

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 самосогласованного 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:

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

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

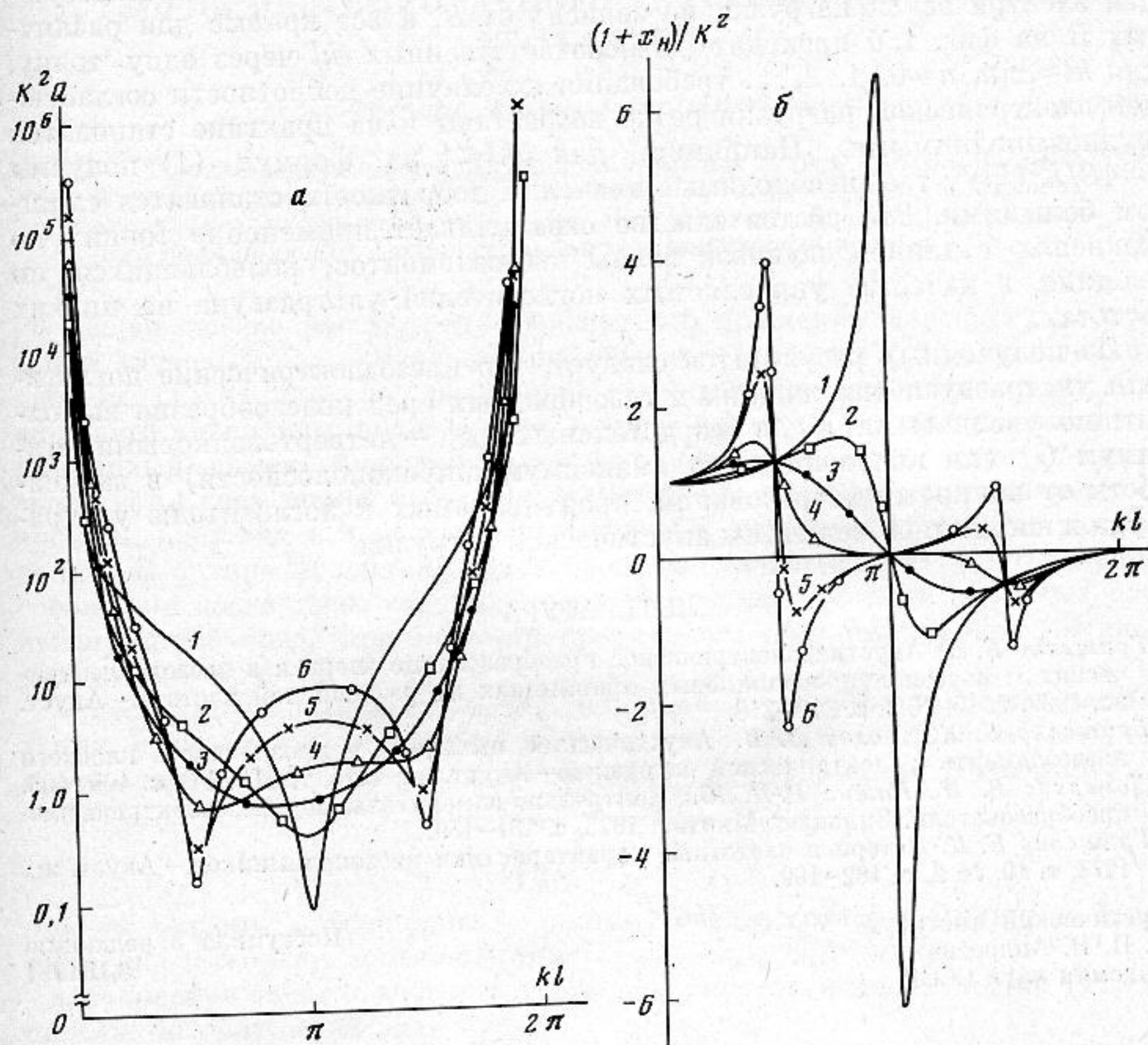
$$\times \left( B^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{kl}{2} + 4 \right) - 1,$$

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  $(1+x_H)/K^2 - (б)$ , 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  $(1+x_H)/K^2 - (б)$  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  $x_H=-1$  [1]. Для акустических нагрузок, соответствующих  $B \geq 2$ , на кривых для  $K^2Q$  появляются дополнительные экстремумы, а на кривых для  $(1+x_H)/K^2$  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-

мума 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  
6.11.1981