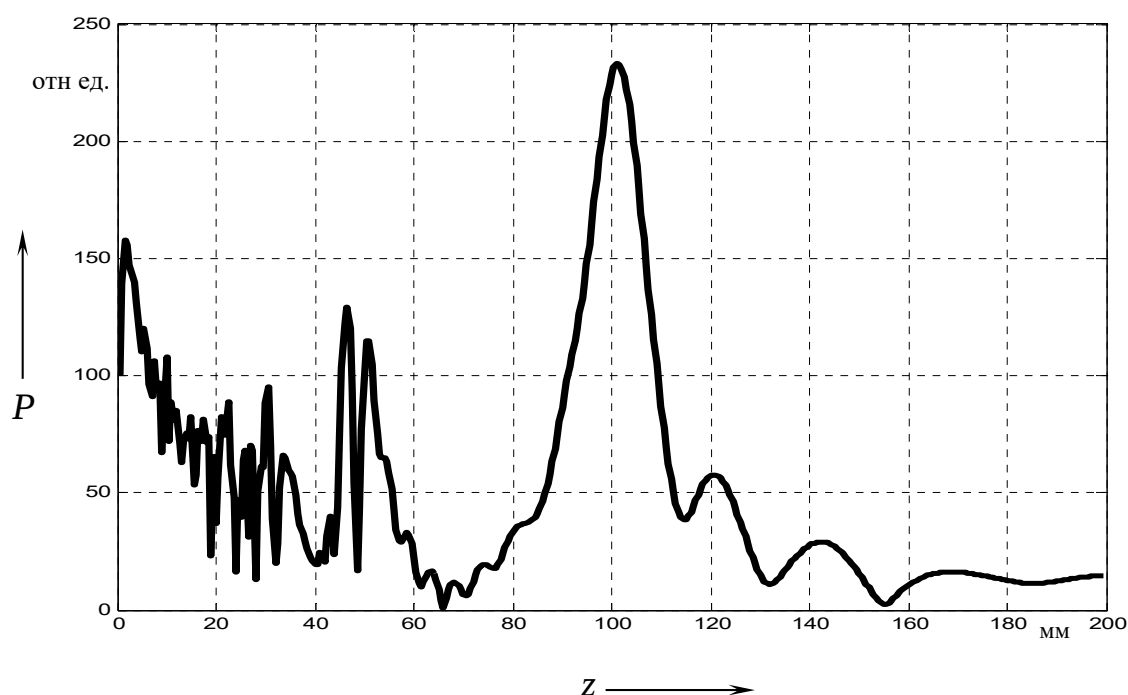


Рис. 3. Распределение давления акустических волн вдоль оси пьезопреобразователя в виде одномерной фазированной решетки, рассчитанной на фокусное расстояние 100 мм при ширине отдельных пьезоэлементов 1,2 мм

Из рис. 3 видно, что в осевом распределении давления акустических волн для ПЭП с шириной элементарных пьезопреобразователей в четыре длины волны наблюдается максимум в области основного фокуса на расстоянии 100 мм от пьезоэлементов, а максимум в области дополнительного фокуса расщепился на два максимума, величина которых существенно меньше величины максимума давления в области основного фокуса. А так как ширина отдельных пьезоэлементов по сравнению с ПЭП, акустическое поле которого приведено на рис. 1, в 4 раза больше, то и величина акустического давления в этом случае в области основного фокуса примерно в два раза больше.

На рис. 4 приведено распределение давления акустических волн P на расстоянии 100 мм от пьезоэлементов в осевой плоскости, перпендикулярной штрихам решетки (плоскости $yo-z$ на рис. 1).

На рис. 4 приведено распределение давления акустических волн P на расстоянии 100 мм от пьезоэлементов в осевой плоскости, перпендикулярной штрихам решетки (плоскости $yo-z$ на рис. 1).



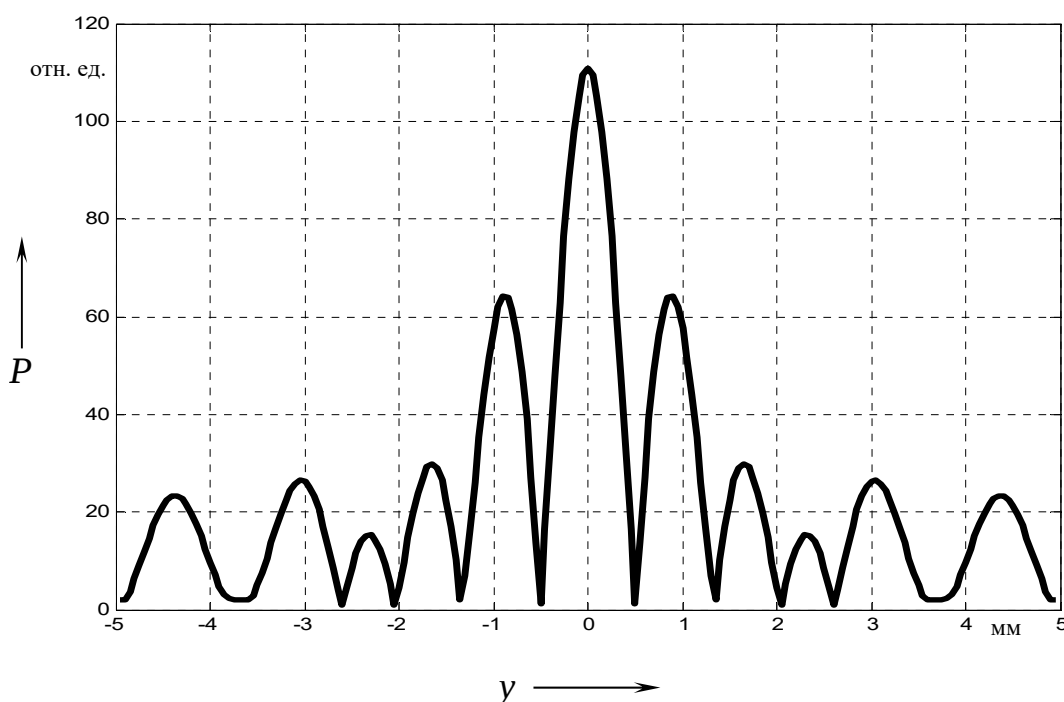


Рис. 4. Распределение давления акустических волн в фокальной плоскости на расстоянии 100 мм в осевой плоскости, перпендикулярной штрихам решетки

Из рис. 4 видно, что давление акустических волн в этой фокальной точке имеет ряд максимумов, три центральных из которых в минимуме спадают до нуля и сравнимы по величине. По уровню половинной амплитуды ширина основного максимума акустического пучка равна 0,6 мм, что соответствует двум длинам акустической волны.

Распределение акустического поля в области дополнительного фокуса в плоскости xoz носит похожий характер, как и в области основного фокуса.

Так как рассматриваемый в работе пьезоэлектрический преобразователь по своей физической сути представляет собой одномерную фазированную решетку, которая фокусирует генерируемые акустические волны не в круговую фокальную точку, а в фокальную точку примерно прямоугольной формы, то представляет определенный интерес выяснить, как распределяется давление акустических волн не только в осевой плоскости, перпендикулярной штрихам

решетки, но и в осевой плоскости, параллельной штрихам решетки, т. е. в плоскости $хоz$ на рис. 1. Распределение давления акустических волн P в осевой плоскости, параллельной штрихам решетки (плоскости $хоz$ на рис. 1), в области основного фокуса на расстоянии 100 мм от пьезоизлучателей с шириной 0,3 мм приведено на рис. 5.

На рис. 5 видно, что в области основного фокуса в плоскости, параллельной штрихам акустической решетки, акустическое излучение собирается в акустический пучок полушириной 38 мм, что соответствует длине элементарных прямоугольных излучателей L , равной 40 мм. В области максимума этого пучка наблюдается его модуляция по амплитуде, которая составляет 10 % от максимального уровня давления. Из анализа распределения акустического давления, приведенного на рис. 4 и 5, видно, что в области основного фокуса формируется акустический пучок максимальной амплитуды прямоугольной фор-



мы с размерами $38 \times 0,6$ мм. В области дополнительного фокуса наблюдаются аналогичные зависимости акустического

поля и формируется акустический пучок максимальной амплитуды прямоугольной формы с размерами $38 \times 0,32$ мм.

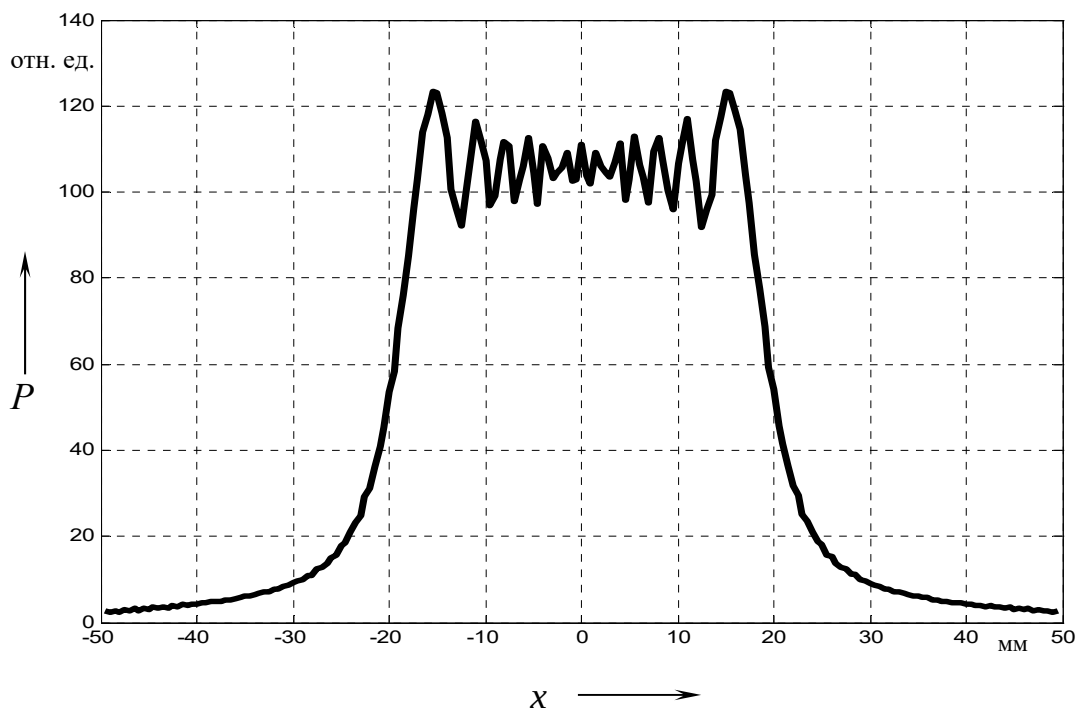


Рис. 5. Распределение давления акустических волн в основной фокальной плоскости при фокусном расстоянии 100 мм в направлении вдоль штрихов решетки

В работе проводились исследования влияния на характер акустического поля излучения дополнительного изменения фаз электрических возбуждающих сигналов, подаваемых на элементарные прямоугольные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) вышеописанной 17-элементной конструкции с шириной элементарных пьезоизлучателей $d = 0,3$ мм. Рассматривались два режима изменения фаз возбуждающих электрических сигналов.

В первом случае на центральный девятый элементарный пьезопреобразователь сигнал подавался в нулевой фазе, на окружающие восьмой и десятый элементы – в фазе φ , на седьмой и одиннадцатый элементы – 2φ , далее на соседних элементарных излучателях фаза электрических возбуждающих сиг-

налов увеличивалась на φ . В результате сдвиг фаз на крайних элементах пьезопреобразователя составлял 8φ .

Во втором случае на концевые элементарные излучатели электрический возбуждающий сигнал подавался в нулевой фазе, а затем сдвиг фаз увеличивался на соседних элементах на φ , достигая на центральном девятом элементе 8φ .

Проведенные расчеты осевого распределения акустического давления показали, что фокусное расстояние как основного, так и дополнительного фокусов ПЭП изменяется при изменении величины сдвига фаз φ . Для первого случая изменения фаз наблюдается увеличение фокусного расстояния с увеличением сдвига фаз, а для второго случая – уменьшение.



На рис. 6 приведены зависимости изменения основного фокусного расстояния OF при изменении величины сдви-

га фаз φ возбуждающих электрических сигналов между соседними элементарными пьезопреобразователями.

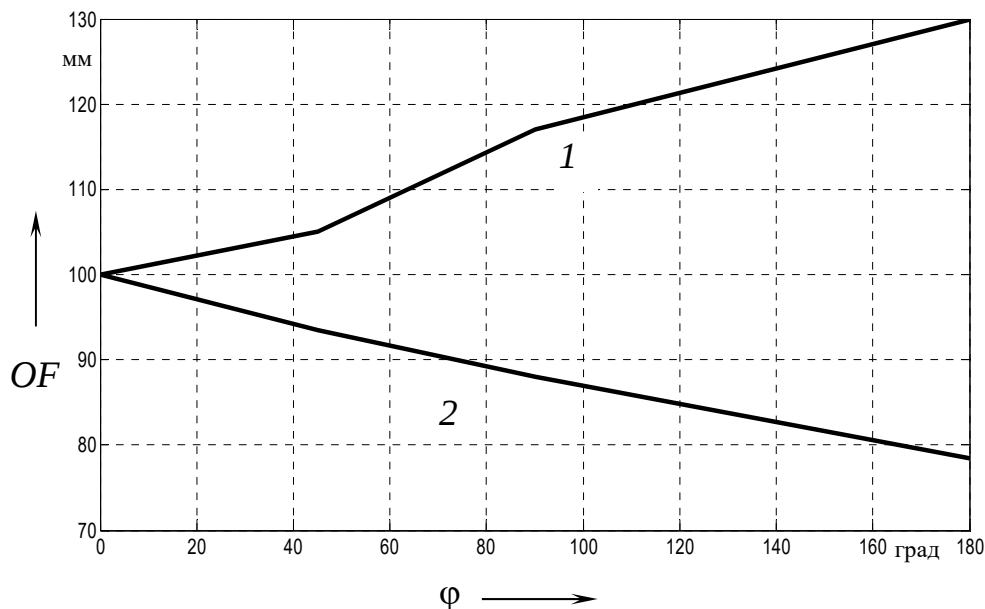


Рис. 6. Зависимость фокусного расстояния от величины сдвига фаз электрических возбуждающих сигналов между соседними элементами ПЭП: 1 – при возрастании сдвига фаз от центрального пьезоэлемента ПЭП к периферийным; 2 – при убывании сдвига фаз от центрального пьезоэлемента ПЭП к периферийным

Из рис. 6 видно, что изменение сдвига фаз возбуждающих электрических сигналов на соседние элементарные пьезоэлектрические излучатели решетчатого ПЭП приводит к практически линейной перестройке фокусного расстояния ПЭП, диапазон которого достигает 50 мм. Это явление характерно не только для основного фокуса, но и для дополнительного. При увеличении сдвига фаз происходит уменьшение величины фокальных максимумов и их уширение. Наблюдаемое явление изменения фокусного расстояния может быть использовано для динамической фокусировки при проведении неразрушающего ультразвукового контроля.

Таким образом, проведенные исследования фокусирующих ПЭП в виде одномерных фазированных решеток типа зонных пластинок Френеля показали, что в акустическом поле их излучения наблюдаются два фокуса: основной, фокусное расстояние которого определяется конструкцией ПЭП, и дополнительный, расположенный в ближней зоне ПЭП, фокусное расстояние которого равно примерно половине фокусного расстояния основного фокуса. Наблюдается перестройка фокусного расстояния ПЭП при изменении величины сдвига фаз электрического сигнала возбуждения отдельных элементарных пьезопластин ПЭП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных решеток / Пер. С. В. Реука. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 210 с.



2. **Фалькевич, С. А.** Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 280 с.
4. **Борисов, В. И.** Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2 (43). – С. 105–113.
5. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практическое пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.

Статья сдана в редакцию 23 июня 2020 года

Василий Иванович Борисов, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Сергей Сергеевич Сергеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: sss.bru@tut.by. Тел.: +375-297-43-38-68.
Елена Николаевна Прокопенко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
Никита Игоревич Казаченко, студент, Белорусско-Российский университет.

Vasily Ivanovich Borisov, DSc (Physics and Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University.
Sergey Sergeevich Sergeev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: sss.bru@tut.by. Tel.: +375-297-43-38-68.
Elena Nikolayevna Prokopenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
Nikita Igorevich Kazachenko, student, Belarusian-Russian University.