

Акустические приборы и системы

УДК 534.6

А.В. Коржик, канд. техн. наук

Амплитудные и фазовые частотные характеристики электрических напряжений на нагрузках электродов пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности

В рамках сквозной задачи о приеме звуковых волн пьезокерамическими цилиндрическими приемниками, представленными тонкостенными пьезокерамическими оболочками, рассчитаны амплитудные и фазочастотные зависимости электрических напряжений на нагрузках электродов электроупругого преобразователя в условиях связанности форм колебаний при различных видах электродирования. Зависимости приведены для диапазона волновых размеров преобразователя и типичных углов раскрытия электродов.

In boundaries of hydro - electroelastics problems the AFCh for electric field of piezoelectric cylindrical transducer – reciver with disconnected electrodes are calculated and described. The solutions are obtained for symmetrical electrical conditions. The modes structure and modes AFCh and FFCh of electric field is detected and described.

Введение

Использование в современных акустических системах пьезокерамических цилиндрических преобразователей с разрезными электродами, каждый из которых нагружен на автономную электрическую нагрузку, требует уточнения частотных характеристик выходных электрических напряжений (АЧХ – амплитудно-частотных, ФЧХ – фазо-частотных). Сведения о них дают возможность оценки частотных свойств приемных устройств при работе преобразователей в составе широкополосных систем и позволяют прогнозировать результаты весового суммирования указанных напряжений с целью определения пространственно-избирательных качеств групп преобразователей.

Отметим то, что оценка указанных частотных характеристик проводится на основе учета реальных угловых распределений амплитуд и фаз акустических давлений и перемещений точек поверхности преобразователей. Это, позволяет увязать процессы формирования выходных электрических сигналов с образованными на поверхности преобразователя распределен-

ными возмущениями с учетом вида электродирования поверхности и характера нагрузок электродов. В связи с этим, предлагаемая работа представляется своевременной и актуальной.

Следует упомянуть о том, что преобразователь ведет себя как многорезонансная рассеивающая система, а также то, что для наиболее типичных видов электродирования, изучение АЧХ и ФЧХ предполагает необходимость рассмотрения весьма широкого частотного диапазона (не менее четырех октав) и соответствующего диапазона волновых размеров преобразователя.

В связи с этим, целью предлагаемой работы является оценка амплитудных - и фазо-частотных зависимостей электрических напряжений на нагрузках электродов электроупругого преобразователя в условиях связанности форм колебаний при различных видах электродирования и углах раскрытия электродов. Характеристики приведены для широкого диапазона частот и волновых размеров преобразователя.

Постановка и решение задачи

При рассмотрении данной проблемы, решается задача класса стационарной гидроэлектроупругости, под названием “сквозная задача приема”. Таким образом, предполагается использовать постановки, приведенные в работах [1;2], результаты работ [3;4] в части характеристик акустических, механических полей, а также особенностей использования разрезных электродов [5;6].

Так, по результатам определения характеристик полного поля p_{Σ} на поверхности бесконечного по длине пьезокерамического приемного преобразователя [3], а также оценки механического поля в виде совокупности модовых структур нормальных составляющих перемещений W_n , а также угловых распределений суммарных перемещений W_{Σ} и S_{Σ} по поверхности преобразователя [4], предполагается использование функций включения [2;6] для получения результирующих электрических напряже-

ний на активных нагрузках электродов. При этом, напряженность электрического поля E_{zs}^0 и электрическое напряжение U_H^s для соответствующего электрода s -го преобразователя ($s=1$) с радиусом r_{os} и толщиной стенки h_{0s} , связаны известным [7] соотношением :

$$U_H^s = \int_{-\frac{h_{0s}}{2}}^{\frac{h_{0s}}{2}} E_{zs}^0 dh_{0s}.$$

В дальнейшем отыскивается суперпозиция вида

$$U_H^s = U_H^{s1} f(\varphi_s) + U_H^{s2} f_{s2}(\varphi_s) + \dots + U_H^{sm} f_{sm}(\varphi_s),$$

где: φ_s – текущий угол в локальной системе координат s -го цилиндрического преобразователя;

$f_{sm}(\varphi_s)$ – функции включения ([2;6]) соответствующего электрода s -го преобразователя;

$m = 0; 1; 2$ (значение $m = 0$ отвечает ситуации полного электродирования поверхности преобразователя, а $m = 1, m = 2$ - использованию двух диаметрально противоположно ориентированных электродов).

Условия проведения расчетов и основные результаты

Расчеты проводились для одиночного кругового цилиндрического пьезокерамического преобразователя, выполненного из пьезоматериала ЦТБС-3 с диаметром $d_{os} = 2r_{os} = 2a = 135 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной стенки $h_{0s} = 6 \cdot 10^{-3}$ м, который размещен в однородной идеальной жидкости. При этом, на внутреннюю и внешнюю поверхности преобразователя симметрично нанесены две пары электродов, а выходные напряжения (1) определялись для следующих углов раскрытия указанных электродов:

$$2|\gamma_{os}| = 2\pi; 2|\gamma'_{os}| = 0;$$

$$2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \pi;$$

$$2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \frac{2\pi}{3};$$

$$2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{2};$$

$$2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{3};$$

$$2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{6};$$

$$2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{8};$$

Текущий угол φ_s изменялся в пределах $\varphi_s \in [0; 2\pi]$. Предполагалось, что каждая пара электродов нагружена на свою отдельную электрическую нагрузку $Z_H^{sm} = \frac{Z^{sm}}{Z_0} = 1000$, представляющую собой активное сопротивление, приведенное к единице длины преобразователя. Угол падения плоской волны α , выбирался как $\alpha = 0^\circ$. Протяженность кабельной линии “электрод-нагрузка” – не учитывалась.

Рассмотрение количества собственных форм колебаний $n = 0; 1; 2; 3; 4$, обуславливает исследования в частотном диапазоне - не менее чем от 2 кГц до 40 кГц, что составляет, соответственно, диапазон волновых размеров преобразователя $ka = (0.5 - 10.0)$. При этом, значения собственных частот резонансов форм колебаний составляли: для нулевой моды $f_0 = 8,2$ кГц, для первой и второй $f_{01} = 11,65$ кГц и $f_{02} = 18,8$ кГц соответственно, для третьей $f_{03} = 27,25$ кГц и четвертой $f_{04} = 35,6$ кГц.

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, при определении выходных электрических напряжений, учитывая эту крайнюю особенность, значения амплитуд и фаз напряжений выбиралась в окрестности центра электрода. Число членов ряда Фурье составило при этом ± 300 , что обеспечило равномерность расчетных данных для области в окрестности центра электрода $\pm 30^\circ$ – не хуже 0,5%.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости от частоты фаз $\Psi_{E\Sigma}^0$ и нормированных значений амплитуд A_Σ электрических напряжений для фронтальных и тыльных (по отношению к направлению прихода плоской звуковой волны, $m = 1; 2$) электродов преобразователя в условиях симметричного электрического нагружения (рис.1, рис.2) для оговоренной полосы частот и волновых размеров. Все величины давлений, при этом, нормированы единичной амплитудой давления в падающей плоской волне.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости от частоты фаз $\Psi_{E\Sigma}^0$ и нормированных значений амплитуд A_Σ электрических напряжений для фронтальных и тыльных (по отношению к направлению прихода плоской звуковой волны, $m = 1; 2$) электродов преобразователя в условиях симметричного электрического нагружения (рис.1, рис.2) для оговоренной полосы частот и волновых размеров. Все величины давлений, при этом, нормированы единичной амплитудой давления в падающей плоской волне.

Анализ основных результатов

Рассматривая коэффициенты разложений функций включения $f_{sm}(\varphi_s)$ [6] и используя ре-

зультаты работ [3;4], можно прогнозировать величину выходного сигнала для каждого конкретного вида электродирования для указанного внешнего воздействия и фиксированной частоты. Так, распределенное по поверхности преобразователя полное акустическое поле p_{Σ} образует во фронтальной ($\varphi_s = 180^0$) и тыльной ($\varphi_s = 0^0$) области преобразователя области относительных градиентов давления. В случае значений $ka \in (3.0 - 10.0)$ градиенты давления наблюдаются также и в траверзных ($\varphi_s = 90^0$) направлениях. При расчетах получены результаты, показывающие весьма существенные амплитудные отличия акустического давления в указанных областях преобразователя. Такая дифракционно-интерференционная картина определяет воздействие на преобразователь в пределах каждого из электродов некоторого распределенного давления, вызывающего разные электрические напряжения на нагрузках различно ориентированных электродов. Очевидно, что чем большее количество электродов используется, тем точнее изменения электрических напряжений от электрода к электроду передают картину распределения внешнего воздействия. Полезным представляется при этом и обогащение модовой структуры выходных электрических сигналов. Тем не менее, значительное увеличение числа электродов в силу неизбежного уменьшения их площадей, а, следовательно, и электрического тока в цепях их нагрузок, приводит к снижению общей эффективности работы преобразователя.

Таким образом, дифракционные эффекты обуславливают необходимость учета полученных значений давлений при использовании функций включения соответствующего электрода. Действительно, АЧХ выходных электрических напряжений показывает существенные (до 10 – 15 %) отличия в амплитудах напряжений для частот из областей резонансов собственных форм колебаний преобразователя. В основном, проявляется это для форм высших порядков. Иллюстрируют указанную ситуацию АЧХ И ФЧХ для фронтальных и тыльных областей преобразователя (см. частотные области в окрестностях $f_{00}, f_{01}, f_{02}, f_{03}, f_{04}$ для нулевой, первой, второй, третьей и четвертой мод рис.1 и рис.2). Объяснением этому может служить то, что интерференция мод высших порядков, с учетом связанности колебаний в большей степени зависима от углового распределения фаз перемещений точек поверхности, чем интерференция низших мод. При этом, общий характер

углового распределения перемещений, в свою очередь, зависит от амплитудно-фазовых распределений акустического поля.

Особого внимания заслуживает сам модовый состав результирующего напряжения. Так, по результатам [6;8], полное электродирование определяет выходное напряжение, как формируемое только нулевой модой, а половинное электродирование ($2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \pi$) – нулевой и всеми нечетными модами (рис.1 а.). Изменяя вид покрытия, заметим, что электрод с раскрывом $2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \frac{2\pi}{3}$ - исключает третью, шестую, девятую и т.д.; а раскрыв $2|\gamma_{os}| =$

$2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{2}$ - четвертую, восьмую, двенадцатую и т.д. моды (рис.1 б), в).). При этом, выходное напряжение в рассмотренном диапазоне частот для углов раскрыва $2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{3}$; $2|\gamma_{os}| =$

$2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{6}$; $2|\gamma_{os}| = 2\pi$; $2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{8}$ (рис.1 г), д), е).

соответственно) определяется наличием всех мод $m = 0; 1; 2; 3; \dots$. Модовые составляющие возрастают по амплитуде с ростом номера моды. При этом, с точки зрения максимизации амплитуды, каждой модовой составляющей соответствует оптимальный раскрыв электрода. Так, оптимальным углом раскрыва для нулевой моды является угол 360^0 , первой - 180^0 , второй - 90^0 , третьей - 60^0 , четвертой - 45^0 .

Известно, что кривые ФЧХ в областях далеких от резонансов имеют малую неравномерность. В областях резонансов соответствующих форм неравномерность ФЧХ увеличивается вследствие учета реактивных составляющих импеданса преобразователя, которые быстро и многократно изменяются по характеру и величине. Иллюстрируют эту ситуацию ФЧХ, приведенные на рис.2. Так, кривые 2;3;4 рис.2 а). показывают практически монотонное изменения фазы в областях резонансов четных мод для электродирования вида $2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}| = \pi$ и в области четвертой моды для покрытия $2|\gamma_{os}| =$

$2|\gamma'_{os}| = \frac{\pi}{2}$. При этом, в частотных областях резонансов существующих форм наблюдаются существенные осцилляции фазы. Это справедливо как для фронтальной (рис.2 а.) так и для тыльной (рис.2 б.) областей. При этом, больший диапазон изменения ФЧХ свойственен высшим модам.

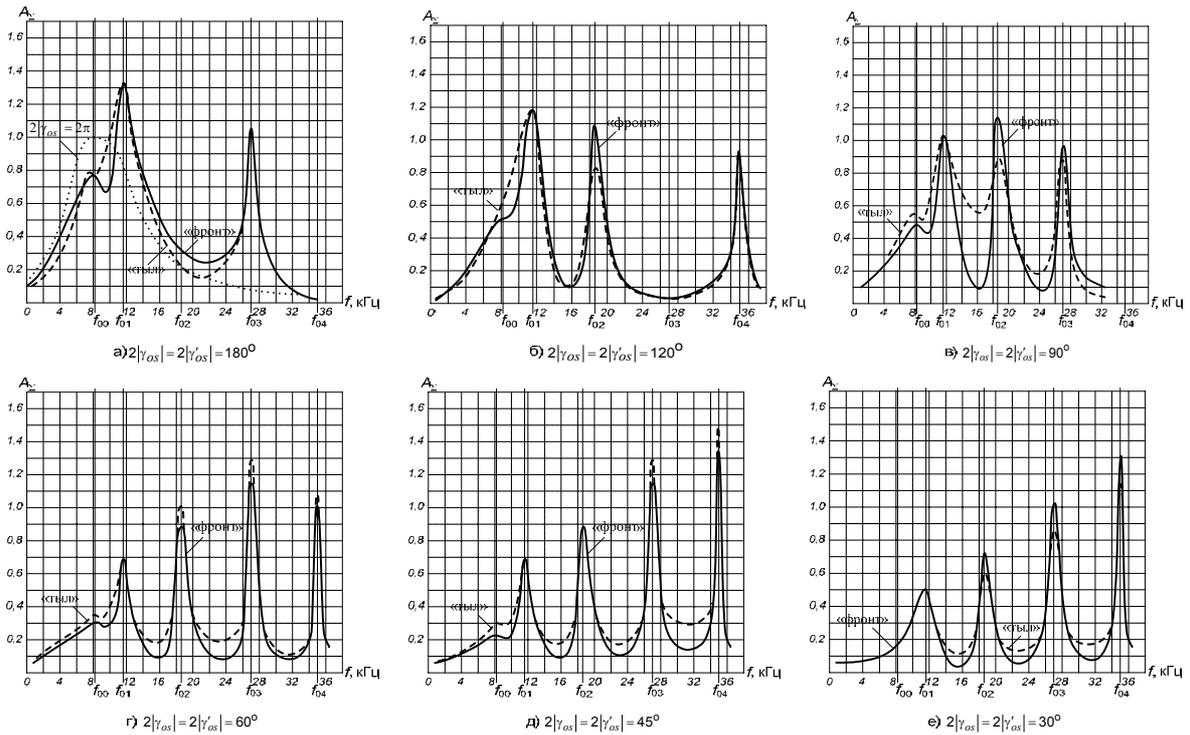


Рис. 1. Нормированные АЧХ суммарных электрических напряжений при различных углах раскрыва электродов $2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}|$

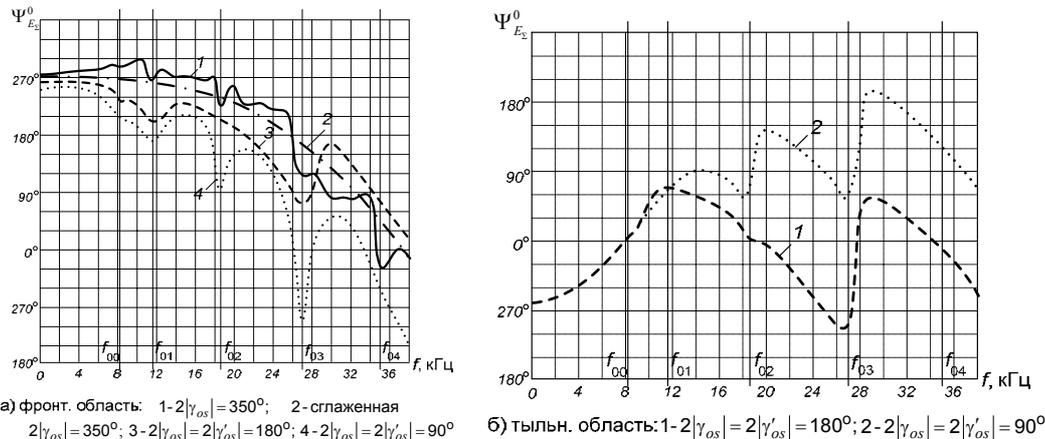


Рис. 2. ФЧХ суммарных электрических напряжений при различных углах раскрыва электродов $2|\gamma_{os}| = 2|\gamma'_{os}|$

Такое увеличение объясняется большим количеством противофазных участков и большими амплитудами изгибных колебаний поверхности оболочки [4] на высших модах, чем на низших. В области нижних частот ФЧХ показывают сфазированность электрических напряжений независимо от вида электродирования.

Выводы

В результате проведенных расчетов и оценок:
 – определено, что рассмотренные виды электродирования поверхности преобразователя обуславливают изменчивость модового состава выходного напряжения как по числу мод, так и по амплитудам модовых составляющих;

– в виде АЧХ показаны ситуации оптимизации раскрывов электрода относительно амплитудных вкладов соответствующих мод;
 – с помощью ФЧХ подтверждены ситуации исключения и существования модовых составляющих в результирующем выходном напряжении в зависимости от вида электродирования, а также показана динамика изменения фазы с ростом номера моды;

– определены относительные значения амплитуд и фаз электрических напряжений на нагрузках фронтальных и тыльных электродов для каждого из типовых видов электродирования поверхности преобразователя.

Литература

1. *Дідковський В.С.* Лейко А.Г Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі. –Кіровоград : Імекс - ЛТД, 2006.-448 с.
2. *Коржик О.В.,* Лейко О.Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наукові вісті НТУУ «КПІ».-2001.-№4.- С.106-114.
3. *Коржик О.В.* Применение метода “сквозной задачи” к исследованию амплитудно –частотных зависимостей характеристик акустического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами // Электроника и связь. -2010, -№3,-С. 160-166.
4. *Коржик О.В.* Применение метода “сквозной задачи” к исследованию амплитудно - частотных зависимостей характеристик механического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами // Электроника и связь. -2010, -№4,-С. 155-159.
5. *Коржик А.В.,* Стасив П.П. Отклик кругового цилиндрического преобразователя на возбуждения его плоской звуковой волной // Судостроит промышленность. Сер. Акустика.-1991-Вып.9.-С.27-29.
6. *Коржик О.В.*Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами // Электроника и связь.-2010, -№2,-С. 224-230.
7. *Механика* связанных полей в элементах конструкций. Т.5. Электроупругость. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. – К.: Наук. думка, 1989. – 280 с.
8. *Аронов Б.С.* Электро-механические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. -Л.:Энергоатомиздат,1990.-271 с.