АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXIII 1987 Вып. 2

УДК 534.232

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В УПРАВЛЯЕМОМ ПЬЕЗОАКТИВНОМ ВОЛНОВОДЕ

Грищенко Е. К.

Рассмотрена возможность электрического управления затуханием и дисперсией скорости звука в полом пьезоактивном волноводе, заполненном жидкостью или газом.

Интерес к изучению электрически управляемых пьезоэлектрических устройств обусловлен возможностью создания на их основе адаптивных и динамически перестраиваемых колебательных систем [1, 2], а также возможностью их использования для аналоговой обработки сигналов [3, 4]. Физический механизм такого управления основан на зависимости амплитуды, фазы и пространственного распределения механических колебаний ограниченного пьезодиэлектрика от величины и характера его электрической нагрузки. В последнее время была показана возможность создания на основе линейного пьезоэлектрического взаимодействия управляемых поглотителей звука [5, 6]. Пьезоэлектрический поглотитель звука, используемый, например, при акустическом способе получения холода [7] в отличие от традиционных позволяет преобразовать звуковую энергию не в тепловую, а в электрическую и достаточно просто отвести ее из области акустического контакта поглотителя звука с хладагентом. В последнем случае особый интерес представляет волноводный вариант управляемого пьезоэлектрического поглотителя звука [8].

В данной работе рассмотрены затухание и дисперсия скорости звука в полом заполненном жидкостью или газом электрически управляемом волноводе с пьезоактивными податливыми стенками, характер колебаний которых зависит от величины внешней электрической нагрузки. Распространение звука в волноводе с пьезоактивными стенками уже рассматривалось в работах [9—11], однако влияние электрической нагрузки на характер распространения звука в волноводе не учитывалось.

Рассмотрим распространение звука в узком по сравнению с длиной звуковой волны и неограниченно протяженном волноводе круглого сечения с радиусом R и толщиной стенки h ($h/R \ll 1$). На фиг. 1 представлены волновод (*а*) и компоненты механических напряжений в стенке волновода (*б*) в цилиндрической системе координат. Для такого волновода распределение механических напряжений в стенке можно считать однородным по толщине. Волновод заполнен изотропной средой, а с наружной стороны волновода среда отсутствует, поэтому полагаем $T_3=0$. Будем считать стенки волновода абсолютно гибкими и нерастяжимыми в продольном направлении, т. е. будем пренебрегать изгибной жесткостью стенок по сравнению с жесткостью на растяжение и пренебрегать относительными деформациями волновода в продольном направлении по сравнению с радиальными. Для тонкостенных и узких по сравнению с длиной звуковой волны волноводов перечисленные ограничения всегда выполняются. Стенку волновода считаем выполненной из однородно поляризованной по толщине пьезокерамики и покрытой с обеих сторон невесомыми электропроводящими обкладками, соединенными с нормированной на единицу длины волновода электрической нагрузкой $Z_н=R_н+iX_н$.

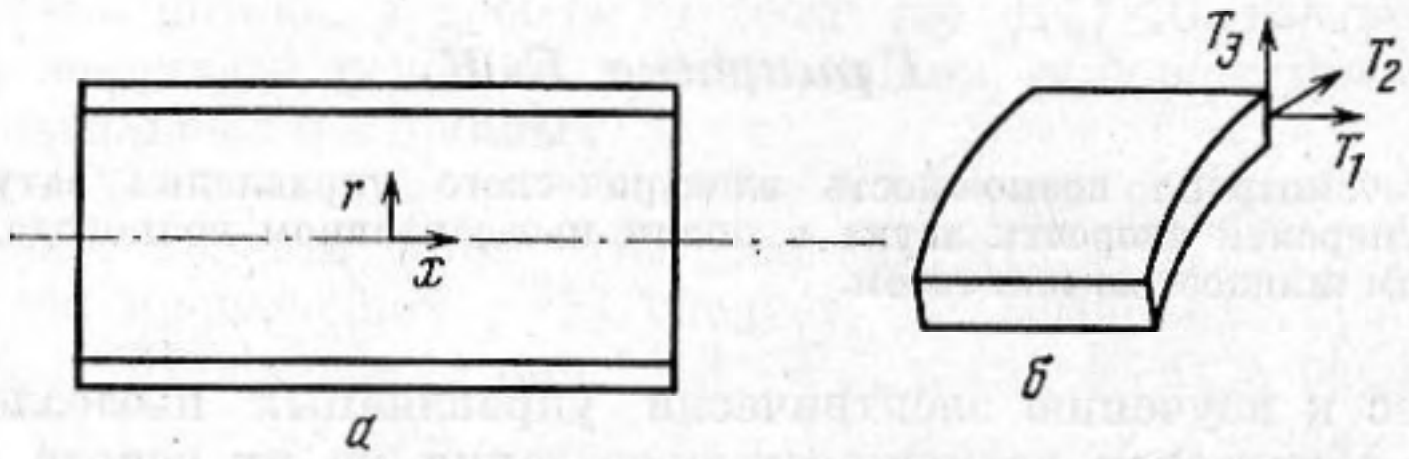
Будем рассматривать осесимметричные радиальные колебания стенки волновода. Процедура вывода уравнения движения для бесконечно малого элемента стенки волновода аналогична проведенной в работе [12] для пьезоактивной сферической оболочки и с учетом осевой T_1 и танген-

циальной T_2 компонент механического напряжения приводит к уравнению вида

$$\rho R\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}=T_1R\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}-T_2+\frac{R}{h}P, \qquad (1)$$

где ρ — плотность материала стенки волновода, t — время, ξ — радиальное смещение стенки волновода, $T_{1,2}$ — компоненты механического напряжения в стенке волновода, P — давление внутри волновода.

Первый член в правой части уравнения (1), обусловленный осевой компонентой механического напряжения T_1, на низких частотах может



Фиг. 1. Волновод (*а*) и компоненты механических напряжений в волноводе (*б*)

стать сколь угодно малым по сравнению со вторым членом. В самом деле, $T_1R\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}=T_1(k_pR)^2\frac{\xi}{R}\ll T_2$ при $k_pR\ll1$, $\xi/R\ll1$, $T_1\sim T_2$, где k_p — волновое число для радиальных колебаний стенки волновода, обусловленных осевой компонентой механического напряжения T_1. В последнем случае задача о колебаниях стенки волновода сводится к квазистатической. Ниже будем рассматривать колебания волновода, обусловленные только тангенциальной составляющей механического напряжения T_2.

Для квазистатического режима колебаний стенки волновода уравнения пьезоэффекта имеют вид [13]

$$S_2=s_{22}{}^ET_2+d_{23}E_3, \quad Д_3=d_{32}T_2+\varepsilon_{33}{}^TE_3, \qquad (2)$$

где S_2 — соответствующая компонента тензора деформации, $Д_3$ и E_3 — компоненты векторов электрической индукции и электрического поля соответственно, $s_{22}{}^E$ — модуль упругой податливости при постоянном электрическом поле, $\varepsilon_{33}{}^T$ — диэлектрическая проницаемость при постоянном механическом напряжении, d_{32} — пьезомодуль. Из уравнения (2) получим [12] $T_2=S_2/s_{22}{}^E(1-\eta)$, где $S_2=\xi/R$, $\eta=\mathcal{K}^2Z_н/(Z_н+Z_п)$, $\mathcal{K}=d_{32}/\sqrt{\varepsilon_{33}{}^Ts_{22}{}^E}$ — коэффициент электромеханической связи, $Z_п=iX$ — электрическое сопротивление единицы длины заторможенной стенки волновода. С учетом полученных соотношений из формулы (1) в квазистатическом приближении следует

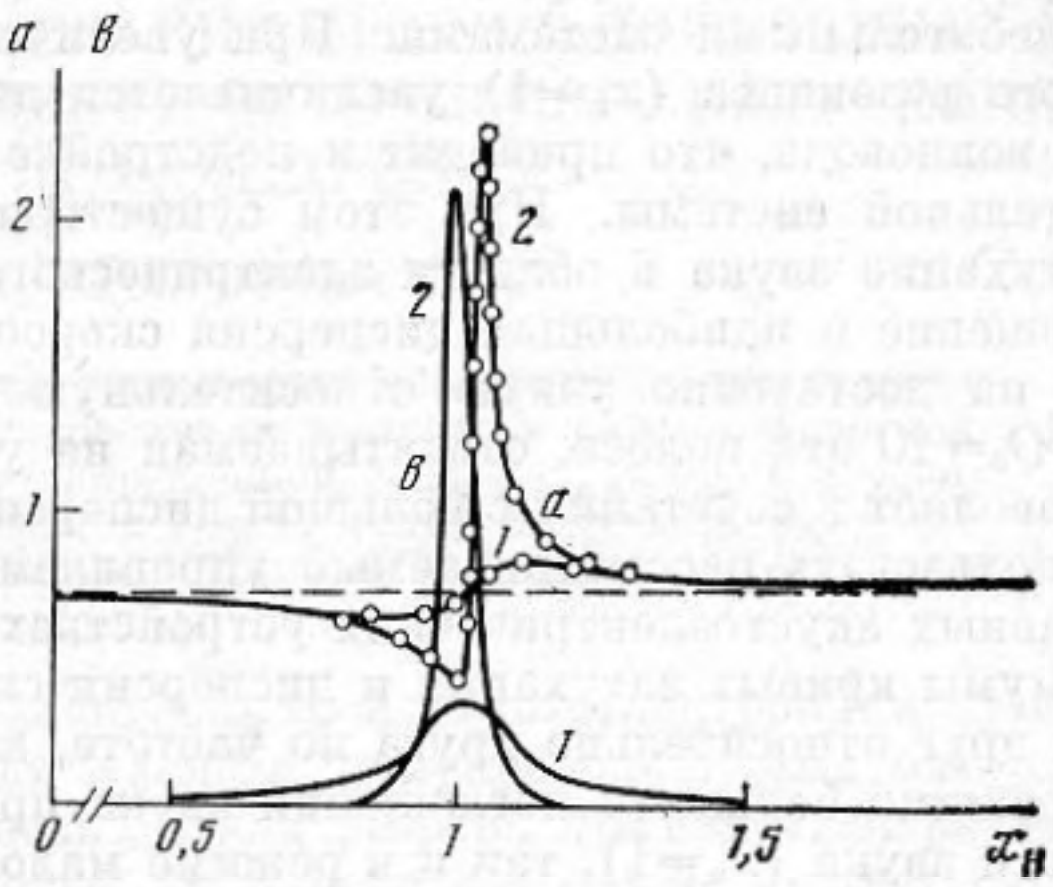
$$\xi/R=P/\rho c^2(h/R)\left[(1-\eta)^{-1}-(kR)^2\right], \qquad (3)$$

где $k=\omega/c$ — волновое число, c — скорость распространения продольных звуковых волн в стенке волновода без учета пьезоэффекта, ω — круговая частота. Нетрудно видеть, что стоящая справа в знаменателе величина представляет собой обобщенный динамический модуль упругости стенки волновода, величина которого зависит от электрической нагрузки. Пусть акустическая нагрузка на внешней стороне волновода отсутствует, тогда комплексное волновое число, характеризующее распространение звука в волноводе, с учетом выражения (3) равно [14]

$$\bar{k}=k_0\left[1+\frac{2(\rho_0c_0{}^2/\rho c)(R/h)(\mathrm{A}-i\mathrm{B})}{\mathrm{A}^2+\mathrm{B}^2}\right]^{1/2}, \qquad (4)$$

где $\mathrm{A}=\mathrm{Re}(1-\eta)^{-1}-[\mathrm{Re}(kR)]^2(1+Q_м{}^{-2}/4)$, $\mathrm{B}=\mathrm{Im}(1-\eta)^{-1}-[\mathrm{Re}(kR)]^2\times\times Q_м{}^{-1}/2$, $k_0=\omega/c_0$, $\bar{k}=\omega/c$, $Q_м=\mathrm{Re}(kR)/2\,\mathrm{Im}(kR)$ — механическая добротность материала стенки волновода, ρ_0 и c_0 — плотность и скорость звука

для заполняющей волновод неограниченной среды соответственно. Из формулы (4) следует, что вблизи акустического резонанса при $|\mathrm{Re}(1-\eta)^{-1}|\sim[\mathrm{Re}(kR)]^2$ фазовая скорость распространения звука и его затухание в волноводе с пьезоактивными податливыми стенками могут существенно отличаться от таковых в области частот, далеких от резонанса. При этом поскольку динамическая жесткость стенки волновода зависит от величины и характера его электрической нагрузки, то частота акустического резонанса, а следовательно, фазовая скорость распространения и затухание звука могут существенно изменяться в некотором частотном диапазоне с помощью управляемой электрической нагрузки. В принципе, замедление распространения звука может стать настолько большим, что приведет к нарушению приближения узкого волновода. Поэтому целесообразно рассмотреть критерий справедливости полученных результатов.



Фиг. 2. Зависимость нормированных фазовой скорости (*а*) и затухания (*в*) звука в пьезоактивном волноводе от $x_н$ для различных $\mathscr{K}^2Q_э$: *1* – $\mathscr{K}^2Q_э=1$, *2* – $\mathscr{K}^2Q_э=10$

Звуковую волну в волноводе можно считать плоской, если для компонент колебательной скорости вблизи стенки волновода выполняются условия $v_3 \ll v_1$ [14]. Пусть стенка волновода характеризуется нормальной акустической проводимостью Y. Тогда с учетом выражений (3), (4) $v_3=PY$, $v_1=\bar{k}P/\rho_0\omega=(P/\rho_0c_0)[1-2\rho_0c_0Y/ik_0R]^{1/2}$ и критерий справедливости приближения плоских волн принимает вид

$$(k_0R)^2/|\mathrm{A}+i\mathrm{B}| \ll 2(\rho c^2/\rho_0c_0^2)h/R. \qquad (5)$$

При условии резонанса на электрической стороне $\mathrm{Im}(1-\eta)=-\mathscr{K}^2Q_э$, где $Q_э=X_н/R_н$ – добротность электрической колебательной системы. Для самого неблагоприятного случая, когда совпадают частоты электрического и акустического резонансов (при этом $\mathrm{A}=0$), условие (5) перепишется в виде

$$(k_0R)^2\{(\mathscr{K}^2Q_э)^{-1}+[\mathrm{Re}(kR)]^2Q_м^{-1}/2\}^{-1} \ll 2(\rho c^2/\rho_0c_0^2)h/R. \qquad (6)$$

Условие (6) имеет простой физический смысл. Звуковая волна в волноводе остается плоской до тех пор, пока статическая жесткость стенки волновода, отнесенная к жесткости заполняющей волновод среды, много больше, чем относительное увеличение динамической податливости стенки волновода при резонансе. В случае заполнения волновода газом условию (6) удовлетворить значительно проще, чем в случае заполнения его жидкостью. Тем не менее при заполнении волновода из $BaTiO_3$, водой $\rho c^2/\rho_0c_0^2=10^2$ и при $k_0R=10^{-1}$, $\mathrm{Re}(kR)=5\cdot10^{-2}$, $\mathscr{K}^2Q_э=10$, $Q_м=10^2$, $h/R=10^{-2}$ условие (6) выполняется.

На фиг. 2 в параметрическом виде представлены зависимости нормирования фазовой скорости $\mathrm{Re}\,\bar{c}/c_0=a$ и затухания звука $\mathrm{Im}\,\bar{k}/k_0=b$ в заполненном жидкостью пьезоактивном волноводе с указанными выше параметрами от добротности и расстройки электрической колебательной системы относительно частоты ее электрического резонанса. В качестве частотного параметра расстройки выбрана величина $x_н=X_н/X$. Штриховая прямая на уровне 0,72 соответствует фазовой скорости звука в волноводе для разомкнутой электрической цепи ($Q_э=0$). Уменьшение относительной скорости звука по сравнению с 1 связано здесь с упругой податливостью стенки волновода. Эта величина практически не зависит от частотного параметра в рассматриваемом диапазоне изменения $x_н$, по-

скольку при разомкнутой электрической цепи электромеханическая колебательная система далека от акустического резонанса $[\mathrm{Re}(kR)]^2 \ll \ll |\mathrm{Re}(1-\eta)^{-1}|$. При этом затухание звука, обусловленное конечной механической добротностью стенки волновода, оказывается очень малым $\mathrm{Im}\,\bar{k}/k_0 \sim 10^{-4}$. Поглощением звука в заполняющей волновод среде пренебрегаем. Кривые *1* и *2* соответствуют отличным от нуля значениям $\mathscr{K}^2 Q_э$, определяющим коэффициент связи между механической и электрической колебательными системами. При увеличении $\mathscr{K}^2 Q_э$ в области электрического резонанса ($x_н=1$) увеличивается динамическая податливость стенки волновода, что приводит к подстройке в резонанс механической колебательной системы. При этом существенно увеличиваются дисперсия и затухание звука в области электрического резонанса. Максимальное поглощение и наибольшая дисперсия скорости звука в волноводе приходятся на достаточно узкую относительную полосу частот. Например, для $\mathscr{K}^2 Q_э=10$ эта полоса, отсчитываемая на уровне 0,7, составляет $\sim 4\%$, что позволяет в сочетании с большой дисперсией и большим затуханием звука использовать рассматриваемый управляемый волновод в частотно-избирательных акустоэлектрических устройствах. При этом из-за того, что максимумы кривых затухания и дисперсии скорости звука несколько сдвинуты друг относительно друга по частоте, имеется возможность работы как в режиме большого поглощения звука при фиксированной фазовой скорости звука ($x_н=1$), так и в режиме малого поглощения звука, но с большим изменением (примерно в 2 раза) фазовой скорости ($x_н=0{,}9$; $x_н=1{,}1$).

Таким образом, показана принципиальная возможность электрического управления затуханием и дисперсией скорости звука в полом пьезоактивном волноводе, заполненном жидкостью или газом. Рассмотренный пьезоактивный волновод может найти применение в качестве управляемого поглотителя звука, перестраиваемого фильтра или управляемой линии задержки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуревич Г. Л., Кошуринов Е. И., Пасхин В. М., Сандлер М. С.* Генератор с дискретной перестройкой частоты, стабилизированный резонатором поверхностной акустической волны // РЭ. 1978. Т. 23. № 10. С. 2204–2207.
2. *Грищенко Е. К.* Управляемые акустоэлектрические устройства // Матер. XI Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Ч. II. Душанбе: Дониш, 1981. С. 107.
3. *Toda K.* Multiplexer using a Lamb wave transducer dependent on terminal condition // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 71. № 4. P. 1028–1030.
4. *Chenghao W., Zheying Z.* Principle of piezoelectric-tunabl transducers // Chinese J. of Acoustic. 1983. V. 2. № 1. P. 16–24.
5. *Грищенко Е. К.* Пьезоэлектрический поглотитель ультразвука пластинчатого типа // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 4. С. 486–488.
6. *Грищенко Е. К.* Низкочастотный электрически управляемый пьезоэлемент // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 4. С. 475–478.
7. *Arkharov A. M. et al.* Method of cold generation and a plant for accomplishing same: U. S. Patent № 4.444.019, 1984.
8. *Грищенко Е. К.* Устройство для поглощения звука: А. с. 1224820 СССР // Б. И. 1986. № 14. С. 213.
9. *Коломиец Г. А., Улитко А. Ф.* Связанные электроупругие колебания пьезокерамических тел // Тепловые напряжения в элементах конструкций. 1969. Вып. 8. С. 15–24.
10. *Adelman N. T., Stavsky Y., Segal E.* Axisimmetric vibrations of radially polarized piezoelectric ceramic cylinder // J. Sound and Vibr. 1975. V. 38. № 2. P. 245–254.
11. *Шульга Н. А., Григоренко А. Я., Лоза И. А.* Осесимметричные электроупругие волны в полом пьезокерамическом цилиндре // Прикл. механика. 1984. Т. 20. № 1. С. 26–32.
12. *Грищенко Е. К.* Тонкостенный сферический пьезоприемник с управляемой электрической нагрузкой // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 1. С. 25–31.
13. Физическая акустика. Т. I. Ч. А./Под ред. Мэзона У. М.: Мир, 1966. 592 с.
14. *Исакович М. А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.

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

Поступила в редакцию
5.V.1986