

Безразмерная величина $N = \frac{U_{\text{фп}}}{U_{\text{фпэ}}} = k \cdot \tau_{\text{ок}}$ является функцией

контролируемого параметра:

$$N = f(\tau_{\text{ок}}). \quad (7)$$

Используя соответствующие масштабные коэффициенты, можно построить требуемую градуировочную характеристику.

Полученные результаты исследования математических моделей ОЭП показывают, что при конструировании приборов оптического контроля физико-технических параметров сред предпочтение следует отдавать одноканальным ОЭП с эталоном в измерительном канале, так как они обеспечивают наибольшую точность в сочетании с простой структурой, присущей одноканальным ОЭП.

ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМЫЕ СОСТАВНЫЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

М.М.Карпук, Ю.А.Кузавко, Б.Н.Склипус

Брестский политехнический институт

Электромеханические преобразователи преобразуют электрическую энергию в механическую и наоборот. На средних частотах (1÷100 МГц) можно пользоваться пьезоэлектрическими преобразователями. Высокая добротность Q таких преобразователей как механических резонаторов позволяет использовать их в качестве как стабилизаторов частоты электрических сигналов в генераторах, так излучателей и приемников ультразвуковых волн в измерительной технике. Но добротность даже низкодобротной пьезокерамики РКР-1 $Q=60$ оказывается еще достаточно большой для достижения коротких и сверхкоротких импульсов (длительность составляет

$\tau=QT$, где T - период акустических колебаний). Следовательно необходимо применять специальные меры для снижения добротности ультразвуковых пьезокерамических преобразователей (УЗП), заключающиеся в механическом и электрическом демпфировании и согласовании с исследуемой средой пьезоэлемента. Низкая добротность Q УЗП однозначно влечет за собой уменьшение длительности τ излучаемого сигнала и соответственно увеличение пространственного разрешения при измерениях. Теоретически известно, что δ -функция имеет бесконечный спектр, и следовательно более короткому по длительности сигналу соответствует более широкий частотный спектр. Такие широкополосные ультразвуковые излучатели и приемники находят существенное применение в задачах диагностики и измерительной техники. С другой стороны узкополосные УЗП, например, кварц, являются эталонами частоты и широко используются в различных радио-электронных устройствах.

Здесь мы рассматриваем развитие таких УЗП, существенной особенностью которых является наличие контактирующего с пьезоэлектриком (ПЭ) слоя магнитоакустического материала (МАМ). Под МАМ понимаем вещество, например, гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ или борат железа FeBO_3 , в которых экспериментально наблюдалась сильная зависимость скоростей объемных продольных (до 10%) и поперечных (до 50%) упругих волн от внешнего магнитного поля \dot{H} . Теоретические зависимости скорости звука имеют вид [1]:

$$\tilde{S}_t = S_t(1 - \zeta)^{1/2} \quad (1)$$

для поперечного звука и

$$\tilde{S}_l = S_l(1 - t\zeta)^{1/2} \quad (2)$$

для продольного звука. Здесь S_t , S_l и \tilde{S}_t , \tilde{S}_l - соответственно скорость поперечного и продольного звука, не подверженного и подверженного магнитоупругому (МУ) взаимодействию, $t = S_t^2 / S_l^2$,

$$\zeta = \frac{2H_E H_{me}}{2H_E H_{me} + H(H + H_D)} - \text{параметр МУ связи; } H_E, H_D, H_{me} -$$

эффективные внутренние поля обмена, Дзялошинского-Мория и магнито-стрикции.

Приведем также выражения для коэффициента поглощения звука в МАМ [2]

$$\alpha = \alpha_0(1 - a\zeta)^{-1/2} \quad (3)$$

где $a=1$ и $a=-1$ - соответственно для поперечного и продольного звука. С учетом затухания акустический импеданс МАМ может быть представлен в виде

$$Z = Z_a - iZ_b \quad (4)$$

где $Z_a = \rho S \frac{k^2}{k^2 + \alpha^2}$, $Z_b = \rho S \frac{\alpha k}{k^2 + \alpha^2}$, ρ - плотность, k - волновое

число. В отсутствие затухания $\alpha=0$ акустический импеданс $Z = \rho S$.

Тем самым возникает реальная возможность перестраивать полем акустоэлектронные параметры преобразователя, т.е. резонансную частоту, полосу частот и длительность излучаемого импульса, амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики (АЧХ и ФЧХ), амплитуды излучения и приема.

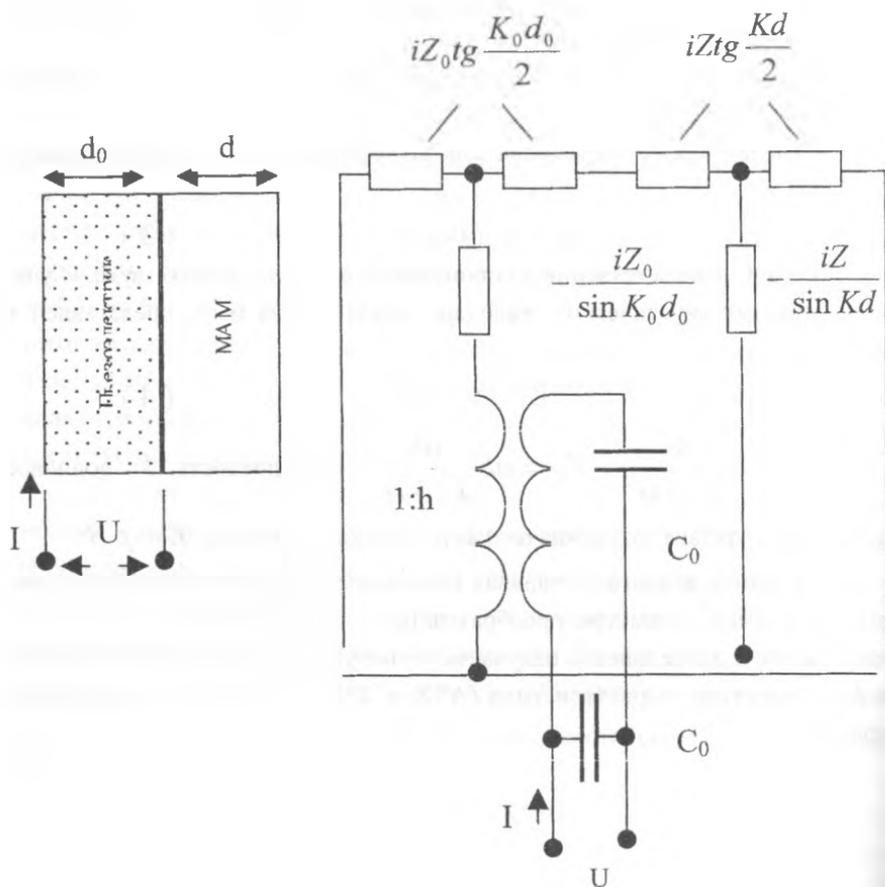


Рис.1. Конструкция УЗП. Его эквивалентная электромеханическая схема. h – коэффициент трансформации.

Конструкция рассматриваемого УЗП приведена на Рис.1, в котором пьезоэлектрический материал с нанесенными тонкими металлическими

электродами механически контактирует с МАМ. Исходя из эквивалентной электрической схемы такого УЗП, можно рассчитать его электрический импеданс

$$Z_e = \frac{1}{i\omega C_0} \left[1 - k^2 \frac{Z_0}{\beta_0} \frac{B + A(\operatorname{tg}\beta_0 - \frac{Z_b}{2Z_a})}{A^2 + B^2} + ik^2 \frac{B - A(\operatorname{tg}\beta_0 - \frac{Z_b}{2Z_a})}{A^2 + B^2} \right], \quad (5)$$

где $A = Z_a + Z_0 \operatorname{tg}\beta_0 - Z_0 \operatorname{tg}^2 \beta_0 + \frac{2Z_0 \operatorname{tg}\beta_0 - Z_b}{\sin^2 \beta_0}$,

$$B = Z_a \operatorname{tg}\beta_0 - Z_b + Z_0 - \frac{2Z_0}{\sin^2 \beta_0}, \quad \beta_0 = \frac{k_0 d_0}{2}.$$

Сумма первых двух членов в данном выражении обращается в ноль при электрическом резонансе (излучение), в то время как третий член определяет вносимое поглощение в системе под действием нагрузки и определяет конечную амплитуду резонансной кривой. Отметим, что частота ω_1 электрического резонанса всегда ниже частоты ω_0 механического резонанса (прием) и их разность $\omega_0 - \omega_1$ тем больше, чем выше значение константы электромеханической связи k .

Расчет механического резонанса выполняется следующим образом. Амплитуда упругих колебаний в такой слоистой структуре при приложении на электроды напряжения $U = U_0 e^{i\omega x}$ находится, исходя из уравнений теории упругости и электродинамики с учетом механических и электрических граничных условий.

Амплитудно-частотная характеристика УЗП запишется тогда следующим образом:

$$U_0 = \frac{\gamma U_0}{2\alpha d_0 Z_0} \frac{\left[2(1 - \cos \beta_0) - 2 \frac{Z}{Z_0} \sin \beta_0 \operatorname{tg} \beta + \frac{Z^2}{Z_0^2} \operatorname{tg}^2 \beta \right]^{1/2}}{\sin \beta_0 + \frac{Z}{Z_0} \cos \beta_0 \operatorname{tg} \beta} \quad (6)$$

Здесь U_0 - амплитуда колебаний в МАМ. γ - константа пьезоэффекта, затухание в МАМ не учтено. При учете затухания необходимо в (6) сделать формальные замены:

$$Z \rightarrow Z_a - iZ_b, \quad \beta \rightarrow kd(1 + i\alpha).$$

Так как $\beta = \frac{\omega d}{S} = \frac{S_0}{S} \frac{d}{d_0} \frac{\omega d_0}{S_0} = \frac{S_0}{S} \frac{d}{d_0} \beta_0$ и $S = S(\vec{H})$, то всегда

можно достичь значения $\beta = \beta_0$. При $\beta_0 = \pi/2$ достигается первый механический резонанс, если не учитывались потери в преобразователе. Рассмотренный УЗП может служить для возбуждения и приема как продольных, так и поперечных волн, но при этом в выражениях (5) и (6) необходима подстановка соответствующих материальных констант для продольных и поперечных волн.

Численные расчеты АЧХ и ФЧХ выполнялись нами для следующих слоистых структур: гематит с ниобатом лития, керамикой РКР-1 и кварцем при изменении магнитного поля от 2000Э до 50Э. В таких структурах перестройка резонансной частоты преобразователя может достигать 30% и 100% соответственно для генерации продольных и поперечных волн, а при определенных соотношениях толщины ПЭ и МАМ первые два УЗП способны эффективно функционировать на нескольких рабочих частотах при достаточной широкополосности принимаемых сигналов, которая может быть дополнительно увеличена с использованием демпфирующих и четвертьволновых согласующих с исследуемым объектом слоев. Так как кварц является материалом с рекордно высокой добротностью $Q > 10^5$, что обусловило его применение в генераторах для стабилизации частоты, то треть

устройство способно выполнять перестраиваемую полем стабилизацию частоты сигналов в радиоэлектронных устройствах без заметного ухудшения их добротности.

На Рис. 2 представлены АЧХ составного УЗП при различных значениях внешнего магнитного поля. Откуда видны вышеоговоренные особенности поведения УЗП и возможности его функционирования на нескольких рабочих частотах. Сделаем вывод, что слоистые структуры с МАМ, содержащие низкодобротные пьезоэлектрики, удобные в качестве широкополосных излучателей и приемников звука, в которых с помощью внешнего магнитного поля выбирается требуемый частотный диапазон при излучении и приеме. С другой стороны аналогичные структуры, содержащие высокодобротные пьезоэлектрики, весьма перспективны в качестве перестраиваемых стабилизаторов частоты в радиоэлектронных устройствах. Существующий технологический разброс в параметрах кварцевых устройств может быть устранен вследствие использования таких подстроечных магнитоакустических слоев.

1. Е.А.Туров, В.Г.Шавров. Наружная симметрия и магнитоакустические эффекты в ферро- и антиферромагнетиках // УФН. 1983, Т.140. №3. С.429-462
2. Yu. Kuzavko, H. Roth, V. Golovko. Ultrasound controlled piezoceramical transducers for medical diagnostic tomography // Proceedings of Workshop on Design Methodologies for Signal Processing. Zakopane. Poland. 1996. P.131-135.

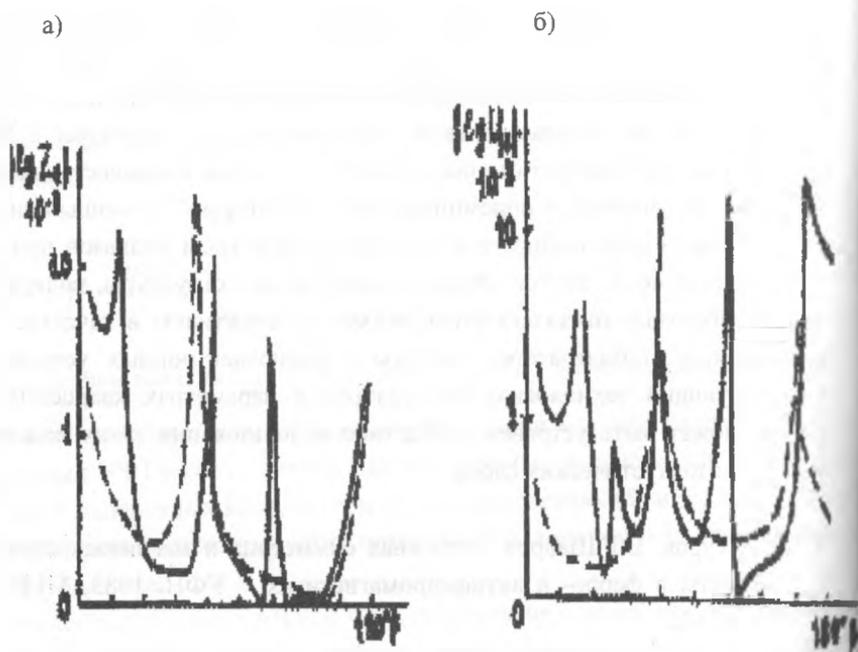


Рис. 2. АЧХ составного УЗП:
а) при излучении; б) при приеме
(--- $H=2000 \text{ Э}$, - $H=50 \text{ Э}$)