

УДК 534.6

# ФАЗО-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 12.10.2009*

С использованием решения сквозной задачи о приеме звуковых волн пьезокерамическим круговым тонкостенным преобразователем разрезными электродами и отдельным электрическим нагружением рассчитаны фазо-частотные характеристики его модовых составляющих. Фазо-частотные характеристики приведены для различных углов раскрытия электродов.

З використанням розв'язку наскрізної задачі про прийом звукових хвиль п'єзокерамічним круговим тонкостінним перетворювачем з розрізними електродами й роздільним електричним навантаженням розраховані фазо-частотні характеристики його модових складових. Фазо-частотні характеристики наведені для різних кутів розхилу електродів.

The phase-frequency characteristics of the modal components of a thin-walled piezoceramic circular transducer with sectional electrodes and separated electric load have been calculated using the solution of the “through” problem on sound receiving by such device. Mentioned phase-frequency characteristics are presented for various opening angles of the electrodes.

## ВВЕДЕНИЕ

Данная работа продолжает тематику исследований частотных характеристик таких многомодовых колебательных систем как цилиндрические пьезокерамические круговые тонкостенные преобразователи, на поверхности которых нанесены электроды с определенным углом раскрытия. Электроды нагружены на произвольные независимые электрические нагрузки. Определение общих амплитудно-частотных зависимостей модовых составляющих таких устройств в рамках традиционных подходов к расчетам приемных пьезокерамических преобразователей было выполнено в работе [1] и конкретизировано в работе [2] для наиболее часто встречающихся типов электродирования поверхностей преобразователей в виде тонкостенных пьезокерамических круговых цилиндрических оболочек.

В силу использования методологии связанных полей в системе “акустическая среда – оболочка – электрическая нагрузка”, при решении задачи о приеме звука данным преобразователем сведения об амплитудно-частотных зависимостях форм колебаний [2] следует дополнить фазовыми соотношениями, что даст возможность оценить харак-

тер результирующего сигнала на нагрузке соответствующего электрода. При этом цель исследования состоит в определении особенностей фазо-частотных распределений для первых пяти форм колебаний электроупругого цилиндрического приемника в зависимости от величины электрода при падении на приемник плоской акустической волны.

Следует отметить, что сведения о фазо-частотных характеристиках (ФЧХ) многомодовых систем представлены в публикациях, посвященных обсуждаемой тематике, недостаточно полно. Среди наиболее близких к выбранному направлению исследований следует отметить работы [3–6] в части эффектов пространственно-частотной фильтрации в системах взаимодействующих рассеивателей, вопросов использования наполнителей и вставок в цилиндрических источниках, а также излучающих систем в виде соосного набора цилиндрических колец, которые электрически запитываются независимо друг от друга.

Изложенное позволяет считать выбранную тематику исследований перспективной, позволяющей детализировать ситуацию приема звука многомодовыми системами в условиях электродирования и нагружения, приближенных к реальным.

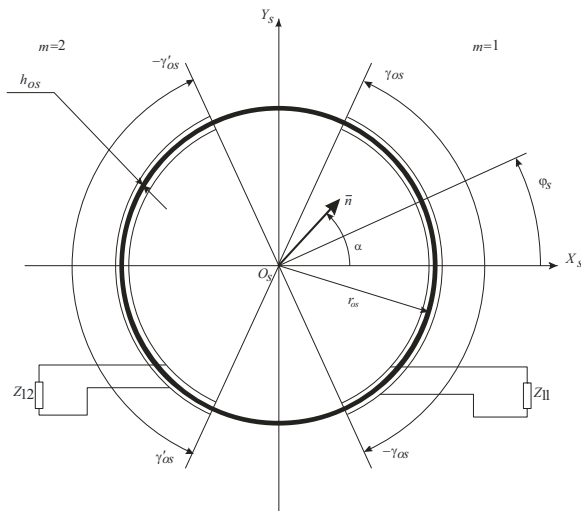


Рис. 1. Пьезокерамический преобразователь с двумя парами электродов ( $2\gamma_{os}$ ;  $2\gamma'_{os}$ ) и отдельными электрическими нагрузками  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$

## 1. К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ

Расчеты ФЧХ проведены на основе постановок и решений задач из области стационарной гидроэлектроупругости (см., например, [7, 8]) с привлечением методологии учета способа электродирования поверхности преобразователя, приведенной в работах [2, 8]. Постановочная часть и решение задачи в части акустических характеристик детально рассмотрены в статьях [9, 10]. Пьезокерамический материал, среда, тип и величина электрических нагрузок, количества членов разложения полей и рядов Фурье, а также угол падения волны  $\alpha$  и геометрические размеры оболочки (радиус  $r_{os}$  и толщина  $h_{os}$  – см. рис. 1) соответствуют заданным и приведены в публикации [2].

При расчетах ФЧХ углы раскрытия электродов  $2|\gamma'_{os}| = 2|\gamma_{os}|$  выбирались так:  $2|\gamma'_{os}| = 180^\circ, 120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$ . При этом значения резонансных частот модовых составляющих  $f_{0n}$  ( $n=0, 1, 2, 3, 4$ ) были  $f_{00} \approx 8.2$  кГц,  $f_{01} \approx 11.65$  кГц,  $f_{04} \approx 35.6$  кГц,  $f_{02} \approx 18.8$  кГц,  $f_{03} \approx 27.25$  кГц.

## 2. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов ФЧХ цилиндрического кругового электроупругого приемника для различных видов электродирования приведены на рис. 2.

Исходя из совпадения фаз напряжений и токов в нагрузке  $Z_n$  (для рассмотренной ситуации электрического нагружения  $Z_n = R$ ), будем считать,

что полученные расчетные ФЧХ электрического напряжения аналогичны ФЧХ токов в нагрузке с точностью до коэффициента  $1/R$ . Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) мод предлагается рассматривать по результатам расчетов [2].

Отметим, что все ФЧХ, приведенные для своих форм колебаний, весьма схожи и для каждой из них может быть выделено три области – низкочастотная, резонансная и высокочастотная, определяемые приблизительно так:

- $f/f_{0n} < 0.66$  для первой;
- $0.6 < f/f_{0n} < 1.66$  для второй;
- $f/f_{0n} > 1.6$  для третьей.

Здесь  $f_{0n}$  – частота резонанса  $n$ -ой моды колебаний рассматриваемой цилиндрической оболочки.

Как видно из графиков, в низкочастотной области наблюдаются относительно малые изменения фазы. Известно, что с уходом частоты в область нижних частот (вдали от резонанса) механический импеданс преобразователя типа оболочки увеличивается и имеет упругий характер [6]. Сопротивление излучения при этом падает. Известно также, что для первой формы колебаний механический импеданс оболочки-преобразователя имеет инерционный характер во всем диапазоне частот [4], а преобладание реактивной компоненты импеданса излучения над активной (в том числе и для высших из рассматриваемых мод) в области низких частот сохраняется. Таким образом, в силу связанности колебаний системы разнородные свойства составляющих полного импеданса преобразователя обуславливают не только частотно-зависимую изменчивость его характера но и разные диапазоны изменения значений фаз в дорезонансных областях. С ростом номера моды нижние границы резонансных областей перемещаются вверх по оси частот, характеризуя своеобразную ширину диапазона “неэффективности” использования мод высших порядков с точки зрения преобладания реактивной составляющей импеданса излучения над активной.

В высокочастотной (третьей) области наблюдается тенденция к совпадению фаз электрических напряжений (токов) для всех  $n$  форм колебаний. Очевидно, это поясняется выравниванием фаз колебаний участков поверхности преобразователя-оболочки вследствие сближения узловых линий при уменьшении длины волны. При этом общий характер изменения фазы с увеличением частоты связывается с изменением углового распределения по поверхности оболочки полного звукового поля

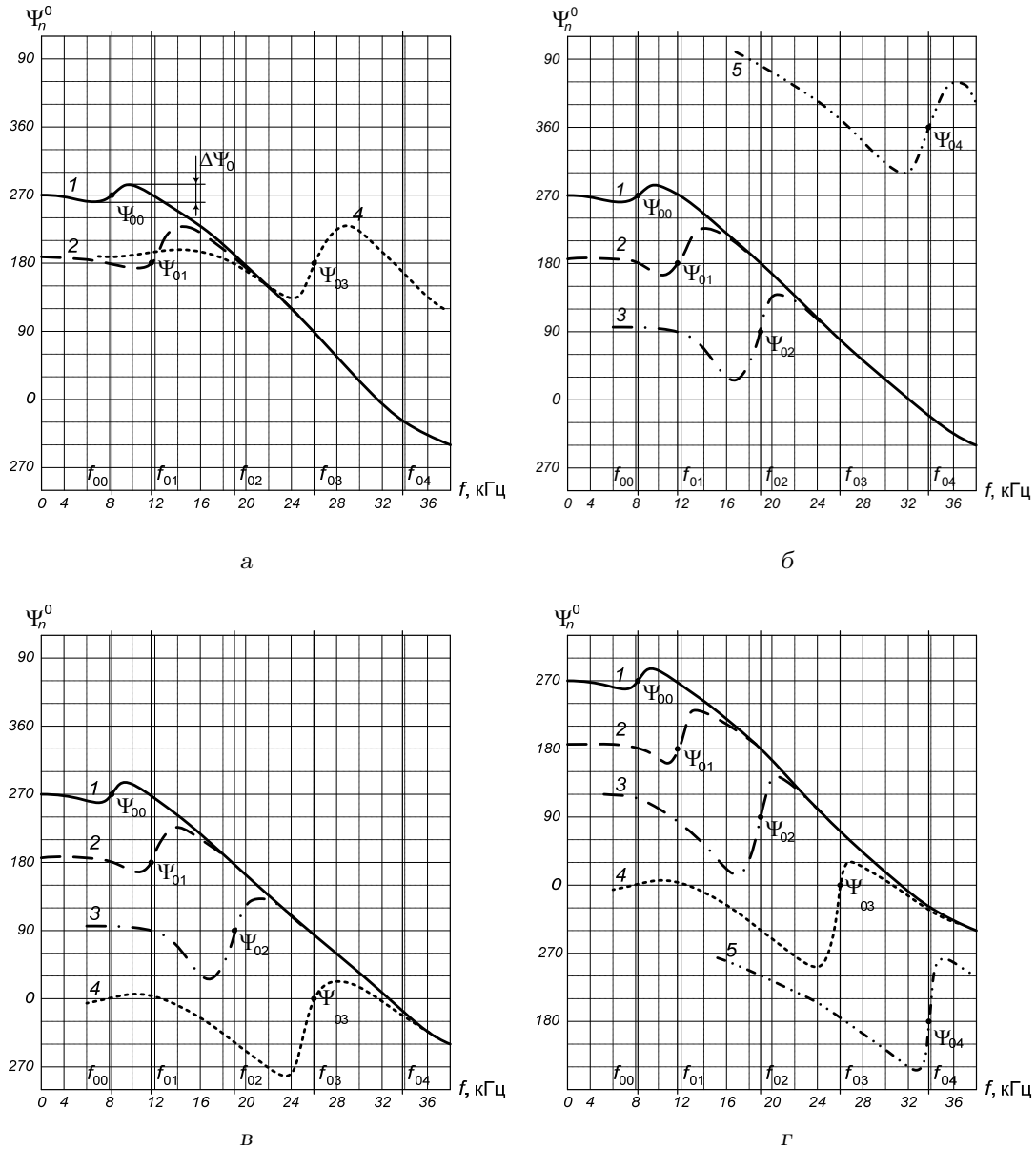


Рис. 2. Фазо-частотные характеристики модовых составляющих электроупругого преобразователя-оболочки для различных углов раскрытия электрода:

а -  $2|\gamma'_{os}|=180^\circ$ ; б -  $2|\gamma'_{os}|=120^\circ$ ; в -  $2|\gamma'_{os}|=90^\circ$ ; г -  $2|\gamma'_{os}|=60^\circ$ ;  
 - - -  $n=0$ , - - -  $n=1$ , - . - . -  $n=2$ , - - - -  $n=3$ , - . . . -  $n=4$

(как результата суперпозиции полей падающей и рассеянной волн) и ростом собственного механического импеданса преобразователя при изменении его характера с упругого на инерционный.

Заметим также, что для каждой кривой в высокочастотной области отмечается изменение фазы  $\Psi_{0n}$  ( $n=0, 1, 2, 3, 4$ ) более чем на  $-90^\circ$  относительно некоторого нулевого значения  $\Psi_{0n}$  для данной моды. Это говорит о том, что для соответствующей

частотной области действительная компонента полного механического импеданса преобразователя приобретает отрицательный знак. Схожая ситуация возникает из-за взаимовлияния по акустическому полю цилиндрических преобразователей при удалении

от резонанса  $n$ -ой моды колебаний в область верхних частот модовые составляющие, начиная с частоты  $f_{0n}$  ( $n+2$ -ой моды), перестают насыщать колебательный процесс энергией. Кроме того, существенное уменьшение ширины резонансной кривой  $n$ -ой моды на частоте резонанса ( $n+2$ -ой моды) [2] сопровождается значительным ослаблением связанности колебаний.

Наиболее интересна вторая (резонансная) область. Она характеризуется сопоставимостью собственных механических сопротивлений преобразователя и сопротивлений излучения для каждой из рассматриваемых мод. При этом интервал изменения фазы  $\Delta\Psi_n$  оказывается наименьшим для нулевой моды –  $\Delta\Psi_0 = 18^\circ$  при  $2|\gamma'_{os}| = 180^\circ$  и  $\Delta\Psi_0 = 24^\circ$  при  $2|\gamma'_{os}| = 60^\circ$  (см. рис. 2, а и в). Наибольший диапазон изменения характерен для наивысшей из рассматриваемых мод – четвертой ( $\Delta\Psi_0 = 30^\circ$  для любых  $2|\gamma'_{os}|$ ). Объяснением этому может служить увеличение диапазона изменения реактивной составляющей сопротивления излучения  $\mathbf{Im}(Z_{изл\ n})$  при уменьшении диапазона изменения активной составляющей  $\mathbf{Re}(Z_{изл\ n}) \rightarrow \rho c$  при  $kr_{os} > n$ .

Кроме того, ФЧХ в пределах резонансной области характеризуется неоднократным переходом через нулевое (для данной моды) значение фазы  $\Psi_{0n}$ , что говорит о сопутствующем многократном изменении характера полного механического сопротивления системы с упругого на инерционный и наоборот. Точки пересечения фазовой кривой с этой условно-средней горизонтальной линией соответствуют резонансным частотам системы “акустическая среда – оболочка – электрическая нагрузка”. Частоты  $f_{00}, f_{01}, f_{02}, f_{03}, f_{04}$  для мод с  $n=0, 1, 2, 3, 4$  указаны на рис. 2. Значения нулевых фаз  $\Psi_{0n}$  соответствуют жирным маркерам, нанесенным на соответствующие кривые.

Таким образом, комплекс “акустическая среда – оболочка – электрическая нагрузка” представляет собой систему с некоторой полосой, определяемой для полученных резонансных кривых форм колебаний. Такая полоса отлична от полосы резонансной кривой АЧХ системы с одной степенью свободы в условиях отсутствия связанности. Именно связанность смежных мод обуславливает сложное акусто-механическое поведение приемников в резонансной области для каждой из рассматриваемых мод.

Заметим также, что значения фаз  $\Psi_{0n}$  отличаются друг от друга на  $90^\circ$ . Наиболее показательны в этом отношении рис. 2, б и г. Очевидно, это объясняется представлением падающей

плоской волны в виде разложения по цилиндрическим волновым функциям и учетом множителя  $i^n$  ( $n$  – номер моды), [11]. При этом исходным значением фазы  $\Psi_{00}$  можно считать  $\Psi_{00} = 270^\circ$ , определяемое для резонанса нулевой моды и электрода наибольшей площади, которая соответствует углу раскрыва  $2|\gamma'_{os}| = 180^\circ$ . Характерно, что при переходе от одного типоразмера электрода (с углом раскрыва  $2|\gamma'_{os}|$ ) к другому фазовые соотношения между модами несколько изменяются. Так, при переходе угла раскрыва электрода через критическое значение (обеспечивающее подавление той или иной моды [1, 2], например,  $n=3$  при  $2|\gamma'_{os}| = 120^\circ$  или  $n=4$  при  $2|\gamma'_{os}| = 90^\circ$ ), амплитудные и фазовые кривые активируются вновь, но со смещением на  $180^\circ$  (см. рис. 2, а, в для моды  $n=3$  и рис. 2, б, г для моды  $n=4$ ). Объяснением этому, по-видимому, может быть то, что изменение длины дуги окружности, соответствующей электроду заданного раскрыва, вызывает изменение соотношения угловых распределений противофазных и синфазных участков колеблющейся поверхности преобразователя с преобладанием перемещений поверхности определенного знака.

Кроме того, увеличение номера моды приводит к увеличению крутизны фазовой кривой вблизи значения резонанса (см. рис. 2, а и г). Это объясняется более высокой добротностью высших форм колебаний оболочки по сравнению с низшими.

## ВЫВОДЫ

1. ФЧХ первых пяти модовых составляющих рассмотренной системы “акустическая среда – оболочка – электрическая нагрузка” в заданном диапазоне частот имеют схожий характер, отличаясь расположением резонансной области на оси частот, величиной интервала изменения фазы и степенью крутизны фазовой кривой в окрестности резонанса соответствующей моды. При этом крутизна фазовой кривой в окрестности резонанса, расположение области  $n$ -ой моды и увеличение интервала изменения фазы  $\Delta\Psi_n$  в ней связаны с увеличением номера моды и, соответственно, изменением соотношения  $\mathbf{Im}(Z_{изл\ n})$  к  $\mathbf{Re}(Z_{изл\ n})$ .
2. Каждая ФЧХ позволяет определить область верхних частот, в которой эффективность рассматриваемой моды утрачивается, а связанность со смежными ( $n+2$ ) модами уменьшается.

3. Изменение площади (угла раскрыва) электрода при переходе через “критический” размер, обеспечивающий подавление той или иной моды, приводит к изменению значения фазы  $\Psi_{0n}$  подавленной и вновь электромеханически активизированной моды на  $180^\circ$ .
1. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики.– Л.: Энергоатомиздат, 1990.– 271 с.
2. Коржик А. В. Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // Акуст. вісн.– 2009.– 12, N 3.– С. 33–40.
3. Лейко А. Г., Шамарин Ю. Е., Ткаченко В. П. Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей.– К.: Аванпост прим, 2000.– 320 с.
4. 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.
5. Гринченко В. Т., Вовк І. В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках.– К.: Наук. думка, 1986.– 240 с.
6. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маципура В. Т. Основи акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
7. Дідковський В. С., Лейко О. Г., Савін В. Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі.– Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2006.– 448 с.
8. Коржик О. В., Лейко О. Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наук. вісті НТУУ “КПІ”.– 2001.– N 4.– С. 106–114.
9. Коржик О. В., Лейко О. Г. Формування характеристик напрямленості одиночного приймального електропружного циліндричного перетворювача з розрізними електродами // Наук. вісті НТУУ “КПІ”.– 2005.– N 1.– С. 50–55.
10. Коржик О. В., Лейко О. Г. Дослідження акустичних характеристик одиночного п'єзокерамічного перетворювача при розв'язанні задачі прийому в наскрізній постановці // Наук. вісті НТУУ “КПІ”.– 2002.– N 5.– С. 105–113.
11. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики.– Л.: Судостроение, 1972.– 352 с.