

УДК 534.233.4

Ю.Ю. Балковская, аспирант

Черкасский государственный технологический университет

E-mail: cheti@cheti.cherkassy.ua

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ АЧХ СИММЕТРИЧНЫХ БИМОРФНЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Рассмотрен метод линеаризации амплитудно–частотной характеристики (АЧХ) симметричных биморфных пьезокерамических преобразователей.

Как известно, пьезокерамические преобразователи (ПП) обладают рядом достоинств, однако рабочий частотный диапазон их относительно невелик. Кроме того, погрешность измерения, обусловленная нестабильностью пьезоэлектрических характеристик материала преобразователя, сравнительно велика. В связи с этим возникает необходимость линеаризации амплитудно–частотной характеристики преобразователей подобного типа с целью улучшения указанных выше характеристик. Ряд методов такой линеаризации разработан авторами: предложено вводить в цепь обратной связи преобразователя корректирующий элемент с частотной и фазовой характеристиками, эквивалентными соответствующим характеристикам пьезоэлемента, используемого в качестве чувствительного элемента и включенного на входе усилителя. В качестве такого элемента используется пьезоэлектрический трансформатор, изготовленный из пьезоэлемента из материала и с размерами такими же, как и у пьезоэлемента – сенсора. Однако в этом случае необходим подбор их резонансных частот и емкостей электродов.

Кроме того, линеаризация АЧХ пьезокерамического преобразователя, включенного в цепь отрицательной обратной связи (ООС) согласующего усилителя, осуществляется благодаря включению последовательно с ПП пассивных элементов, в частности, резисторов, что приводит к снижению добротности ПП до уровня $Q < 0,7$ и линеаризации АЧХ.

В технике достаточно широко применяются так называемые симметричные биморфные пьезокерамические преобразователи. Эти преобразователи представляют соединенные между собой жестко с помощью клея или низкотемпературного припоя два пьезоэлемента. Известны две схемы соединения пьезоэлементов:

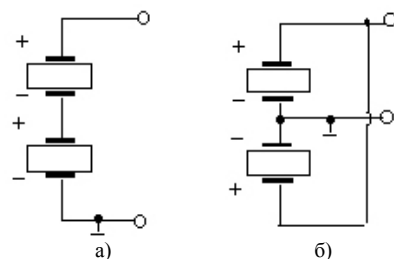


Рисунок 1 – Схемы соединения пьезоэлементов в симметричном биморфном преобразователе: а) последовательная; б) параллельная

последовательная и параллельная, показанные на рисунках 1,а и 1,б соответственно.

Традиционно эти преобразователи изготавливаются из пластин одинаковых размеров и, что очень важно, одинаковой толщины. Это обеспечивает максимальную чувствительность. Следует, однако, отметить, что при одинаковых размерах пьезоэлементов чувствительность преобразователя по параллельной схеме и его собственное сопротивление в четыре раза меньше соответствующих характеристик преобразователя по последовательной схеме.

Задача ставится следующим образом: необходимо разработать симметричный биморфный преобразователь, АЧХ которого линейна в широком

диапазоне частот. Подобный преобразователь разработан авторами.

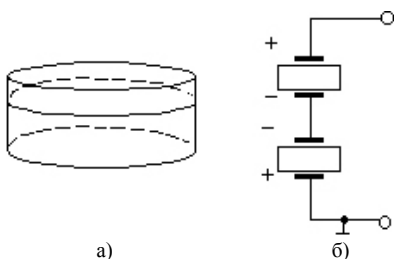


Рисунок 2 – Пьезокерамический преобразователь: а) конструкция; б) электрическая схема

Конструкция преобразователя и его электрическая схема показаны на рисунках 2,а и 2,б соответственно. Как видно из рисунка 2, используется последовательная схема соединения пьезоэлементов, однако пьезоэлементы включены встречно, кроме того, толщина одного из пьезоэлементов меньше толщины второго.

Для последовательной схемы и встречного включения при равенстве чувствительностей отдельных элементов суммарная (общая) чувствительность биморфного преобразователя равна нулю. Если же толщины пьезоэлементов не равны, не равны их чувствительности, тогда чувствительность биморфного преобразователя будет равна разности чувствительностей отдельных элементов, причем АЧХ такого преобразователя оказывается линейной в широком диапазоне частот.

Уравнение изгибных колебаний пьезокерамической пластины относительно функции прогиба серединной (нейтральной) поверхности имеет вид

$$\nabla^2 \nabla^2 W + \frac{\rho h}{D} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \frac{q}{D}, \quad (1)$$

где $\tilde{D} = \frac{h^3}{12 \cdot S_{11}^E \cdot (1 - \tilde{\nu}^2)} \cdot \left(1 + \frac{1 + \nu}{8} \cdot \frac{K_p^2}{1 - K_p^2} \right)$ - жесткость при цилиндрическом

изгибе пьезокерамической пластины; $\tilde{v} = \frac{v + \frac{1+v}{8} \cdot \frac{K_p^2}{1-K_p^2}}{1 + \frac{1+v}{8} \cdot \frac{K_p^2}{1-K_p^2}}$ - приведенный

коэффициент Пуассона; $K_p^2 = \frac{2}{1-v} \cdot \frac{d_{31}^2}{S_{11}^E \epsilon_{33}^T}$ - статический планарный коэффициент электромеханической связи (КЭМС); q - поперечная распределенная нагрузка; $W(x, y, z)$ - функция погиба; h - толщина пластин; ρ - плотность материала пластин.

Решение уравнения (1) для холостого хода применительно к биморфной круглой пластине имеет вид:

$$U_{PA3} = \frac{1}{2} \cdot \pi \beta^2 \tilde{D} \cdot [(\beta a)^2 \cdot \{ (AJ_0(\beta \cdot a) - BI_0(\beta \cdot a))^2 + (AJ_1(\beta \cdot a) - BI_1(\beta \cdot a))^2 \}]$$

где: U_{PA3} - энергия, запасенная в пластине при изгибах в случае разомкнутых электродов;

$\beta = 4 \sqrt{\frac{\rho \omega^2 h}{\tilde{D}}}$ - коэффициент, введенный для упрощения расчетов; $a = r$ - радиус биморфных пластин;

$$A = -\frac{h^2}{4} \cdot \frac{d_{31} \cdot a}{S_{11}^E (1-v)} \cdot \frac{1}{\beta \cdot \tilde{D}} \cdot \left(\frac{V_0}{h} \right) \cdot \frac{I_1(\beta \cdot a)}{\Delta} \quad \text{и} \quad B = -A \cdot \frac{J_1(\beta \cdot a)}{I_1(\beta \cdot a)} - \text{постоянные,}$$

причем $J_1(z) = -\frac{dJ_0}{dz}$; $I_1(z) = \frac{dI_0}{dz}$; а $J_0(\beta r)$ и $I_0(\beta r)$ - функции Бесселя.

Тогда выражение для эффективного КЭМС K_D^2 приобретет вид:

$$K_D^2 = \frac{12 \frac{\tilde{v}-v}{1-v} (AJ_1(\beta a) - BI_1(\beta a))^2}{(\beta a)^2 \left[(AJ_0(\beta a) - BI_0(\beta a))^2 + (AJ_1(\beta a)^2 - BI_1(\beta a))^2 \right] - 2(1-\tilde{v}) \cdot (AJ_1(\beta a) - BI_1(\beta a))^2 + 12 \frac{\tilde{v}-v}{1-v} (AJ_1(\beta a) - BI_1(\beta a))^2}$$

Для состава пьезокерамики ЦТС-19 имеем значения: $v = 0,33$; $K_p^2 = (0,58)^2 = 0,34$.

Чтобы сравнить значение эффективного КЭМС для изгибных (неоднородных) деформаций со значением статического планарного КЭМС K_p^2 необходимо перейти от колебаний к статическим деформациям, т.е. рассмотреть K_D^2 , когда частота колебаний стремится к нулю. Тогда

$$\lim_{\beta \cdot a \rightarrow 0} K_D^2 = 0,252 \approx \frac{3}{4} K_p^2.$$

Этот результат хорошо согласуется с теоретическим значением КЭМС для неоднородной деформации биморфного элемента:

$$K^2 = \frac{U_{PA3} - U_{K3}}{U_{PA3}} = \frac{3}{4} K_p^2 = 0,255.$$

Для пьезокерамики ЦТС-19 значение постоянных соответственно равны

$$S_{11}^E = 12,3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}^2}{\text{Н}}; \quad \varepsilon_{33}^T = 1300 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}},$$

$$d_{31} = -5,2 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Тогда после численного поиска первых трех значений ω_a и ω_r , которые соответствуют корням уравнений антирезонанса и резонанса (первым трем основным модам колебаний), при изменении $\beta \cdot a$ с шагом 0,1 на промежутке $[0, 10]$, найдены соответствующие значения $K_{Д}^2$ по формуле Мэзона: $K_{Д1}^2 = 0,23$, $K_{Д2}^2 = 0,12$, $K_{Д3}^2 = 0,06$.

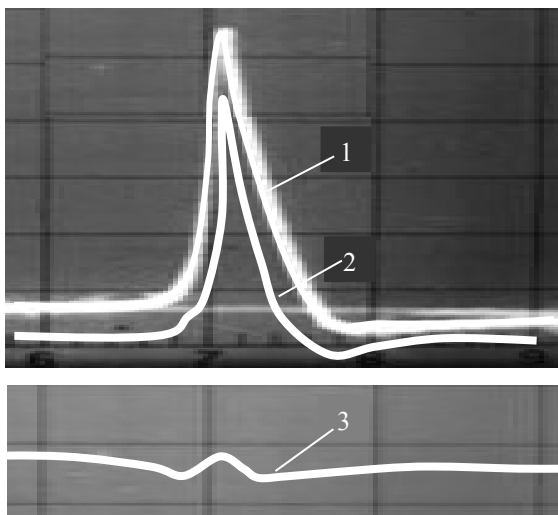


Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики:

- 1 – пьезоэлемента толщиной 0,3мм;
- 2 – пьезоэлемента толщиной 0,8мм;
- 3 – биморфного преобразователя

На рисунке 3 показаны результаты измерения АЧХ биморфного преобразователя, состоящего из двух пьезоэлементов из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 30 и толщиной 0,3 и 0,8 мм соответственно.

Как видно из рисунка 3, АЧХ предлагаемого биморфного преобразователя линейна. Перспективой дальнейших исследований в данной области является использование преобразователей такого типа в измерительных приборах.