# АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ ЗВУКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ЭЛЕКТРОДИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СВЯЗАННОСТИ

## А.В.КОРЖИК

Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев

#### Получено 21.10.2009

В рамках сквозной задачи о приеме звуковых волн пьезокерамическим цилиндрическим приемником в виде тонкостенной пьезокерамической оболочки рассчитаны амплитудно-частотные зависимости его модовых составляющих в условиях связанности форм колебаний при различных видах электродирования. Зависимости приведены для широкого диапазона волновых размеров преобразователя и ряда типичных углов раскрыва электродов.

У рамках наскрізної задачі про прийом звукових хвиль п'єзокерамічним циліндричним приймачем у вигляді тонкостінної п'єзокерамічної оболонки розраховані амплітудно-частотні залежності його модових складових в умовах зв'язаності форм коливань при різних видах електродування. Залежності наведені для широкого діапазону хвильових розмірів перетворювача й ряду типових кутів розхилу електродів.

The amplitude-frequency characteristics of the piezoceramic cylindrical receiver in form of a thin-walled piezoceramic shell have been calculated within the frameworks of the "through" problem on receiving of sound waves by the mentioned device under the conditions coupling of vibration modes at different types of electrodes. The obtained relations have been presented for wide range of transducer's wave dimensions and several typical opening angles of the electrodes.

## введение

В прикладной гидроакустике при решении задач формирования пространственной избирательности приемных акустических антенных решеток в широком частотном диапазоне для возбуждения различных форм колебаний пьезокерамических цилиндрических круговых преобразователей зачастую требуется должным образом выбрать вид (конфигурацию) электродов, наносимых на их поверхности.

Интерес к этому направлению исследований вызван еще и тем, что наряду с приобретением направленности на высших формах колебаний цилиндра, эффективность работы такого излучателя или приемника должна снижаться за счет взаимного влияния противофазно колеблющихся участков его поверхности, расположенных близко друг от друга [1]. Поэтому представляется интересной оценка возможных вкладов модовых составляющих в результирующие колебания поверхности приемника в широкой полосе частот в зависимости от выбранного вида электродирования с последующей оптимизацией взаимного расположения электродов для достижения определенного компромисса между формированием желаемой диаграммы направленности и падением эффективности приемной системы. Очевидно, что получаемые для

каждого конкретного вида электродирования и рабочей частоты соотношения между амплитудами модовых составляющих с учетом связанности форм колебаний позволяют дать рекомендации по выбору рациональной схемы коммутации электродов для достижения заданных пространственноэнергетических характеристик.

Вопросы применения различных видов электродирования поверхности цилиндрических преобразователей анализировались ранее в классических постановках задач о взаимном преобразовании акустической и электрической энергии с применением электромеханических и электроакустических аналогий [2-4]. При этом в большинстве ситуаций, имеющих практическое значение, рассматривалось либо полное электродирование боковых поверхностей преобразователей, либо покрытие в виде двух электродов с раскрывами по  $\approx 180^{\circ}$ каждый [4]. Использование традиционных граничных условий в виде априори заданных на поверхности преобразователя упрощенных ситуаций по давлению и колебательной скорости в большей степени подходило к случаю полного электродирования. При этом исчезали ошибки, связанные с игнорированием особенностей реальных угловых распределений колебательных скоростей и смещений точек поверхности преобразователя, представляемых в виде некоторой усредненной по по-



Рис. 1. Пьезокерамический преобразователь с двумя парами электродов  $(2|\gamma_{os};2|\gamma_{os}'|)$ и раздельными электрическими нагрузками  $Z_{11}; Z_{12}$ 

верхности величины. Очевидно, что неизбежные в этом случае потери информации о распределении возмущений по поверхности преобразователя увеличивались с ростом частоты. Известно также, что амплитудно-частотная характеристика нулевой формы колебаний, наилучшим образом согласованой с ситуацией полного электродирования, является наиболее энергетически насыщенной формой колебаний преобразователя [2], а максимум этой характеристики соответствует резонансу нулевой моды.

Разбиение полностью электродированной поверхности на две равные части приводит к тому, что результирующий сигнал на электрической нагрузке каждого электрода определятся уже совокупностью нулевой и нечетных мод [2, 3]. Известно, что для тонких оболочек модовый состав возбуждаемых колебаний достаточно разнообразен, формы колебаний связаны, их частотные зависимости иногда весьма самобытны, а управление формами (в части изменение долей вкладов отдельных мод) может осуществляться акустомеханическими способами [5-9]. В качестве примера таких средств управления упомянем варьирование толщины оболочки (не выходя за рамки ограничений модели Кирхгофа-Лява) [6,7], заполнение ее внутреннего объема жидкостью [8] и внесение в этот объем симметричных и несимметричных вставок различной геометрии [9-11].

Очевидно, что к подобным способам управления можно отнести изменение угловых размеров секционированных электродов. Количественное исследование возможностей указанного подхода на конкретных примерах и составляет цель данной статьи.

#### 1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Б. С. Аронов в монографии [2] на основе традиционных представлений с использованием метода электромеханических аналогий предложил учитывать влияние типа электродирования поверхности цилиндрических преобразователей в виде угловой зависимости коэффициента трансформации с использованием множителя

$$\Omega_i = (1+i^2) \int_{0}^{2\pi} \Omega(\varphi) \cos(i\varphi) d\varphi.$$
 (1)

Здесь  $\Omega_i$  – параметр, пропорциональный коэффициенту трансформации; i – номер моды;  $\Omega(\varphi)$  – угловая функция;  $\varphi$  – текущий угол.

В нашем случае характер возбуждения преобразователя-оболочки соответствует случаю эффективного возбуждения окружных мод, соответствующих его колебаниям как "криволинейного стержня". Поэтому в данной работе игнорируется существование низкочастотного квазиизгибного семейства окружных мод [10, 11].

Процедура аналитического решения стационарной задачи гидроэлектроупругости о приеме звука цилиндрическим преобразователем в сквозной постановке подробно описана в статьях [12,13] и здесь не приводится. Отметим лишь, что наличие разрезных электродов определенного углового раскрыва (рис. 1) предложено учитывать в виде суперпозиции [12–14]

$$U_{sm}^{(s)}(\varphi_s) = E_{Z11}^{(0)} f_{11}(\varphi_s) + E_{Z12}^{(0)} f_{12}(\varphi_s) + \dots$$

$$\dots + E_{Zsm}^{(0)} f_{sm}(\varphi_s) = E_{\sum Zsm}^{(0)} h_{0s},$$
(2)

где  $U_{sm}^{(s)}(\varphi_s)$  – электрическое напряжение на комплексной нагрузке *m*-го электрода *s*-го преобразователя (в нашем случае s=1);  $\varphi_s$  – текущее значение угла в локальной *s*-ой системе цилиндрических координат;  $E_{Z11}^{(0)}$  – напряженность электрического поля в материале преобразователя; в пределах *m*-го электрода *s*-го преобразователя;  $f_{sm}(\varphi_s)$  – функции включения (функции-ключи) *m*-го электрода, которые для преобразователя, изображенного на рис. 1 при s=1, m=1 и m=2, представляются кусочно-непрерывными функция-

А. В. Коржик

МИ

$$f_{11}(\varphi_s) = B \operatorname{rect} \left[ \frac{\varphi_s}{2\gamma_{os}} \right],$$

$$f_{12}(\varphi_s) = B \operatorname{rect} \left[ \frac{\varphi_s - \pi}{2\gamma'_{os}} \right];$$
(3)

 $E_{\sum Zsm}^{(0)}$  – суммарное значение напряженности с учетом работы соответствующей функции-ключа  $f_{sm}(\varphi_s); h_{0s}$  – толщина *s*-ой оболочки.

Электрические нагрузки  $Z_{sm}$  предполагались независимыми и в общем случае комплексными.

Разложение выражений (3) в ряд Фурье представляется соотношениями вида

$$f_{sm}(\varphi_s) = \frac{2}{T} \sum_k \frac{\sin(k\gamma_{os})}{k\gamma_{os}} \gamma_{os} e^{-ik\gamma_m} e^{ik\varphi_s} = = \frac{2}{T} \sum_k \xi_k^{ms} e^{ik\varphi_s}.$$
(4)

где  $k \in ]-\infty; +\infty[; m=0, 1, 2, 3, ...$  (при этом m=0 соответствует ситуации полного электродирования или наличию одного электрода с центром в направлении  $\varphi_s = 0^\circ$ , а m=1, 2, 3, ... введению второго электрода при отсчете углов  $\varphi_s$  по часовой стрелке);

$$\xi_k^{ms} = \frac{\sin(k\gamma_{os})}{k\gamma_{os}} \gamma_{os} e^{-ik\gamma_m}; \qquad (5)$$

 $\gamma_m$  – угол между линиями, определяющими направления на центры рассматриваемых *m*-ых электродов (к примеру, на рис. 1  $\gamma_m = \pi$ );

Последующее вычисление коэффициентов (5) с учетом выражений (4) и (2) дает возможность воспользоваться суперпозицией для  $U_{sm}(\varphi_s)$  как при решении самой сквозной задачи (см., например, работы [13, 14]), так и при вычислении электрического напряжения на нагрузке *m*-го электрода *s*-го преобразователя. Предложенная методика позволяет исследовать модовый состав для любых сочетаний углов раскрыва  $2|\gamma_{os}|$  и  $2|\gamma'_{os}|$  без взаимного перекрытия электродов.

Заметим, что, в отличие от традиционного подхода с использованием выражения (1), в результате решения сквозной задачи о приеме звуковых волн значение  $U_{sm}(\varphi_s)$  находится с учетом взаимодействия акустических, механических и электрических полей. Оно зависит от конкретного вида электродирования, реальных значений и типов электродирования, реальных значений и типов электрического нагружения (с учетом симметрии или асимметрии его подключения к электродам преобразователя) и замены идеализированных граничных условий на поверхности преобразователя условиями сопряжения. Отметим, что увеличение количества автономно включенных электродов и, соответственно, большее количество снимаемых выходных электрических напряжений способны более точно отразить картину угловых распределений давлений, скоростей и смещений, сформированных на поверхности оболочки. Однако при этом сближение противофазно колеблющихся участков поверхности должно приводить к взаимной компенсации их вкладов и, как следствие, к снижению общей эффективности работы преобразователя.

#### 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, УСЛОВИЯ И РЕ-ЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В качестве расчетной модели был выбран одиночный тонкостенный круговой цилиндрический вакуумированный внутри пьезокерамический преобразователь бесконечной длины, выполненный из пьезоматериала ЦТБС-3 и имеющий диаметр  $d_{os} = 2r_{os} = 135$  мм и толщину стенки  $h_{os} = 6$  мм. На внутреннюю и внешнюю поверхности преобразователя нанесены две пары электродов раскрывом  $2|\gamma_{os}|$  и  $2|\gamma'_{os}|$  каждая. Предполагалось, что каждая пара электродов (в дальнейшем просто электрод) нагружена на свою электрическую нагрузку  $Z_{sm}^0 = Z_{sm}/Z_0 = 1000$ , представляющую собой активное сопротивление, приведенное к единице длины оболочки-преобразователя (Z<sub>0</sub> – размерный масштабный множитель). На преобразователь в направлении единичного вектора  $\vec{n}$ , расположенного под углом  $\alpha$  к оси  $O_s X_s$  (см. рис. 1), падает плоская звуковая волна единичной амплитуды. Для расчетов угол падения плоской волны принимался  $\alpha = 0^{\circ}$ , а текущий угол  $\varphi_s$  изменялся в пределах  $\varphi_s \in [0; 2\pi]$ . Протяженность кабельной линии "электрод-нагрузка" не учитывалась.

Задача решалась с использованием алгоритма отыскания неизвестных коэффициентов разложений акустических, механических и электрических полей для системы, состоящей из одного (s=1)преобразователя [12]. При этом, находилась амплитуда электрического напряжения на соответствующей активной нагрузке *т*-го электрода для мод колебаний с номерами n = 0, 1, 2, 3, 4 на частотах из рассматриваемого диапазона. Количество членов ряда в разложениях полей выбиралось не менее  $\pm 15$ . В расчетах также полагалось, что электрод m=2 ориентирован симметрично относительно оси  $O_s X_s$ , а его раскрыв может изменяться в пределах  $2|\gamma'_{os}| \in [0^\circ; 360^\circ]$ . При этом электрод m=1 должен был иметь угловой раскрыв, дополняющий электрод m=2 до  $360^{\circ}$  без взаимных перекрытий.

Следует отметить, что вследствие эффекта Гиббса выбранное представление разрывных функций  $f_{sm}(\varphi_s)$  в виде ряда Фурье в окрестности точки разрыва не вполне удовлетворительно. Поэтому, чтобы снизить влияние краевой особенности, при определении выходных электрических напряжений значения амплитуд и фаз напряжений выбирались в окрестности центра электрода. При этом число удержанных членов ряда Фурье составило ±300, что обеспечило равномерность расчетных данных для области в окрестности центра электрода ±30° – не хуже 0.5 %. Схематические изображения рассмотренных вариантов видов электродирования приведены на рис. 2.

Расчеты для указанных условий и видов электродирования проводились в диапазоне частот (500...38000) Гц, отр соответствовало диапазону изменения волновых размеров  $d_{os}/\lambda = (0.05...3.2),$  где  $d_{os} = 2r_{os}.$ Полученные зависимости  $A_n(f)$  в виде нормированных амплитудно-частотных характеристик приведены на рис. 3. В качестве нормирующей величины использовано максимальное значение амплитуды нулевой моды для ситуации полного электродирования при выбранном значении  $Z_{sm}^0$ .

Таким образом, используя выбранные исходные данные и условия расчетов, в рассматриваемом частотном диапазоне были определены амплитудно-частотные характеристики первых пяти модовых составляющих для четырех типичных видов электродирования. Заметим, что для варианта, приведенного на рис. 2, в, значения угла  $2|\gamma'_{os}|$  раскрыва электрода m=2 выбирались из набора  $120^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ . Для варианта рис. 2, r угол раскрыва электрода составил  $2|\gamma'_{os}|=240^{\circ}$ .

## 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из графиков, для выбранной модели преобразователя резонансы первых пяти мод составили: для нулевой моды –  $f_0 = 8.2 \text{ к}\Gamma$ ц, для первой –  $f_{01} = 11.65 \text{ к}\Gamma$ ц, для второй –  $f_{02} = 18.8 \text{ к}\Gamma$ ц, для третьей –  $f_{03} = 27.25 \text{ к}\Gamma$ ц и для четвертой –  $f_{04} = 35.6 \text{ к}\Gamma$ ц. Эти результаты согласуются с традиционными представлениями [2,3].

Амплитудно-частотные характеристики, представленные на рис. 3, иллюстрируют как разнообразие электромеханически активных мод, так и наибольшую эффективность полного электродирования  $2|\gamma'_{os}|=2\pi$  (см. сплошную кривую на рис. 3, а). Для других видов электродирования видна высокая степень связанности форм колебаний. Так, для частоты  $f_0$  при использовании любых

отличных от  $2|\gamma_{os}'|=2\pi$  вариантов раскрыва электродов вклады нулевой и первой мод отличаются не более, чем на (10...15) %. На частоте резонанса первой моды  $f_{01}$  вклады смежных с ней форм составляют до 40 % (нулевая мода) и около 10 % (вторая мода). Заметим, что вклад нулевой моды на частотах резонансов мод высших порядков, начиная со второй, существенно ослабевает и составляет не более 10 % (см. рис. 3, б). С ростом частоты снижается и степень взаимного влияния мод, смежных с резонансными (до (5...8) %). При этом с ростом номера моды наблюдается общий рост амплитуд модовых составляющих и изменение ширины резонансных кривых. Наибольшей шириной резонансной кривой характеризуется нулевая мода. Для более высоких мод ширина резонансных кривых уменьшается, что может объясняться повышением добротности системы для них. Таким образом, с ростом номера моды демпфирование вблизи окрестности частот, определяющих ширину резонансной кривой с центральной частотой  $f_{0i} = f_0 \sqrt{1+i^2}$ , возрастает, а широкополосность модальных вкладов падает. Полученные результаты также иллюстрируют существование зависимости амплитуд форм колебаний от площади электрода (в нашем случае от угла раскрыва).

При отсутствии электродов преобразователь, моделируемый тонкостенной оболочкой, характеризуется практически бесконечным набором собственных форм колебаний, частоты и амплитуды которых определяются известными соотношениями. При этом энергетическая эффективность работы преобразователя при смещении по частоте в области высших мод уменьшается [1]. Использование электродирования, определяемого суперпозицией функций включения вида  $f_{sn}(\varphi)$  (2), (3), представляет собой набор членов ряда Фурье, состав которого характеризует заданную угловую протяженность  $f_{sm}(\varphi)$ . Поэтому разложение  $f_{sn}(\varphi)$  в ряд по собственным формам при конкретных значениях  $|\gamma_{os}|$  и  $|\gamma_{os}'|$  определяет набор гармоник выходного напряжения, а, значит, и набор электромеханически активных форм колебаний преобразователя. Таким образом, электрод выполняет роль своеобразного фильтра, который в зависимости от своих избирательных качеств (раскрыва) сохраняет или исключает те или иные формы колебаний. Действительно, равенство нулю соответствующих членов ряда позволяет говорить о том, что для полного электродирования существует лишь нулевая мода, половинное электродирование оставляет нулевую и все нечетные формы (см. рис. 3, a), а электроды с раскрывами  $120^{\circ}$  и



Рис. 2. Виды электродирования

90° позволяют исключить соответственно третью и четвертую формы (см. рис. 3, б и в) и т. п.

Очевидно, что обогащение модового состава происходит с уменьшением углового раскрыва электрода. Так, при  $2|\gamma_{os}'|\!\leq\!30^\circ$ колебательный процесс обеспечивают все моды с нулевой по пятую и выше (за исключением моды с номером 12). Анализируя амплитуды модовых составляющих на соответствующих резонансах, заметим, что единственной и наибольшей по амплитуде является нулевая мода на частоте  $f_0$  для случая полного электродирования, в которую перекачивается вся энергия падающей волны. Возрастание числа мод приводит к перераспределению исходного запаса энергии между ними: чем больше мод, тем меньше энергонасыщение каждой из них. Таким образом, сужение электрода, приводящее к обогащению модовой структуры, неизбежно приводит к снижению энергетических вкладов всех электромеханически активных мод. Естественно, что наибольшая доля энергии приходится на долю низших мод (см. амплитудно-частотные характеристики на рис. 3).

Тем не менее, здесь присутствует некоторая особенность: вторая мода для электрода с углом раскрыва электрода 120° меньше, чем для электрода с углом раскрыва 90° (ср. рис. 2, б и в), а третья мода для электрода с углом раскрыва 60° больше чем для электрода с углом раскрыва 90° (ср. рис. 2, в и г). Очевидно, такое отклонение вызвано характером разложений ряда Фурье, отвечающих рассматриваемому раскрыву. Коль скоро четные моды подавляются при  $2|\gamma_{os}| = 180^\circ$ , подобный эффект еще сказывается и при  $2|\gamma_{os}| = 120^{\circ}$ . И лишь при существенном изменении угла раскрыва электрода (в два раза) это влияние практически исключено, а значение амплитуды второй моды становится наибольшим. Аналогична ситуация и с третьей модой, которая должна подавляться



Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики модовых составляющих электроупругого преобразователя-оболочки для различных углов раскрыва электрода:  $a - 2|\gamma_{os}| = \pi; \ 6 - 2|\gamma_{os}| = 2\pi/3; \ B - 2|\gamma_{os}| = \pi/2; \ r - 2|\gamma_{os}| = \pi/3; \ d - 2|\gamma_{os}| = \pi/4; \ e - 2|\gamma_{os}| = \pi/6;$  $- - A_0, \ - - - A_1, \ - \cdot - - A_2, \ - \cdot - - A_3, \ - \cdot - - A_4$ 

А. В. Коржик

для электрода с углом раскрыва  $2|\gamma'_{os}| = 120^{\circ}$ . При этом для  $2|\gamma'_{os}| = 90^{\circ}$  влияние подавления не полностью исключено. Сделанный вывод подтверждается и расчетом амплитуды первой моды при изменении  $2|\gamma'_{os}|$  от 130 до 240°, что приближает рассматриваемую ситуацию к полному электродированию. В этом случае наблюдалось уменьшение амплитуды первой моды.

Результаты расчетов зависимости амплитуд модовых составляющих от угла раскрыва электрода для n = 0, 1, 2, 3 приведены на рис. 4. Параметрами кривых служат частоты, соответствующие резонансам указанных мод. Таким образом, получение модовых составляющих с наибольшей амплитудой предполагает подбор электрода с определенным угловым раскрывом. Для электродов с углами раскрывов, значительно меньшими, чем те, которые соответствовали ситуации подавления определенной формы колебаний, уменьшение мод по амплитуде носит плавный характер (как, например, для четвертой моды, начиная с углов  $2|\gamma_{os}| \leq 22.5^{\circ}$ ). Отметим, что нулевую моду нельзя подавить (см. рис. 2, а), так как для этого понадобилось бы подобрать электрод с раскрывом  $2|\gamma'_{os}| > 360^{\circ}$ .

## выводы

В рамках решения сквозной задачи о приеме звука цилиндрическим тонкостенным электроупругим приемником в широком диапазоне частот рассчитаны амплитудно-частотные характеристики модовых составляющих для наиболее типичных видов электродирования и приведены амплитудные соотношения между модами. Для бесконечного по длине вакуумированного внутри преобразователя при выбранных условиях электродирования и электрического нагружения показано, что:

- модовые составляющие характеризуются высокой степенью связанности (особенно в области нижних частот для форм n=0,1,2);
- с увеличением номера моды и частоты на общем фоне уменьшения эффективности мод высших порядков для различных видов электродирования связанность мод ослабевает;
- амплитуды модовых составляющих зависят от площади электрода преобразователя (угла раскрыва);
- модовые составляющие (в том числе и высших порядков) могут быть полностью или частично подавлены за счет изменения угла раскрыва электрода;



Рис. 4. Зависимость нормированных амплитуд модовых составляющих  $A_n$  от раскрыва электрода (раскрыв представлен нормированным значением величины дуги L):  $- - A_0, - - - A_1, - \cdot - - A_2, - - - A_3$ 

- получение максимального значения амплитуды каждой моды на частоте ее резонанса требует оптимизации угла раскрыва электрода;
- при заданных исходных данных и условиях расчета наибольшую амплитуду первой моды на частоте  $f_{01}$  обеспечивает электрод с углом раскрыва  $2|\gamma'_{os}| = \pi$ , второй моды на частоте  $f_{02}$  электрод с  $2|\gamma'_{os}| = \pi/2$ , третьей на частоте те  $f_{03}$  электрод с  $2|\gamma'_{os}| = \pi/3$ .

Полученные результаты, дополненные фазочастотными зависимостями модовых составляющих и введением многоэлектродности, могут быть использованы для получения суммарных обобщающих напряжений на нагрузках электродов, а также для прогнозирования результатов выполнения аддитивных операций в цепях приемных трактов преобразователей.

- 1. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маципура В. Т. Основи акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
- 2. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики.– Л.: Энергоатомиздат, 1990.– 271 с.
- Евтютов А. П., Колесников А. Е., Корепин Е. А. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.
- Богородский В. В., Зубарев Е. А., Корепин Е. А, Якушев В. И. Подводные электроакустические преобразователи.– Л.: Судостроение, 1983.– 243 с.
- 5. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки.– М.: Мир, 1963.– 635 с.
- Janger M. G. Vibration of reinforced shells in a vacuum and in a fluid // J. Appl. Mech.- 1954.- 21, N 1.- P. P.35-41.
- Janger M. G. Sound scattering by thin elastic shells // J. Acoust. Soc. Amer.- 1952.- 24, N 4.-P. 366-373.

#### А. В. Коржик

- 8. Гринченко В. Т., Вовк И. В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках.– К.: Наук. думка, 1986.– 240 с.
- Вовк І. В., Олійник В. Н. Випромінювання звуку циліндричною п'єзокерамічною оболочкою з секторіальною жорсткою вставкою // Доп. АН України.– 1993.– N 10.– С. 64–68.
- Вовк И. В., Олейник В. Н. Излучение звука заполненной жидкостью пьезокерамической оболочкой с несимметричной внутренней вставкой // Акуст. ж.– 1994.– 40, N 2.– С. 220–224.
- Vovk I. V., Olinyk V. N. Sound radiation by a cylindrical piezoelastic shell with an asymmetric insertion // J. Acoust. Soc. Amer.– 1996.– 99, N 1.– P. 133– 138.
- 12. Коржик О. В., Лейко О. Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наук. вісті НТУУ "КПГ".– 2001.– N 4.– С. 106–114.
- Коржик О. В., Лейко О. Г. Врахування кабельного тракту при розв'язанні задач прийому звукових хвиль системами багатомодових п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів // Электроника и связь.– 2007.– N 3.– С. 54–62.
- Коржик А. В., Стасив П. П. Отклик кругового цилиндрического преобразователя на возбуждение его плоской звуковой волной // Судостроит. промышл. Сер. Акустика.– 1991.– 9.– С. 27–29.