

---

УДК 534.6

А.В. Коржик

Національний технічний університет України “КПІ”, Київ

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА “СКВОЗНОЙ ЗАДАЧИ” К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА НАГРУЗКАХ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*С использованием решения задачи гидроэлектроупругости о приеме звуковых волн антенными решетками на основе пьезокерамических круговых тонкостенных преобразователей с разрезными электродами – исследованы общие закономерности формирования электрических сигналов на нагрузках электродов в условиях акусто-механического взаимодействия преобразователей решетки и в зависимости от расстояния между ними.*

**Ключевые слова:** электрические напряжения, акустическое взаимодействие, решетка, нагрузка электрода, электроупругий преобразователь, форма колебаний, электрод, оболочка, электрическая нагрузка, давление, полные перемещения.

### Введение

Предлагаемая статья посвящена развитию основных положений работы [1] в части изучения особенностей формирования электрических сигналов на нагрузках электродов многомодовых пьезокерамических приемных преобразователей с учетом их акусто-механического взаимодействия. При этом применение разрезных электродов преобразователей и их автономных электрических нагрузок обеспечивает возможность использования различных мод колебаний оболочек для решения задач о пространственной избирательности решетки на основе указанных преобразователей.

Учет характера поведения одиночных преобразователей и преобразователей из состава решетки [1 – 3] показывает, что волновые условия (частота и

направление прихода падающей волны, а также волновые размеры преобразователей и решетки) влияют на величину электрических сигналов на нагрузке электродов. При этом модовый состав выходного сигнала определяется исключительно видом электродирования поверхности преобразователя и способом коммутации электродов [4, 5]. Представляет практический интерес ситуация максимизации электрических напряжений, которые соответствуют той или иной моде и определяются с учетом амплитудно-частотной характеристики напряжений на выходе преобразователей решетки в фиксированных условиях их возбуждения.

Используя наиболее простую решетку в виде пары круговых цилиндрических преобразователей, полагаем, что цель предлагаемой работы состоит в

определении особенностей преобразования акустического воздействия в электрический сигнал при работе приемных электроупругих преобразователей решетки в условиях акустического взаимодействия и раздельного использования электродов

### Постановка задачи и условия проведения расчетов

Для достижения указанной цели использована постановка из области задач стационарной гидроэлектроупругости о приеме звука, которая приведена в работах [1, 6, 7]. Напомним, что указанная постановка использует ситуацию работы в идеальной жидкости вакуумированных внутри круговых цилиндрических преобразователей, на поверхность которых нанесены разрезные электроды, нагруженные на автономные симметричные электрические нагрузки. Преобразователи представляются тонкими электроупругими оболочками, колебания которых рассматриваются в рамках гипотез Кирхгофа – Лява [8]. Оболочки подвергаются воздействию плоской акустической волны, а результирующее поле  $p_{\Sigma}^s$  ( $s = 1; 2$  – номера цилиндров) описывается уравнением Гельмгольца. Граничные условия задачи включают условия сопряжения на поверхностях оболочек, электрические граничные условия для пьезоэлементов с электродным покрытием и условие излучения Зоммерфельда.

При расчетах рассматривалась двухэлементная антенная решетка, приведенная на рис. 1. В результате совместного решения уравнений, описывающих колебания оболочек, уравнений для акустического поля с привлечением теоремы сложения для волновых цилиндрических функций, а также указанных граничных условий, определению подлежат электрические напряжения  $U_{11}, U_{12}, U_{21}, U_{22}$  на нагрузках электродов преобразователей решетки  $Z_{11}, Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}$  ([3, 5]).

В качестве элементов решетки выбраны тонкостенные круговые цилиндрические вакуумирован-

ные пьезокерамические преобразователи, выполненные из материала ЦТБС-3 с радиусами  $R_1 = R_2 = 67.5 \cdot 10^{-3}$  м и толщинами стенок  $h_{01} = h_{02} = 6 \cdot 10^{-3}$  м. Длины образующих преобразователей  $l$  удовлетворяли условию:  $l > (3-5)\lambda$ . Полагалось также, что на внутренние и внешние поверхности преобразователей нанесены две пары электродов раскрывом  $2|\gamma'_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \pi$ , каждая из которых подключена к своей отдельной электрической нагрузке  $Z_{11}^0 = Z_{12}^0 = Z_{21}^0 = Z_{22}^0 = Z_{sm} / Z_0 = 1000$ . Нагрузку считаем чисто активной и приведенной к единице длины оболочки-преобразователя.

На решетку в направлении единичного вектора  $\mathbf{n}$  ( $\alpha = 0^\circ$ ), вдоль осей  $O_1x_1, O_2x_2$  падает плоская звуковая волна единичной амплитуды. Текущий угол  $\varphi_s$  ( $\varphi_1; \varphi_2$ ) изменяется в пределах  $\varphi_s \in (0; 2\pi)$ . Протяженность кабельной линии “электрод-нагрузка” – не учитывается. В результате решения сквозной задачи приема находились нормированные значения амплитуд электрического напряжения  $\frac{U_{\Sigma}}{U_0} \left( \frac{U_{11}}{U_0}, \frac{U_{12}}{U_0}, \frac{U_{21}}{U_0}, \frac{U_{22}}{U_0} \right)$ , ( $U_0 = 1В$ ) для соответ-

ствующих нагрузок  $Z_{11}^1, Z_{12}^1, Z_{21}^2, Z_{22}^2$  в зависимости от частоты  $f$  и расстояния  $d$  между фазовыми центрами преобразователей решетки. При этом зависимости  $U_{\Sigma}(d)/U_0$  рассчитывались в диапазоне значений  $d = 135 - 300$  мм для трех частот  $f_{00} \approx 8.20$  кГц,  $f_{01} \approx 11.65$  кГц и  $f_{03} \approx 27.25$  кГц, которые соответствуют резонансам нулевой, первой и третьей моды колебаний оболочек системы.

Дополнительно для анализа зависимостей электрических напряжений от расстояния между их фазовыми центрами был произведен расчет угловых распределений амплитуд полных перемещений точек поверхности каждой оболочки  $\frac{S_{\Sigma}}{S_0}$ , для которых

значение нормирующей величины  $S_0 \approx 0.81410^{-11}$  м

выбрано, исходя из ситуации гидростатического обжатия оболочки при перенесении ее из вакуума в водную среду.

Результаты расчетов указанных характеристик приведены на рис. 2 – 4.

На рис. 2 показаны АЧХ выходных значений относительных электрических напряжений в диапазоне частот, охватывающем значения резонансов "0"-й, "1"-й и "3"-й мод.

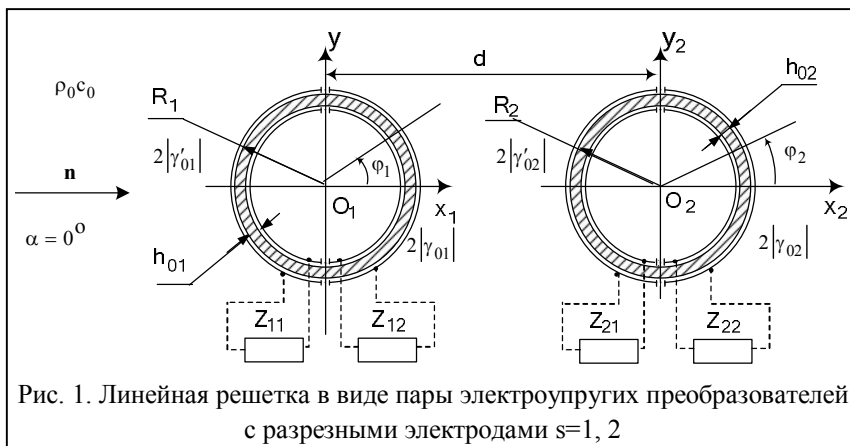


Рис. 1. Линейная решетка в виде пары электроупругих преобразователей с разрезными электродами  $s=1, 2$



На рис. 3 приведены зависимости относительных амплитуд электрических напряжений на нагрузках электродов пары преобразователей  $\frac{U_\Sigma}{U_0}$  от расстояния  $d$ . Угловые распределения амплитуд полных перемещений по поверхности преобразователя решетки (для  $s=1$ ) приведены на рис. 4 (для  $d = 140$  мм на рис. 4, а) и  $d = 200$  мм на рис. 4, б)).

**Анализ полученных результатов**

Как показано в работах [1, 2, 9], распределения давления  $p_\Sigma^s$  по поверхностям преобразователей системы определяют весьма сложный характер перемещений как самих преобразователей, так и точек их поверхностей. Это связывается с эффектами акустомеханического взаимодействия преобразователей в составе решетки. При этом изменение расстояния между центрами преобразователей решетки  $d$  приводит к перераспределению угловых зависимостей амплитуд  $p_\Sigma^s$  по поверхностям элементов решетки за счет приобретения решеткой новых волновых размеров и, как следствие, к созданию новых условий рассеяния звука и характера колебаний преобразователей решетки. Очевидно, указанные эффекты должны приводить к изменениям электрического сигнала на нагрузках электродов в рассматриваемых условиях работы [1, 10].

Заметим, что использованный вид электродирования поверхностей преобразователей решетки оставляет электромеханически активными нулевую, первую и высшие нечетные формы колебаний, которые фактически и определяют электрический сигнал на нагрузках электродов.

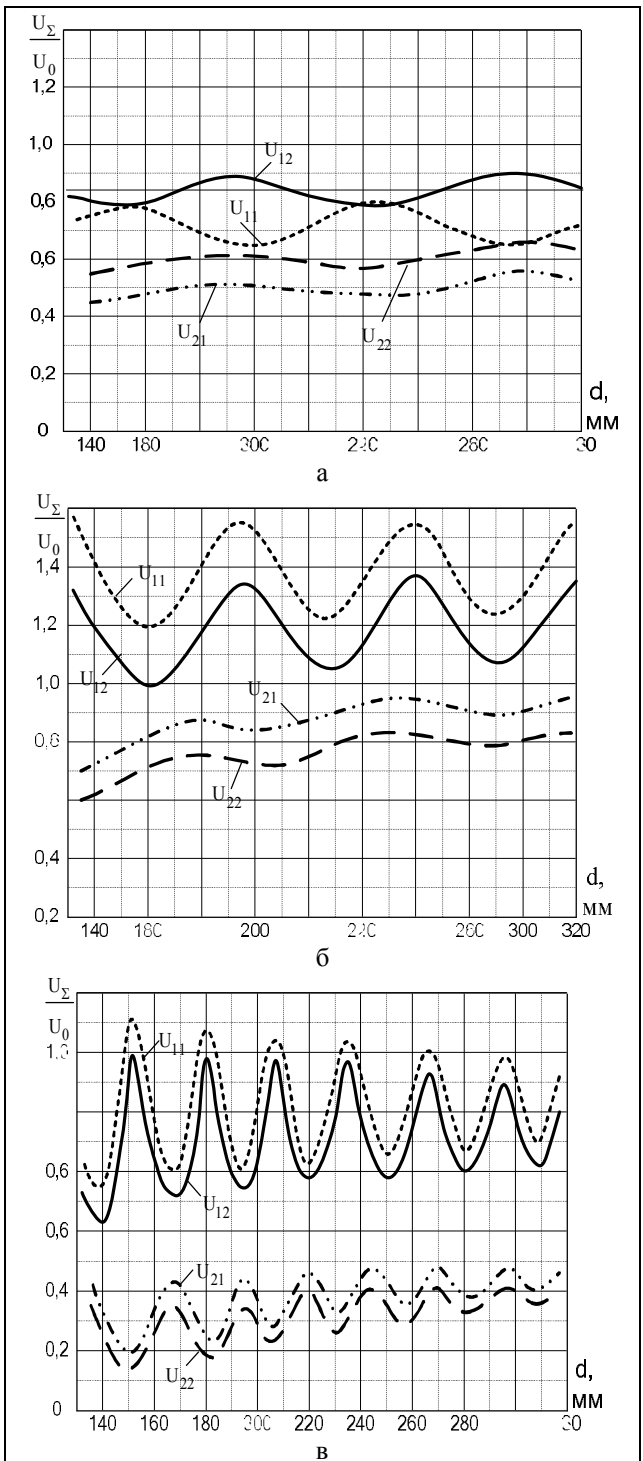
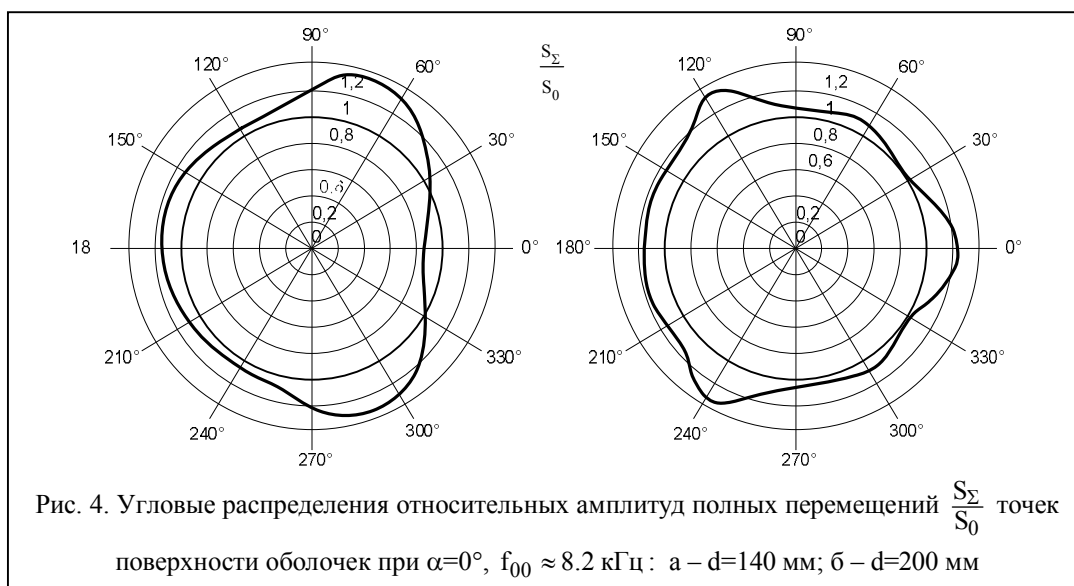


Рис. 3. Зависимость относительных амплитуд электрических напряжений  $\frac{U_\Sigma}{U_0}$  на нагрузках электродов пары преобразователей от расстояния  $d$  для а  $f_{00} \approx 8.20$  кГц; б –  $f_{01} \approx 11.6$  кГц; в –  $f_{03} \approx 27.25$  кГц при  $\alpha=0^\circ$

Так, приведенная на рис. 2 АЧХ показывает, что для частот из области резонанса нулевой моды амплитуда напряжения на нагрузке фронтального к направлению падения волны электрода преобразователя  $s = 1$  ниже, чем амплитуда напряжения на



нагрузке тыльного электрода того же преобразователя. Это совпадает с данными рис. 3, а практически для всех значений  $d \in (135-300)$  мм. Заметим, что в то же самое время значения давлений во фронтальных областях преобразователей  $s=1$  и  $s=2$  ( $p_{180}^1, p_{180}^2$ ) больше, чем давления  $p_0^1, p_0^2$  в тыльных областях (см. рис. 4, а) работы [1], направления  $\varphi_s = 180^\circ$  и  $\varphi_s = 0^\circ$  соответственно). Таким образом, складывается впечатление о том, что большему воздействию соответствует меньший отклик преобразователя.

Для объяснения этой особенности обратимся к угловым распределениям относительных суммарных перемещений  $\frac{S_{\Sigma}}{S_0}$  и рассмотрим подробнее процесс формирования электрических напряжений на нагрузках  $Z_{11}^1, Z_{12}^1$ . Выбранная частота резонанса нулевой моды  $f_{00} \approx 8.20$  кГц, угол падения  $\alpha = 0^\circ$  и расстояния  $d=140$  мм и  $d=200$  мм являются наиболее показательными.

Как известно [8], электрическое напряжение на выходе пьезоэлемента в общем случае прямо пропорционально приложенному механическому напряжению.

Воздействие механических напряжений вызывает деформацию пьезоэлемента, которая, в свою очередь, приводит к появлению связанных зарядов, пропорциональных величине относительной деформации. Таким образом, для оценки получаемых электрических напряжений в границах каждого элетродированного участка поверхности преобразователя необходимо рассмотреть полные перемещения точек его поверхности, которые вызваны распределенными относительными деформациями. Возникновение деформаций при этом обусловлено

распределенной по поверхности преобразователя внешней нагрузкой в виде давления  $p_{\Sigma}^s(\varphi_s)$ . В рамках рассмотренной задачи [2] перемещения  $S_{\Sigma}(\varphi_s)$  есть результат векторного суммирования его нормальной  $W^s$  и тангенциальной составляющих  $V^s$ . Угловые диаграммы относительных амплитуд полных перемещений  $\frac{S_{\Sigma}(\varphi_s)}{S_0}$  для преобразователя

$s=1$  при  $\alpha=0^\circ$ ,  $d=140$  мм и  $d=200$  мм приведены на рис. 4, а, б соответственно.

Относительные перемещения точек поверхности покоящейся гидростатически обжатой оболочки  $S_0$  соответствуют единичной по уровню окружности на диаграммах, а диапазон относительных изменений амплитуд перемещений  $\frac{S_{\Sigma}(\varphi_s)}{S_0}$  составляет

до 5 дБ. Таким образом, в пределах электрода  $2|\gamma_{01}^1|$  (диапазон изменения углов  $\varphi_s \in (90^\circ; 270^\circ)$ ), на поверхности которого давление  $p_{180}^1$  максимально, характер колебаний отвечает ситуации растяжения оболочки с относительным перемещением  $\Delta\xi \approx 0.18$ .

Область поверхности преобразователя в пределах тыльного электрода  $2|\gamma_{01}^1|$  (диапазон изменения углов  $\varphi_s \in (270^\circ; 90^\circ)$ ), на поверхности которого наибольшим есть давление  $p_0^1$ , отвечает ситуации возникновения перемещений с различными относительными знаками.

Так в направлении  $\varphi_s = 0^\circ$  оболочка сжата, а в секторах  $\varphi_s \in (30^\circ; 90^\circ)$  и  $\varphi_s \in (270^\circ; 330^\circ)$  – растянута. При этом возникают встречные движения

частиц оболочки, а перемена знака относительных перемещений вызывает перемену знака и в характеристике объемного деформирования элементов оболочки, что, в свою очередь, приводит к возникновению зарядов различных знаков под поверхностью электрода. Очевидно, количество зарядов определенного знака зависит от величины и направления механических напряжений соотносительно исходной формы оболочки, а также от величины деформируемого участка поверхности оболочки. В результате, вследствие проводимости электродного покрытия может происходить своеобразное усреднение заряда в пределах поверхности электрода, как в виде частичной нейтрализации зарядов различных знаков, так и в виде общего увеличения смещения зарядов. В нашем случае относительные перемещения в пределах раскрытия электрода  $2|\gamma_{01}|$  составляют величину  $\Delta\xi \approx 0.195$ . Полученные расчетные значения  $\Delta\xi \approx 0.18$  и  $\Delta\xi \approx 0.195$ , очевидно, и определяют приведенные на рис. 2 соотношения между  $U_{11}$  и  $U_{12}$ .

При изменении расстояния между фазовыми центрами преобразователя до значения  $d = 200$  мм (см. рис. 4, б), что соответствует максимуму  $r_{180}^1$  и минимуму  $r_0^1$ , характер движения оболочки меняется вследствие эффектов акусто-механического взаимодействия [1].

Так, со стороны электрода, нагруженного на нагрузку  $Z_{11}^1$ , наблюдается растяжение с относительным смещением  $\Delta\xi \approx 0.13$ , а со стороны электрода, нагруженного на нагрузку  $Z_{12}^1$  – растяжение с  $\Delta\xi \approx 0.26$ . Причем значение  $r_0^1$  соответствует наибольшему разряжению среды у поверхности преобразователя, а, значит, наибольшему растяжению оболочки. Учтем также, что в то же самое время оболочки совершают осциллирующие колебания вдоль осей  $O_1x_1$  и  $O_2x_2$  либо встречно ( $d = 140$  мм), либо согласно ( $d = 200$  мм).

Таким образом, однозначной зависимости между напряжением  $U_{11}^1$ ,  $U_{12}^1$  на нагрузках электродов  $Z_{11}^1$ ,  $Z_{12}^1$  и величиной давления полного поля  $p_{\Sigma}^s$  на поверхности преобразователя в рассмотренных расчетных ситуациях нет.

Поэтому для каждого из электродированных участков поверхности преобразователей необходимо оценить средние значения относительных перемещений  $\Delta\xi$ , величины которых и определяют результирующее электрическое напряжение с учетом возможных прогибов оболочек для каждой фиксированной ситуации падения волны, частоты, гео-

метрии решетки, вида электродирования и значений электрических нагрузок.

Кроме указанных особенностей имеется возможность получения электрических напряжений, максимизирующих ту или иную моду колебаний оболочки при заданных видах электродирования и значениях расстояния между фазовыми центрами преобразователей  $d$  (рис. 3). Так, расчеты показывают, что для равенства амплитуд относительных электрических напряжений на частоте нулевой моды расстояние между фазовыми центрами преобразователей  $d$  должно составлять 155 – 160, либо 245 – 250 мм. Наибольшие отличия между амплитудами напряжений при этом наблюдаются для значений  $d \approx 200$  мм, либо 290 мм.

Для максимизации значений относительных амплитуд электрических напряжений на частотах первой и третьей мод такое расстояние должно составлять  $\approx 190$  мм и  $\approx 150$  мм соответственно (см. рис. 3, б, в). При этом с учетом практически периодического характера зависимости  $\frac{U_{\Sigma}}{U_0}$  от  $d$ , для получения наибольших напряжений можно отыскать и другие (большие) значения  $d$ . Так, для "1"-й моды значения  $d \approx 260$  мм и 320 мм, а для моды "3"  $d \approx 150$  мм, 180 мм, 210 мм, 240 мм, 270 мм, 290 мм.

Таким образом, изменение расстояния  $d$  обеспечивает своеобразную настройку антенны на желаемую моду колебаний преобразователя путем максимизации значения напряжения на соответствующей нагрузке.

В случае изменения вида электродирования, либо положения электродов, наборы мод и соответствующие значения выходных напряжений могут изменяться. Добавим также, что заданное направление прихода плоской звуковой волны позволяет оценить лишь уровни бокового поля характеристики направленности рассмотренной двухэлементной антенны.

## Выводы

В результате проведенного анализа установлено, что особенности формирования электрических сигналов на нагрузках электродов многомодовых пьезокерамических приемных преобразователей состоят в следующем:

– однозначной зависимости между величинами напряжений, на нагрузках электродов и величиной давления полного поля  $p_{\Sigma}^s$  на поверхности преобразователей в рассмотренных расчетных ситуациях не выявлено;

– характер и величина относительных амплитуд выходных электрических напряжений рассмот-

реной двухэлементной системы определяется средним значением относительного перемещения поверхности преобразователя в пределах рассматриваемого электрода, как результата дифракции и эффектов акусто-механического взаимодействия преобразователей решетки;

– учет эффектов акустического взаимодействия преобразователей позволяет максимизировать выходной сигнал для соответствующей моды на нагрузке рассматриваемого электрода путем оптимизации расстояния между фазовыми центрами преобразователей, обеспечивая тем самым настройку антенной решетки на желаемую моду колебаний преобразователей;

– наращивание числа электродов с целью обогащения модовой структуры выходного сигнала приводит к более точному отображению характера распределения перемещений по поверхности преобразователей и создает более широкие возможности максимизации той или иной моды. При этом, наращивание числа электродов может приводить к уменьшению тока в цепи нагрузки соответствующего электрода в виду неизбежного уменьшения площади поверхности электрода.

### Список литературы

1. Коржик А.В. Исследование закономерностей акустического взаимодействия элементов антенных решеток, образованных электроупругими цилиндрическими преобразователями / А.В. Коржик // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС, 2010. – Вып. 5(86). – С. 59-66.
2. Коржик О.В. До питання дифракції плоскої акустичної хвилі на електропружному циліндричному прийомному перетворювачі / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – №6. – С. 83-89.

3. Коржик А.В. Формирование характеристики направленности антенны, состоящей из двух электроупругих элементов / А.В. Коржик // Электроника и связь. – 2009. – №1. – С. 45-53.

4. Аронов Б.С. Электро-механические преобразователи из пьезоэлектрической керамики / Б.С. Аронов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.

5. Коржик А.В. Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами / А.В. Коржик // Электроника и связь. – 2010. – №2. – С. 224-230.

6. Коржик О.В. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2001. – №4. – С. 106-114.

7. Коржик О.В. Врахування кабельного тракту при розв'язанні задач прийому звукових хвиль системами багатомодових п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів / О.В. Коржик, О.Г. Лейко // Электроника и связь. – 2007. – № 3. – С. 54-62.

8. Механика связанных полей в элементах конструкции. Т.5. Электроупругость / В.Т. Гринченко, А.Ф. Улитко, Н.А. Шульга. – К.: Наук. думка, 1989. – 280 с.

9. Коржик А.В. Применение метода сквозной задачи к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик акустического поля пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами / А.В. Коржик // Электроника и связь. – 2010. – №3. – С. 160-166.

10. Коржик А.В. Амплитудные и фазовые частотные характеристики электрических напряжений на нагрузках электродов пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности / А.В. Коржик // Электроника и связь. – 2010. – №5. – С. 192-196.

Поступила в редколлегию 12.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Лейко, Государственный НИИ Гидроприборов, Киев.

### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДА НАСКРІЗНОЇ ЗАДАЧИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ НА НАВАНТАЖЕННЯХ ЕЛЕКТРОДІВ ЕЛЕКТРОПРУЖНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

О.В. Коржик

З використанням розв'язку задачі гідроелектропружності про прийом звукових хвиль системами у вигляді решітки, які виконано на основі п'єзокерамічних колових тонкостінних перетворювачів з розрізними електродами – досліджено загальні закономірності формування електричних сигналів на навантаженнях електродів перетворювачів решітки за фіксованого кута падіння плоскої акустичної хвилі в діапазоні хвильових розмірів решітки. Визначено відстані між елементами, які дозволяють максимізувати бажану моду коливальних перетворювачів.

**Ключові слова:** електрична напруга, акустична взаємодія, ґрати, навантаження електроду, електропружний перетворювач, форма коливальних, електрод, оболонка, електричне навантаження, тиск, повні переміщення.

### TO PUT THE METHOD OF CONNECTING TASKS TO THE DETERMINATION THE EFFECTS OF FORMED THE ELECTRICS SIGNALS ON THE ELECTRODE LOADS OF PIEZOELASTIC CYLINDRICAL TRANSDUCERS

A.V. Korzhyk

In result of acoustical interactoins of antennas elements are describe the effects of formed the electric signals on the electrode loads of piezoelastic cylindrical transducers. Solution of problem was obtained for frequency range and range the wave distances between the antennas elements.

**Keywords:** electric tensions, acoustic co-operation, grate, loading of electrode, electro-resilient transformer, form of vibrations, electrode, shell, electric loading, pressure, complete moving.