

3. R. Mapleton. Diffraction patterns of solid delay lines. J. Acoust. Soc. America, 1953, 25, 3, 516—524.
4. L. Knopff. Diffraction of elastic waves. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 2, 217—229.
5. Э. Грей и Г. Мэтью. Функции Бесселя и их приложение в физике и механике. М., ИЛ., 1953.
6. A. Leitner. Diffraction of sound by circular disk. J. Acoust. Soc. America, 1949, 21, 4, 331—334.

Центральный н.-и.институт технологии  
и машиностроения  
Москва

Поступило в редакцию  
11 января 1959 г.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ПРИЕМА

А. Е. Колесников

В виду широкого распространения пьезоэлектрических звукоприемников представляется интересным провести анализ свойств электрической цепи пьезопреобразователя, работающего в режиме приема, как незатухающих, так и импульсных сигналов.

В общем случае, пьезопреобразователь в режиме приема можно представить в виде электромеханического четырехполюсника, входом которого служит механическая сторона, а выходом — электрическая. Нагрузка на любой из сторон, связанных за счет явления прямого пьезоэффекта, изменяет полное сопротивление на другой стороне [1]. Однако расчет показывает, что при приеме из жидкой и твердой среды вносимым электрическим сопротивлением за счет механической стороны преобразователя можно пренебречь, сравнительно с собственным его сопротивлением за счет физической емкости обкладок вибратора.

В подавляющем большинстве случаев в режиме приема электрическая сторона пьезопреобразователей присоединяется ко входной цепи усилителя напряжения, обладающего большим значением входного сопротивления, для обеспечения режима холостого хода пьезопреобразователя.

Рассмотрим апериодический вход — присоединение преобразователя к сетке первого каскада усилителя при наличии только сопротивления утечки сетки. При этом обозначим ЭДС, возникающую при приеме сигнала в результате явления прямого пьезоэффекта, через  $E$ .

Эквивалентная схема для апериодического входа представлена на фиг. 1, где приняты следующие обозначения:  $C_\phi$  — физическая емкость преобразователя, образованная емкостью между его обкладками;  $C_0$  — емкость входа, включающая в себя входную емкость лампы, емкость соединительных шлангов от преобразователя ко входу и емкость монтажа;  $R_{вх}$  — сопротивление утечки сетки, включающее также и сопротивление потерь за счет изоляции;  $U_g$  — напряжение, поступающее на сетку первого каскада усилителя.

Легко показать, что напряжение на сетке первого каскада усилителя равно

$$U_g = \frac{E C_\phi \cdot R_{вх}}{(C_\phi + C_0)[R_{вх} + 1 / j2\pi \cdot f (C_\phi + C_0)]},$$

где  $f$  — частота принимаемого сигнала.

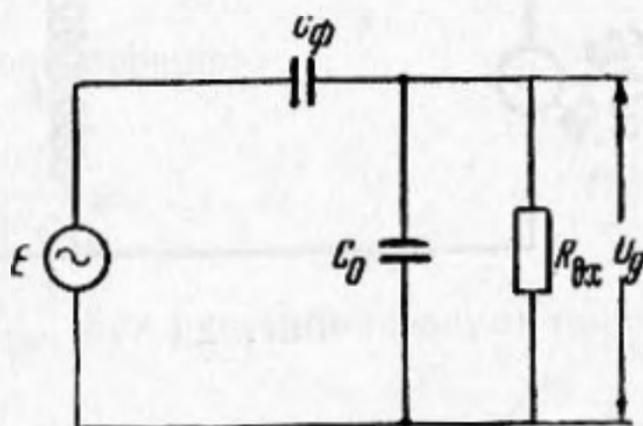
Значение модуля напряжения

$$|U_g| = \frac{E \cdot 2\pi \cdot f \cdot R_{вх} \cdot C_\phi}{\sqrt{(2\pi \cdot f \cdot R_{вх} \cdot C_{вх})^2 + 1}}, \quad (1)$$

где  $C_{вх} = C_0 + C_\phi$ .

Отметим, что входная емкость  $C_{вх}$  обычно не может быть сделана менее  $10^{-10}$  ф. Полагая  $R_{вх} = 0,5 \cdot 10^6$  ом, найдем, что член  $(2\pi f R_{вх} \cdot C_{вх})^2$  на частотах более  $10^4$  гц значительно больше единицы. Следовательно, на ультразвуковых частотах

$$|U_g| \approx \frac{E \cdot C_\phi}{C_{вх}}.$$



Фиг. 1

Остановимся на двух частных случаях, имеющих важное практическое значение:

1.  $C_\Phi \ll C_0$ . Этот случай соответствует использованию кварца, турмалина, тартрата калия, сегнетовой соли и других преобразователей, обладающих диэлектриком с малой диэлектрической постоянной. При этом

$$|U_g| = \frac{E \cdot C_\Phi}{C_0}. \quad (2)$$

2.  $C_\Phi \gg C_0$ . Это соотношение характерно для использования пьезокерамики, изготавливаемой на основе титаната бария и обладающей большой величиной диэлектрической постоянной. В этом случае формула (1) принимает вид:

$$|U_g| = E. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь присоединение пьезопреобразователя к усилителю при помощи резонансного входа. Физическая емкость преобразователя  $C_\Phi$ , емкость монтажных элементов, соединительных плангов и входная емкость первого каскада усилителя образуют емкость контура; параллельно входу подключается индуктивность  $L$  такой величины, чтобы образующийся контур был настроен на частоту сигнала. На фиг. 2 представлена эквивалентная схема резонансного входа, преобразованная к виду, удобному для анализа, т. е. представленная в виде последовательного колебательного контура, настроенного на частоту сигнала. Исходя из известных соотношений

для последовательного колебательного контура, получаем

$$U_g = \frac{E \cdot C_\Phi \cdot Q}{C_{вх}}, \quad (4)$$

где  $Q$  — добротность контура.

Приведем выражения для частных случаев, рассмотренных ранее. Для кварца:

$$U_g = \frac{E \cdot C_\Phi \cdot Q}{C_0}. \quad (5)$$

Диэлектрические потери в кварце весьма малы. Добротность контура будет зави-

сать от потерь в индуктивности, качества изоляции и величины емкости соединительных плангов. На практике величина  $Q$  в этом случае может быть порядка ста и более. Для пьезокерамики титаната бария:

$$U_g = E \cdot Q. \quad (6)$$

Диэлектрические потери в пьезокерамике значительны. Кроме того, велико значение емкости  $C_{вх}$ . Поэтому практически невозможно получить добротность контуров с пьезокерамикой более двух-трех десятков.

Изложенное показывает, что резонансный вход имеет преимущество в величине коэффициента передачи сигнала по сравнению с апериодическим входом; поэтому в большинстве случаев, особенно при работе в области высоких частот, используется резонансный вход. При приеме импульсных ультразвуковых сигналов расчет резонансного входа должен производиться также с учетом обеспечения необходимой ширины полосы пропускания для передачи импульсов с наименьшими искажениями.

Связь между шириной полосы пропускания и добротностью контура определяется выражением:

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} \left( \frac{1-p^2}{p^2} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где  $p$  — уровень отсчета, определяемый отношением значения сигнала на заданной частоте к значению сигнала на резонансной частоте  $f_0$ .

Полагая, с достаточной для практики точностью, что время установления сигнала равно  $0,1 \cdot t_u$ , где  $t_u$  — длительность импульса, можно определить добротность контура по формуле [2]:

$$Q \approx 0,1 \cdot t_u \cdot f_0. \quad (8)$$

Рассмотрим один частный случай, когда применение апериодического входа оказывается целесообразнее использования резонансного входа. Речь идет о приеме весьма слабых сигналов, соизмеримых с внутренними шумами входного устройства.

Найдем отношение сигнал/шум  $= N$  для аperiodического входа. Значение напряжения шумов на входе усилителя (при  $t = 17^\circ$ ) находим из выражения [3].

$$U_{\text{ш}} = 125 \cdot 10^{-12} \sqrt{R \cdot \Delta f} \text{ в.} \quad (9)$$

Для схемы на фиг. 1 находим шумящую (активную) часть входного сопротивления:

$$R = \frac{R_{\text{вх}}}{1 + (2\pi \cdot f \cdot R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{вх}})^2}. \quad (10)$$

При выполнении условия  $\Delta f \ll f_0$  можно для расчета воспользоваться выражением (10), усредняя значение  $R$  на средней частоте полосы пропускания  $f_0$ :

$$U_{\text{ш}} = 125 \cdot 10^{-12} \sqrt{\frac{R_{\text{вх}} \cdot \Delta f}{1 + (2\pi \cdot f_0 \cdot R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{вх}})^2}} \text{ в.} \quad (11)$$

Из (1) и (11) находим значение  $N_{\text{ап}}$ :

$$N_{\text{ап}} = \left| \frac{U_g}{U_{\text{ш}}} \right| = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot E \cdot R_{\text{вх}} \cdot C_{\phi}}{125 \cdot 10^{-12} \sqrt{R_{\text{вх}} \cdot \Delta f}}. \quad (12)$$

Найдем отношение сигнал/шум для резонансного входа. Напряжение шумов при этом равно:

$$U_{\text{ш}} = 125 \cdot 10^{-12} \sqrt{R_{\phi} \cdot \Delta f} = \frac{125 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{2\pi \cdot C_{\text{вх}}}} \text{ в, так как } R_{\phi} = 1 / 2\pi \cdot \Delta f \cdot C_{\text{вх}} \text{ при } Q = f_0 / \Delta f.$$

Отсюда, используя формулу (4), получим искомое соотношение:

$$N_{\text{рез}} = \left| \frac{U_g}{U_{\text{ш}}} \right| = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot E \cdot f_0 \cdot C_{\phi}}{125 \cdot 10^{-12} \Delta f \sqrt{C_{\text{вх}}}}. \quad (13)$$

Найдем теперь из (12) и (13) отношение  $N_{\text{ап}} / N_{\text{рез}}$  при равных значениях полосы пропускания усилителя  $\Delta f$ .

$$\frac{N_{\text{ап}}}{N_{\text{рез}}} = \sqrt{2\pi \cdot \Delta f \cdot R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{вх}}}. \quad (14)$$

Анализ выражения (14) показывает, что при выполнении условия  $\Delta f > 1 \frac{1}{2\pi \cdot R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{вх}}}$  аperiodический вход дает лучшее соотношение сигнал/шум, чем резонансный вход. Для  $R_{\text{вх}} \approx 0,5 \cdot 10^6 \text{ ом}$  и  $C_{\text{вх}} \approx 10^{-10} \text{ ф}$  выгодно применять аperiodический вход при ширине полосы пропускания более  $10^4 \text{ гц}$ .

Таким образом, из выражения (14) следует, что при приеме слабых импульсных сигналов, требующих относительно широкой полосы пропускания устройства, целесообразно применять аperiodический вход, выбирая  $R_{\text{вх}}$  максимально большим.

Необходимо отметить, что Ю. Б. Семенников [4], производивший теоретическое исследование входных цепей усилителей, работающих от пьезоэлектрических звукоприемников при малых сигналах, получил соотношение  $N_{\text{ап}} / N_{\text{рез}}$  отличающееся от выражения (14), что объясняется рядом алгебраических ошибок, допущенных им при выводе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Х а р к е в и ч. Теория электроакустических аппаратов. М., Связьиздат, 1940.
2. Я. З. И ц х о к и. Импульсная техника. Сов. радио, 1949.
3. В. И. С и ф о р о в. Радиоприемные устройства. М., Воениздат, 1954.
4. Ю. Б. С е м е н и к о в. Входные цепи усилителей, работающих от пьезоэлектрических приемников. Тр. Комиссии по акустике АН СССР, 1953, 7.