

УДК 534.232

**ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКА
ПЛАСТИНЧАТОГО ТИПА**

Грищенко Е. К.

Рассмотрена возможность использования плоского пьезоэлемента с управляемой электрической нагрузкой в качестве поглотителя ультразвука. Показано существование оптимальных частот согласования пьезоэлемента с рабочей средой для различных акустических нагрузок.

Для целей акустоэлектроники, дефектоскопии и медицинской акустики представляет интерес создание управляемых поглотителей ультразвука пластинчатого типа. Преимущества пьезоэлектрических поглотителей ультразвука по сравнению с традиционными заключаются в следующем. Во-первых, поглощение ультразвука происходит на расстояниях, сравнимых с длиной ультразвуковой волны, поэтому пьезоэлектрические поглотители ультразвука компактны. Во-вторых, звуковая энергия преобразуется пьезоэлектрическим поглотителем не в тепловую, как обычно, а в электрическую, и поэтому может быть легко отведена от поглотителя, что особенно важно при поглощении ультразвука большой интенсивности. Наконец, пьезоэлектрические поглотители ультразвука являются управляемыми, что позволяет изменять их характеристики в процессе работы.

Ранее было показано [1-3], что пластинчатый пьезоэлемент с управляемой электрической нагрузкой может быть полностью согласован с рабочей средой на частоте полуволнового резонанса.

Однако возможность согласования пьезоэлемента на произвольной частоте до сих пор не рассматривалась. Ниже мы рассмотрим методом само согласованного поля [4] согласование пьезоэлемента с рабочей средой на произвольной частоте при односторонней акустической нагрузке.

В работе [4] были получены в общем виде достаточно простые аналитические выражения коэффициентов отражения и прохождения ультразвука при нормальном падении для плоского пьезоэлемента с произвольными электрической и акустической нагрузками. Аналитическое исследование этих выражений показало, что коэффициент отражения ультразвука для акустически односторонне нагруженного пьезоэлемента обращается в нуль при следующих параметрах электрической нагрузки:

$$(1) \quad Q^{-1} = \frac{R_n}{X} = \frac{4K^2 B \operatorname{tg}^2 kl/2}{M_0 kl} \left(B^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{kl}{2} + 4 \right),$$

$$x_n = \frac{X_n}{X} = \frac{2K^2 \operatorname{tg} kl/2}{M_0 kl} \left[B^2 \left(\operatorname{ctg}^2 \frac{kl}{2} - 1 \right) + 4 \right] \times$$

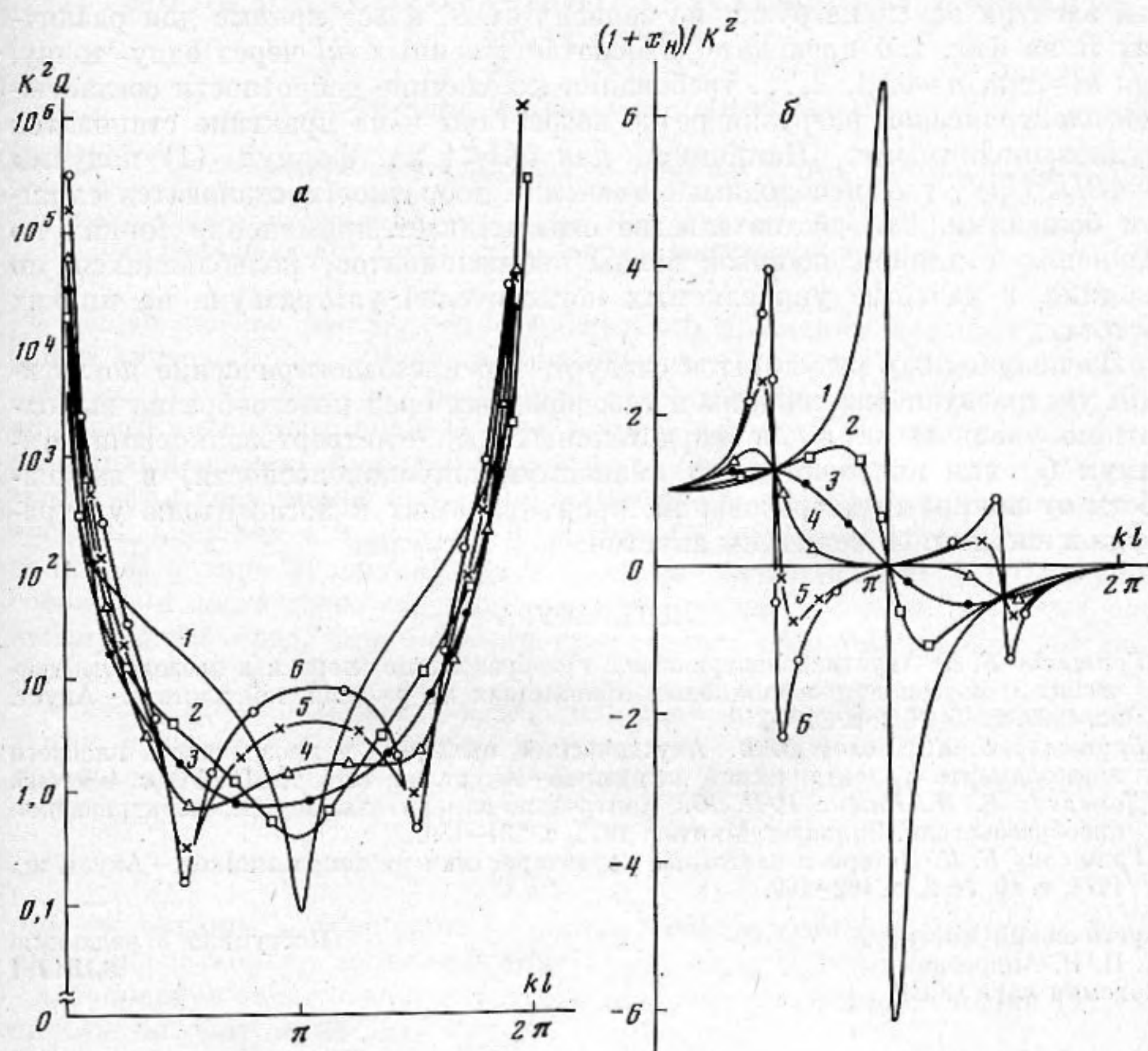
$$\times \left(B^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{kl}{2} + 4 \right) - 1,$$

где $M_0 = \left[B^2 \left(\operatorname{ctg}^2 \frac{kl}{2} - 1 \right) + 4 \right]^2 + 4B^2 \operatorname{tg}^2 \frac{kl}{2}$. Здесь B — отношение волно-

вых акустических сопротивлений среды и пьезоэлемента, l — толщина пьезоэлемента, k — волновое число, K — коэффициент электромеханической связи, R_n и X_n — активная и реактивная части импеданса электрической нагрузки пьезоэлемента соответственно, iX — сопротивление зажатого пьезоэлемента на рабочей частоте, Q — добротность электрической нагрузки.

Из формул (1) следует, что согласование пьезоэлемента с рабочей средой в принципе возможно для любых kl , кроме $kl=2\pi n$, где $n=0, 1, 2, \dots$. На фигуре показаны зависимости от kl в интервале $(0, 2\pi)$ необходимых для согласования величин $K^2Q - (a)$ и $(1+x_n)/K^2 - (b)$, рассчитанные по формулам (1) для различных акустических нагрузок.

Из графиков на фигуре следует, что для малых ($B \ll 1$) и больших ($B \gg 1$) акустических нагрузок активная и реактивная части согласующей



Зависимость от kl параметров согласующей электрической нагрузки пьезоэлемента $K^2Q - (a)$ и $(1+x_n)/K^2 - (b)$ для различных значений B : 1 - $B=10^{-1}$; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 2; 5 - 5; 6 - 10

электрической нагрузки пьезоэлемента в области минимальных значений Q сильно зависят от частоты, поэтому для таких акустических нагрузок согласование пьезоэлемента с рабочей средой узкополосно и очень критично к отклонению величины электрической нагрузки от номинальной. Напротив, для $B \sim 1$ величина согласующей электрической нагрузки в меньшей степени зависит от частоты, и согласование пьезоэлемента с рабочей средой становится достаточно широкополосным.

Для малых акустических нагрузок минимум добротности электрической согласующей системы реализуется при $kl=\pi$ и соответственно равен $Q=\pi B/4K^2$, а $x_n=-1$ [1]. Для акустических нагрузок, соответствующих $B \geq 2$, на кривых для K^2Q появляются дополнительные экстремумы, а на кривых для $(1+x_n)/K^2$ соответственные дополнительные нули, частотное расположение которых определяется трансцендентным уравнением

$$(2) \quad B^2 \left(\operatorname{ctg}^2 \frac{kl}{2} - 1 \right) + 4 = 0.$$

В последнем случае минимальная добротность электрической согласующей системы равна $Q=(kl)^*/K^2B$, где $(kl)^*$ - корень трансцендентного уравнения (2). Нетрудно видеть, что при $B=2$ оба дополнительных экстре-

мум совпадают по частоте и соответствуют $(kl)^* = \pi$, а величина минимальной добротности согласующей электрической системы в этом случае равна $Q = \pi/2K^2$. При $B \rightarrow \infty$ частоты дополнительных экстремумов асимптотически стремятся к величинам, соответствующим $(kl)^* = \pi(2n+1)/2$, $n=0, 1, 2, \dots$.

Интересно отметить, что для пьезоэлементов, толщины которых кратны целому числу четвертей длин волн, величина реактивной части согласующей электрической нагрузки не зависит от B , а все кривые для различных B на фиг. 1, б проходят для соответственных kl через одну точку. Для $kl \approx 2\pi n$, $n=0, 1, 2, \dots$ требования к величине добротности согласующей электрической нагрузки резко возрастают и на практике становятся трудновыполнимыми. Например, для $kl \ll 1$ из формул (1) получим $Q \approx 4B/K^2(kl)^3$, т. е. необходимые значения добротности становятся слишком большими. Это обстоятельство ограничивает применение тонких по сравнению с длиной звуковой волны пьезоэлементов, колеблющихся по толщине, в качестве управляемых поглотителей ультразвука на низких частотах.

Из полученных результатов следует, что пьезоэлектрические поглотители ультразвука для жидких и газообразных сред целесообразно выполнять полуволновыми, а для твердотельных сред — четвертьволновыми (минимум Q) или полуволновыми (максимум широкополосности) в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к поглотителю ультразвука и конкретной величины акустической нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грищенко Е. К. Акустикоэлектрическое преобразование энергии в пьезодиэлектрических и пьезополупроводниковых приемниках на резонансной частоте. — Акуст. ж., 1969, т. 15, № 2, с. 212–218.
2. Грищенко Е. К., Холод Л. И. Акустический импеданс и прозрачность плоского пьезоэлемента с электрической нагрузкой. — Акуст. ж., 1975, т. 21, № 3, с. 405–408.
3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1975, с. 151–159.
4. Грищенко Е. К. Петери и частотные характеристики пьезоприемников. — Акуст. ж., 1973, т. 19, № 2, с. 162–169.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
6.II.1981