

расчет на ЭВМ, эта модель упрощается и соответствует телу Максвелла. Частотная зависимость скорости в этом случае выражается соотношением

$$\left(\frac{c_\infty}{c}\right)^2 = \frac{1}{2} \left[ 1 + \left( \frac{1 + \omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2} \right)^{1/2} \right],$$

где  $c_\infty$  — максимальное значение скорости,  $\tau$  — время релаксации,  $\omega$  — циклическая частота. Для монокристалла бензола при  $t = 5,3^\circ$   $c_\infty = 2516$  м/сек,  $\tau = 7,5 \cdot 10^{-6}$  сек.

Прохождение скорости звука в *n*-трикозане через минимум при температуре  $39,5^\circ$  обусловлено тем фактором, что при этой температуре происходит переход от одной модификации к другой. Во второй модификации группы  $C_2H_4$  совершают повороты вокруг ближайшей связи C—C. К такому заключению приходят и авторы работы [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Кошкин, Н. А. Добромыелов. Измерение скорости ультразвука в молекулярных поликристаллах вблизи температуры плавления. Сб. «Применен. ультраакуст. к исслед. вещества». МОПИ, 1967, 22, 23—28.
2. W. Pechhold, W. Dollhopf, A. Engel. Untersuchungen der Rotationsumwandlung reiner Paraffine und Paraffinmischungen mit Hilfe der komplexen Schubmoduls. *Acustica*, 1966, 17, 2, 60—72.
3. Г. Кольский. Волны напряжений в твердых телах. М., ИЛ., 1955, стр. 114.

Московский областной педагогический институт  
им. Н. К. Крупской

Поступило в редакцию  
30 октября 1967 г.

УДК 534.232

### О КОЭФФИЦИЕНТЕ ПЕРЕДАЧИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*В. В. Залесский*

Рассмотрим с энергетической точки зрения эффективность возбуждения или регистрации звуковых волн в некотором акустическом объекте с помощью пьезоэлектрического преобразователя, подключенного к электронному блоку, работающему в режиме излучения генератором, а в режиме приема — усилителем. Обобщенно под источником энергии мы понимаем электронный блок в режиме излучения или акустический объект в режиме приема, под потребителем энергии — акустический объект в режиме излучения, электронный блок в режиме приема. Полная мощность представляет собой модуль произведения напряжения и тока или силы и скорости, в зависимости от природы процесса. При непосредственном подключении к источнику энергии нагрузки, одинаковой с ним физической природы и имеющей сопротивление, равное выходному сопротивлению источника, в нагрузку поступает максимальная полная мощность источника.

Отношение максимальной полной мощности, поступающей к потребителю энергии через пьезопреобразователь, является функцией рабочего коэффициента передачи преобразователя  $L_p$ . Обычно мерой коэффициента передач служит его уровень в децибеллах  $a = 10 \lg L_p$ .

Примем режим излучения за «прямое» направление передачи энергии и введем матрицу передачи преобразователя [1]:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

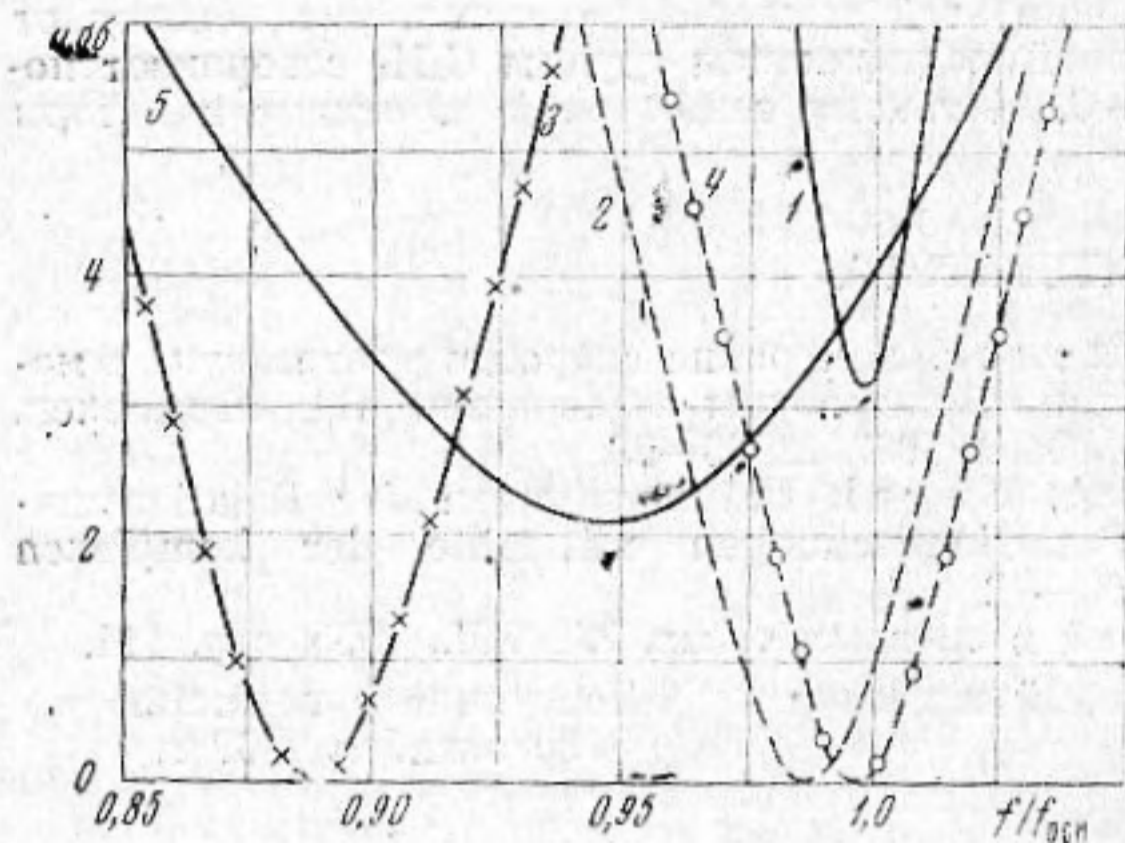
Обозначим сопротивление акустического объекта через  $Z_a$ , сопротивление электронного блока со стороны преобразователя через  $Z_b$ . Используя теорию электрических цепей [2], представим коэффициент передачи пьезопреобразователя следующим образом:

$$L_p = \frac{1}{4} \left| A \sqrt{\frac{Z_a}{Z_b}} + D \sqrt{\frac{Z_b}{Z_a}} + \frac{B}{\sqrt{Z_a Z_b}} + C \sqrt{Z_a Z_b} \right|^2,$$

где вертикальные линии обозначают модуль величины. Для обратимых систем определитель матрицы передачи равен единице и вид функции затухания не зависит от направления передачи энергии.



Для иллюстрации рассмотрим простейшую одномерную задачу. Пусть акустический объект — вода в полупространстве бесконечной протяженности, а преобразователь представляет собой пьезоэлемент с электродами на гранях, нормальных к оси модели, поляризованный вдоль этой оси. При работе одна из этих граней контактирует с акустическим объектом, а другая — свободна. Необратимыми потерями энергии внутри преобразователя пренебрегаем, сопротивление же акустического  $Z_a$  и электронного блока  $Z_b$  считаем активными. Скорость звука в пьезоэлементе измеряется при разомкнутых электродах. Половина отношения этой скорости к толщине



пьезоэлемента дает основную частоту собственных колебаний  $f_{осн}$ ; если пьезоэлемент свободен, то на этой частоте имеет место максимум его электрического сопротивления. Несколько ближе к началу частот, на частоте  $f_{min}$ , располагается минимум электрического сопротивления свободного пьезоэлемента. Область между этими частотами — резонансный промежуток, центром которого будем считать частоту  $f_c = 0,5 (f_{осн} + f_{min})$ . Произведение скорости звука в пьезоматериале на его плотность и площадь грани, контактирующей с акустическим объектом, дает акустическое сопротивление материала пьезоэлемента  $w$ . Отметим, что  $Z_a$  определяется на этой же площади. Если материал пьезоэлемента — керамика, то для акустического объекта в виде воды можно считать  $Z_a = 0,04 w$ . Характеристические сопротивления пьезоэлемента [3], акустическое  $Z_{x,a}$  и электрическое  $Z_{x,e}$ , активны в резонансном промежутке и изменяются с частотой медленнее всего в его центре. Их значения на  $f_c$  обозначим  $Z_{x,a,c}$  и  $Z_{x,e,c}$ . Характеристическое акустическое сопротивление в центре резонансного промежутка зависит от коэффициента электромеханической связи  $K$ . Например,  $Z_{x,a,c} = 0,006 w, 0,04 w, 0,17 w$  для  $K = 0,10, 0,25, 0,60$  соответственно. Результат расчета уровня коэффициента передачи для  $Z_a = 0,04 w$  и различных величин  $K$  и  $Z_b$  показаны на фигуре. Если  $K = 0,1$ , то в резонансном промежутке везде  $Z_{x,a} < Z_a$  и, следовательно, передача энергии без потерь невозможна; обеспечив  $Z_b = Z_{x,e,c}$ , мы получаем минимальное рабочее затухание  $a_{min} = 3$  дБ. Ширина полосы пропускания при допустимой неравномерности уровня 3 дБ составляет  $\Delta f_n = 0,03 f_{осн}$  или 3% (кривая 1). Если  $K = 0,25$ , то, обозначив  $Z_b = Z_{x,e,c}$ , можно уменьшить затухание до нуля (кривая 2). В этом случае  $\Delta f_n = 5\%$ . Если  $K > 0,25$ , то равенство  $Z_a = Z_{a,x}$  имеет место на двух частотах в пределах резонансного промежутка, симметричных относительно  $f_c$ . Например, если  $K = 0,5$ , то  $Z_a = Z_{a,x}$  на частотах  $f = 0,887 f_{осн}$  и  $f = 0,999 f_{осн}$ . Для согласования на первой из этих частот следует обеспечить  $Z_b = 0,135 Z_{x,e,c}$ , причем получается  $\Delta f_n = 6\%$  (кривая 3). Для согласования на второй частоте необходимо иметь  $Z_b = 8,42 Z_{x,e,c}$ , при этом получается  $\Delta f_n = 5\%$  (кривая 4). В обоих последних случаях  $a_{min} = 0$ . Если при  $K = 0,5$  согласиться на некоторое рассогласование  $Z_b = Z_{x,e,c}$ , то полоса пропускания возрастает до 15%, а минимальное затухание — до 2 дБ (кривая 5).

Таким образом, для рассматриваемого преобразователя передача сигнала без потери его мощности возможна лишь при коэффициенте электромеханической связи, дающем характеристическое акустическое сопротивление преобразователя, равное или большее, чем сопротивление акустического объекта. Большие значения  $K$  позволяют увеличивать полосу пропускания, что, однако, сопровождается некоторой потерей мощности сигнала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Залесский. Матрицы передачи пьезопреобразователей. Доклады VI Всесоюзной акустической конференции. М., 1968, Г-11-7.
2. А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. М., «Связь», 1965.
3. В. В. Залесский. Характеристические сопротивления пьезоэлемента. Доклады VI Всесоюзной акустической конференции. М., 1968, Г-11-7.

Ростовский государственный университет

Поступило в редакцию  
7 июня 1968 г.