

УДК 534.3

А.В. Коржик, канд. техн. наук

Применение метода «сквозной задачи» к исследованию механических характеристик приемного пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами

С использованием метода «сквозной задачи» рассмотрены амплитудные и фазовые зависимости от частоты семейства модовых составляющих механических характеристик приемного цилиндрического кругового электроупругого преобразователя с разрезными электродами в условиях симметричного электрического нагружения. Рассчитаны и описаны образованные распределения нормальных составляющих и полных перемещений точек поверхности одиночного преобразователя с учетом связанности колебаний при падении на него плоской волны единичной амплитуды.

In a boundaries of hydro - electroelastics tasks the AFCh for mechanic fields of piezoelectric cylindrical transducer - reciver with disconnect electrodes are calculated and described. The solution are obtained for symmetrical electrical conditions. The full field, modes structure and modes AFCh and FFCh of mechanic fields is detected and described.

Введение

В задачах современной акустики вопросы исследования состояния поверхностей пьезокерамических преобразователей, контактирующих с упругими идеальными средами, вызывают значительный интерес. Как отмечалось в работах [1-4], это вызвано тем, что условность задания граничных условий на поверхности приемных акустических цилиндрических преобразователей не позволяет в полной мере представить процесс формирования механических и, соответственно, электрических полей преобразователей.

Предлагаемая работа представляет собой, в известной мере, продолжение работы [1] и содержит результаты исследований составляющих механических полей пьезокерамического кругового цилиндрического преобразователя с разрезными электродами при воздействии на его поверхность суперпозиции поля падающей звуковой волны единичной амплитуды и поля, рассеянного на преобразователе.

Целью работы является определение АЧХ и ФЧХ нормальных составляющих перемещений точек поверхности одиночного пьезокерамиче-

ского преобразователя, электродированного парой одинаковых электродов в условиях их симметричного электрического нагружения, а также угловых распределений перемещений по поверхности преобразователя. Определения указанных характеристик ведется с помощью метода «сквозной задачи», для которого электрические параметры в нагрузке находятся по заданной амплитуде давления в акустическом поле с учетом связанности форм колебаний преобразователя.

Постановка и решение задачи

Для оценки механических полей преобразователя привлечены геометрия и постановка задачи, приведенные в работах [3;4]. В соответствии с основными положениями указанных работ в части используемых моделей среды и преобразователя, вида электродирования, а также результатами работ [5; 6], определению подлежат: нормальная (W_Σ), тангенциальная (V_Σ) составляющие перемещений точек поверхности тонкой оболочки, а также полные перемещения S_Σ . Нормальная составляющая перемещений W_Σ в условиях идеально сжимаемой среды и стационарности задачи представляется наиболее удобным параметром, связывающим акустическое полное поле p_Σ и механическое поле.

При этом, исследуется: - модовый состав и частотные зависимости амплитуд W_n и фаз Ψ_{Wn} некоторых форм поля перемещений точек поверхности одиночного преобразователя; - нормальные составляющие (компоненты) поля перемещений W_Σ и их распределение по поверхности преобразователя $W_\Sigma(\varphi_s)$.

-угловые распределения по поверхности преобразователя нормированных значений амплитуд S_Σ и фаз $\Psi_{S\Sigma}$ полных перемещений.

В рамках указанных постановок и способа решения «сквозной задачи» приема [2;4], рассматриваются результаты решения уравнения Гельмгольца относительно потенциала звукового поля $\Phi = \Phi_\Sigma$ для одиночного цилиндрического бесконечного по длине пьезокерамического

преобразователя ($s=1$), представленного, основываясь на гипотезах Кирхгофа – Лява, тонкостенной электродированной оболочкой, которая вакуумирована внутри. Преобразователь помещен в водную среду с плотностью ρ_0 и скоростью звука c_0 .

При этом предполагается, что внешнее воздействие в виде плоской волны определяет своеобразное угловое распределение возмущений со стороны среды $\rho_\Sigma(\varphi_s)$, которое учитывается путем использования условий сопряжения на поверхности преобразователя

$$\frac{\partial W_\Sigma}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial r_s} = v_{rsob} = \frac{1}{i\omega\rho_0} \left. \frac{\partial \rho_\Sigma(r_s; \varphi_s)}{\partial r_s} \right|_{r_s=r_{0s}} \quad (1)$$

для s -ой ($s=1$) оболочки радиуса r_{0s} , текущего угла φ_s и электрических граничных условий по току I_n^s и напряжению U_n^s . В соответствии с положениями работ [1 - 6] задача сводится к отысканию неизвестных коэффициентов разложения $A_n^{(s)}$ для акустических полей, а также коэффициентов $W_n^{(s)}$ и $V_n^{(s)}$ для нормальных и тангенциальных составляющих перемещений точек поверхности одиночного преобразователя.

После отыскания неизвестных коэффициентов разложения полей $A_n^{(s)}$, $W_n^{(s)}$ и $V_n^{(s)}$ для одиночного преобразователя, определяются амплитуды и фазы нормальных и тангенциальных составляющих перемещений точек поверхности рассматриваемой s -ой оболочки радиуса r_{0s} :

$$\begin{cases} W_\Sigma = \sum_{n=-l}^{\infty} W_n^{(s)} e^{in\varphi} \\ V_\Sigma = \sum_{n=-l}^{\infty} V_n^{(s)} e^{in\varphi} \end{cases}, \quad (2)$$

а также рассчитываются полные перемещения S_Σ как результат векторного суммирования W_Σ и V_Σ .

Условия проведения расчетов и основные результаты

Условия проведения расчетов и исходные данные задачи в части геометрических размеров, пьезоматериала, диапазона частот, волновых размеров, угла падения плоской звуковой волны, вида электродирования, условий электрического нагружения и порядка усечения членов бесконечных рядов соответствуют приве-

денным в работе [1]. Протяженность кабельной линии “электрод-нагрузка” – не учитывалась.

В результате проведенных расчетов были получены нормированные АЧХ и ФЧХ модовых составляющих радиальной компоненты поля перемещений ($W_n(f)$ и $\Psi_{Wn}(f)$), соответственно, рис.1 и рис.2), АЧХ нормированных значений суммарных радиальных перемещений $W_\Sigma(f)$ (рис.3), а также диаграммы нормированных значений угловых распределений амплитуд $W_\Sigma(\varphi_s)$, $S_\Sigma(\varphi_s)$ (рис.4 и рис. 5) и фаз $\Psi_{W\Sigma}(\varphi_s)$ (рис. 6) в оговоренной полосе частот и волновых размеров.

Нормировка указанных характеристик в отличие от нормирования величин звукового давления [1] проводилась по-иному. Так, все величины давлений нормированы относительно единичной амплитуды давления в падающей плоской волне, а перемещения нормируются величиной $S_0 = 0.814 \cdot 10^{-11}$ м, что соответствует величине гидростатического обжатия покоящейся оболочки.

Анализ основных результатов

Как отмечено выше [1], угловые зависимости амплитуд $\rho_\Sigma(\varphi_s)$ и фаз $\Psi_{\rho\Sigma}(\varphi_s)$ давлений полного поля, очевидно, определяют характер колебаний поверхности в рассматриваемой полосе частот. Так, взаимная относительная противофазность давлений $\rho_\Sigma(\varphi_s)$ на поверхности оболочки во фронтальных и траверзных направлениях φ_s , очевидно, может приводить к неодинаковым перемещениям этих участков. При этом, поведение оболочки на частотах, отличных от частот резонансов ее собственных форм, как абсолютно жесткого рассеивателя, а на частотах резонансов – как упругого, соответствует ситуации непрерывного изменения импеданса преобразователя с изменением частоты. Заметим, также, что в силу отличий плотностей и скоростей звука в среде и в материале оболочки, наш преобразователь будет иметь скорость колебаний точек поверхности v_{rsob} , отстающую по фазе от скоростей движения частиц среды [7;8].

Рассмотрим результаты расчетов характеристик механического поля в виде АЧХ И ФЧХ радиальной компоненты перемещений ($W_n(f)$ и $\Psi_{Wn}(f)$) для каждой из рассматриваемых форм $n = 0;1;2;3;4$ колебаний, а также АЧХ суммарных значений $W_\Sigma(f)$ и ее угловые распределения $W_\Sigma(\varphi_s)$ (рис.1 – рис.4).

Так, для рис. 1, величины амплитуд составляющих $\frac{W_n}{S_0}$ показывают величину относительного прогиба оболочки при работе на соответствующей форме. Как видно, относительные амплитуды форм возрастают с ростом номера (и, соответственно, с ростом частоты). При этом для частот, не совпадающих с резонансной частотой n-ой формы, – указанные амплитуды значительно (до 20 дБ) уменьшаются, приближаясь к состоянию покоящейся оболочки с учетом гидростатического обжатия. Во всем диапазоне частот наблюдается взаимовлияние смежных и удаленных форм. Так, для высших форм оно составляет до (10-12)% и до (15 – 40)% для низших. С ростом номера формы резонансные кривые становятся уже, что соответствует возрастанию добротности форм колебаний. Примечательно, что эффективность колебаний высших форм в итоге оказывается невелика. Объясняется это тем, что с ростом номера моды, увеличивается число противофазно колеблющихся участков поверхности преобразователя, которые расположены близко друг к другу и при суммировании взаимно компенсируются. Иллюстрируют это свойство ФЧХ (рис.2), для которых начиная с частот 16 – 20 кГц фазовые кривые форм начинают сливаться, обеспечивая на высших частотах во фронтальной области оболочки практически синфазность составляющих перемещения $W_n(f)$. Осцилляции фазовой кривой в соответствующих резонансных областях говорят о неоднократном изменении характера механического импеданса преобразователя с инерционного на упругий и наоборот, а увеличение крутизны ФЧХ в них показывает увеличение добротности высших форм. При этом, в областях резонансов рассмотренных форм их фазовые отличия составляют:

- 90^0 для мод “0 - 1” и “2 - 3”;
- 180^0 для мод “1 - 2” и “3 - 4”.

Таким образом, колебания поверхности фронтальной (“звукоосвещенной”) области преобразователя на частотах из окрестности резонанса пульсирующей моды на “0”- й и “2”- й моде синфазны, на “1”- й и “3”- й, а также на “2”- й и “4”- й противофазны. С ростом же частоты для фронтальной области наблюдается нивелирование любых фазовых отличий.

Ситуацию суммирования модовых вкладов иллюстрирует АЧХ $W_\Sigma(f)$ (рис.3), повторяющая, в основном, характер радиальных перемещений определенный для мод W_n , с несколько измененными (в силу связанности) соотношениями

между амплитудами перемещений для резонансных и промежуточных областей.

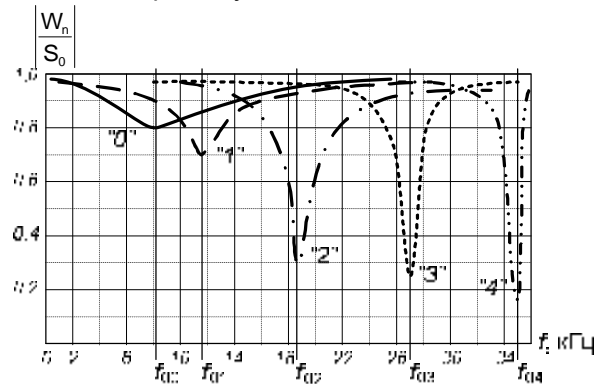


Рис.1. АЧХ нормированных значений модовых составляющих радиальной компоненты перемещений W_n (собственные формы $n=0; 1; 2; 3; 4$; об означены цифрами)

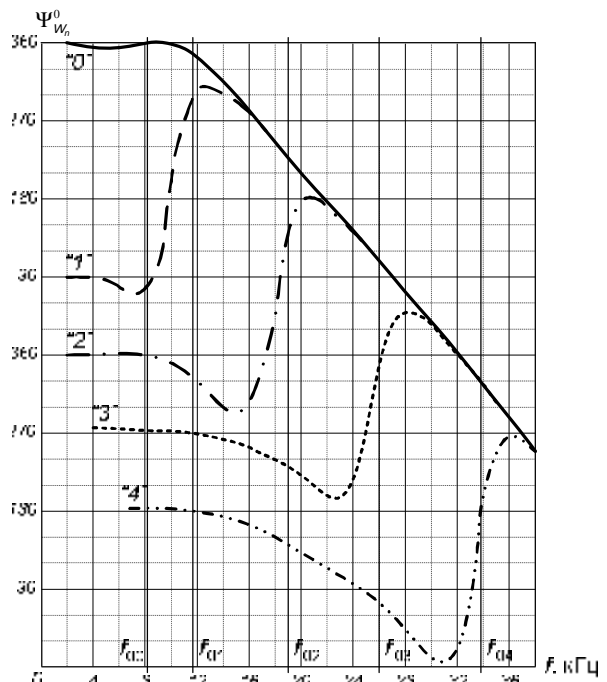


Рис. 2. ФЧХ модовых составляющих радиальной компоненты перемещений $\psi_{W_n}^0$ (собственные формы $n=0; 1; 2; 3; 4$; об означены цифрами)

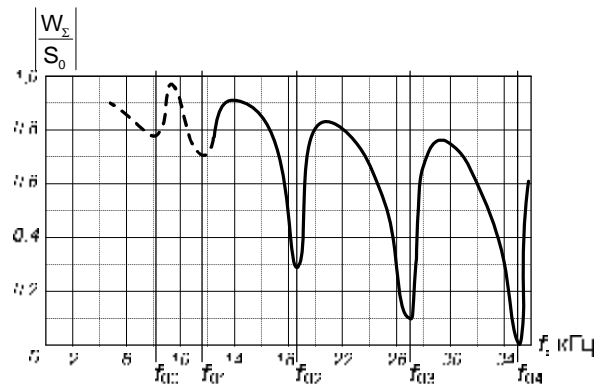


Рис. 3. АЧХ нормированных значений радиальной суммарной составляющей перемещений W_Σ

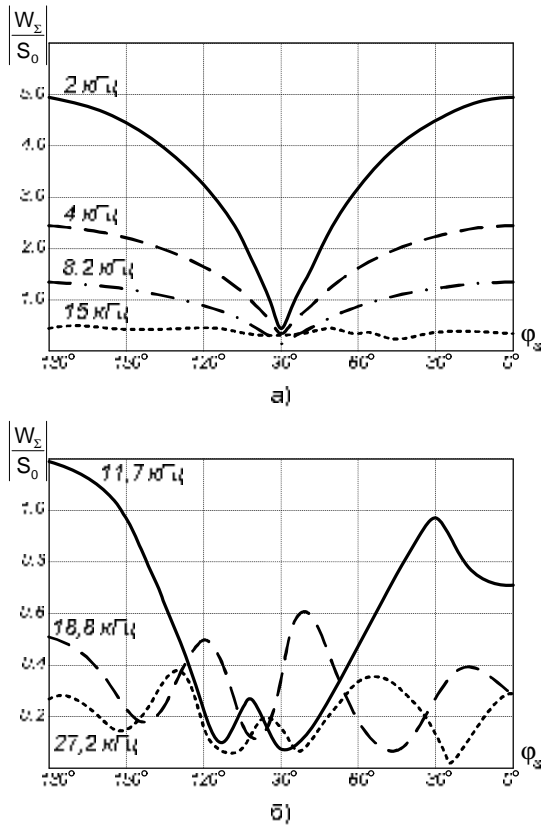


Рис. 4. Угловое распределение нормированных суммарных нормальных составляющих W_{Σ} по поверхности преобразователя

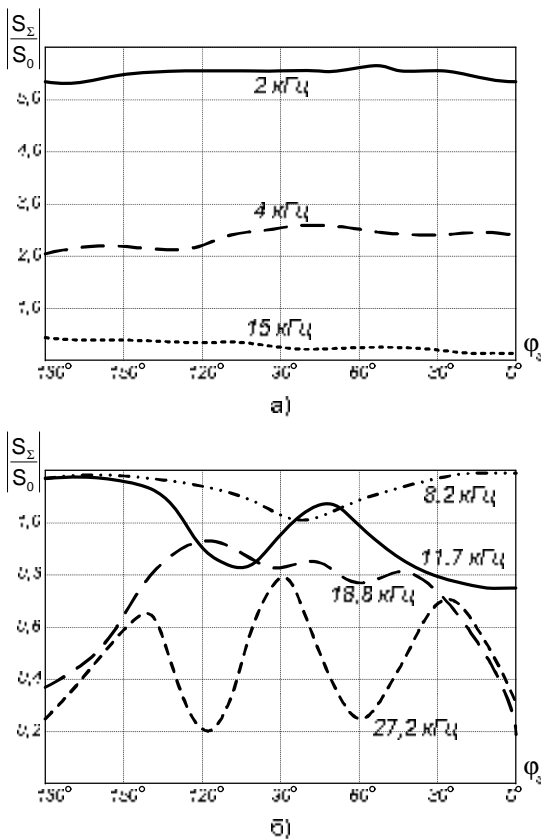


Рис. 5. Угловое распределение нормированных полных перемещений S_{Σ} по поверхности оболочки

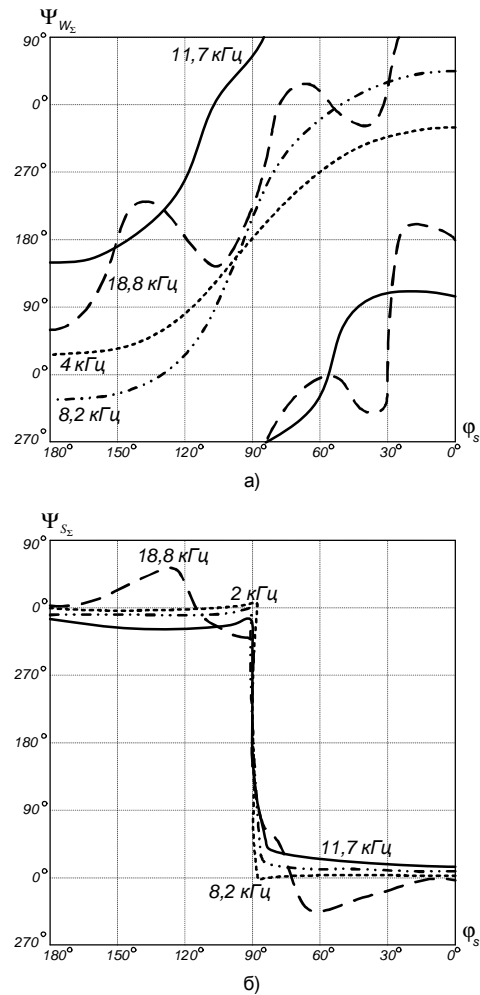


Рис. 6. Угловое распределение фаз радиальных $\Psi_{W_{\Sigma}}^0$ и полных перемещений $\Psi_{S_{\Sigma}}^0$ по поверхности преобразователя

Очевидно, более наглядными данными о характере движения поверхности преобразователя под влиянием указанного внешнего распределенного возмущения, будут угловые зависимости $W_{\Sigma}(\varphi_s)$, $S_{\Sigma}(\varphi_s)$ и $\Psi_{W_{\Sigma}}(\varphi_s)$. При этом, представляется интересным учет реального влияния тангенциальной составляющей перемещений V_{Σ} , который [11] не должен быть значителен.

Диаграммы угловых распределений амплитуд $W_{\Sigma}(\varphi_s)$ и фаз $\Psi_{S_{\Sigma}}(\varphi_s)$ нормальной компоненты перемещений (рис. 4 и рис.6 а.) показывают, что на частотах, не совпадающих с частотами резонансов рассмотренных форм (рис.4 а. кривые “2кГц”; “4кГц”; “15кГц”) максимумы перемещений наблюдаются в направлениях, совпадающих с направлением падения плоской звуковой волны ($\varphi_s = 180^0$ и $\varphi_s = 0^0$), а близкие к нулю перемещения сориентированы в направлениях, нормальных к направлению падения волны. При этом полные суммарные перемещения практически равномерно распределены по по-

верхности преобразователя (кривые 1,2,5 рис.5 а).), а фазы перемещений $\Psi_{\Sigma}(\varphi_s)$ (рис. 6 а).) противоположных участков поверхности отличны на 180° (с учетом направления нормальных составляющих $W_{\Sigma}(\varphi_s)$ в диаметрально противоположных точках поверхности оболочки. Очевидно, это говорит о преобладании осциллирующих колебаний преобразователя. Отметим, что для частоты $f=15$ кГц, поверхность преобразователя деформирована незначительно и равномерно, но фазы на близких к траверзным направлениям противоположных участках поверхности уже не сдвинуты на 180° , что говорит о поведении оболочки как жесткого объекта при снижении роли осциллирующих движений.

С ростом частоты f для значений $f \neq f_{00}; f_{01}; f_{02}; f_{03}$ прогибы поверхности смещаются к центру оболочки, а их относительная величина увеличивается (кривые "2"; "3"; "4" на рис.5 а).). При этом усложняется характер фазовых распределений (кривые "11.7кГц"; "18.8кГц", рис.6а).), увеличиваются вклады соответствующих изгибных форм и, как следствие, возникают области относительных знакопеременных прогибов в траверзных направлениях с относительно противоположными знаками (рис. 5 б)., рис 6). Заметим, что во фронтальных и тыльных областях преобразователя тангенциальная компонента V_{Σ} мала и практически не оказывает никакого влияния на характер движения поверхности.

Выводы

Таким образом, в результате выполненных расчетов, построений и проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Модовая структура нормальных составляющих перемещений включает весь набор форм, амплитуды которых увеличиваются с ростом номера. При этом, существенная (до 10-40 %) связанность колебаний смежных форм говорит об их взаимовлиянии, что наиболее существенно проявляется в области нижних частот для форм колебаний $n = 0; 1; 2$.

2. Для фронтальной области преобразователя при увеличении частоты, снижении вкладов низших форм колебаний и возрастании вкладов высших форм, фазы модовых составляющих нормальной компоненты перемещений точек поверхности оболочки $\Psi_{Wn}(f)$ сливаются, что говорит о колебаниях пульсирующего характера, но с потерей их общей эффективности за счет взаимной компенсации относительных противоположных по знаку прогибов.

3. В рассмотренном диапазоне частот характер перемещений точек поверхности преобразователя меняется с изменением частоты - от тако-

го, который свойственен жестким объектам (для частот, отличных от частот резонансов собственных форм колебаний), до упругого (при совпадении с частотами, близкими к частотам резонансов собственных форм). При этом в области нижних частот преобладают осциллирующие колебания, а в области верхних их роль снижается.

Изменение характера движения поверхности преобразователя определяется эффектами связанности колебаний и непрерывным изменением характера механического импеданса преобразователя при переходе из нерезонансных областей в резонансные и наоборот, во всем рассмотренном диапазоне частот.

Литература

1. Коржик А.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.
2. Дідковський В.С. Лейко А.Г Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі. - Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2006.-448 с.
3. 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.
4. Коржик О.В. Солтановський Ю.О Излучение звуковых волн секционированным цилиндрическим пьезопреобразователем, подключенным к длинной линии// Электроника и связь.-2009, -№6,-С.54-59.
5. Коржик О.В., Лейко О.Г. До питання дифракції плоскої акустичної хвилі на електропружному циліндричному прийомному перетворювачі // Наукові вісті НТУУ «КПІ». -2004.-№6.- С.83-89.
6. Коржик О.В. Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами // Электроника и связь.-2010, -№2,-С. 224–230.
7. Гринченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основи акустики.-К.: Наукова думка, 2007, – 640с.
8. Исакович М.А. Общая акустика. -М.: Наука, 1973, – 496 с.
9. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики, - Л.:Судостроение, 1972. -352 с.
10. Faran I. Sound Scattering by Solid Cylinder and Sphere// JASA, 1951, V. 23, №4, P. 63 -71.
11. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Бабаев А.Э. Гидроупругость систем оболочек, - К.: Вища школа, 1984. – 208 с.