АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIII 1977 Вып. 4

УДК 534.232

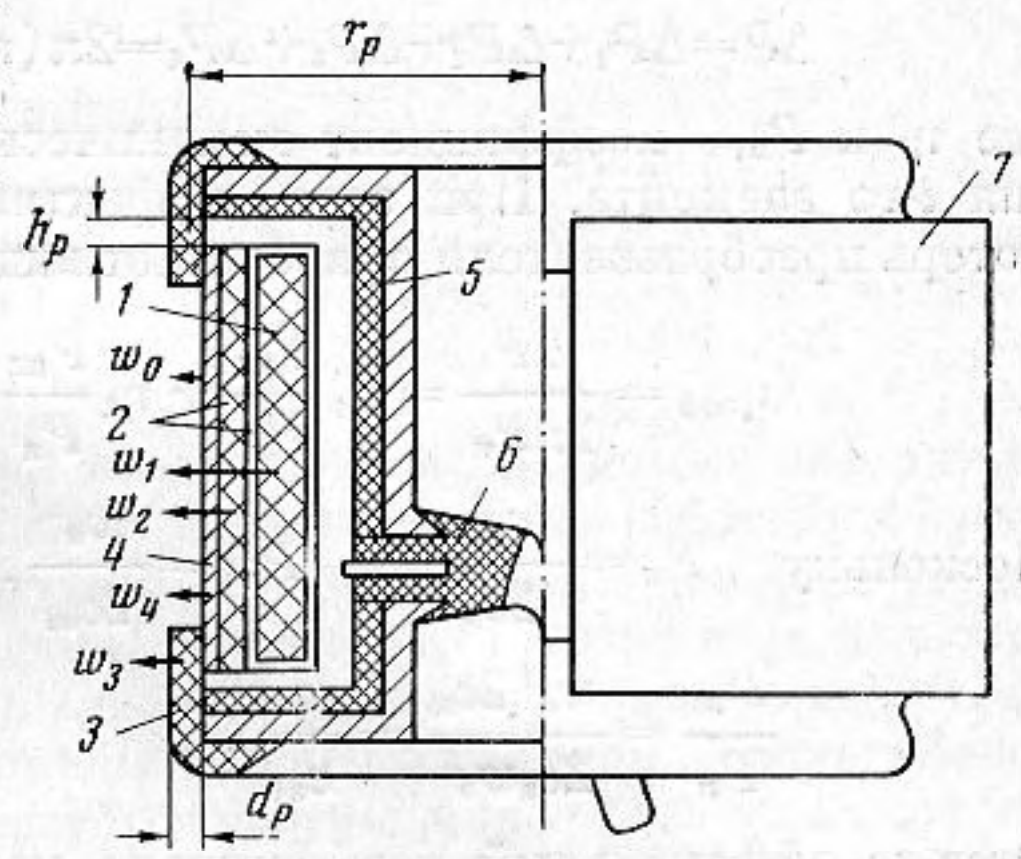
ОЦЕНКА ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

В. В. Богородский, Е. А. Корепин, М. В. Ручьев

Показана возможность применения энергетического метода для приближенной оценки механических потерь преобразователей. Оценка потерь произведена для электромеханических преобразователей цилиндрического типа, работающих в режиме пульсационных колебаний.

Современные электромеханические преобразователи являются сложными колебательными системами. Величины сопротивлений электрических и механических потерь существенно влияют на частотные характеристики преобразователей; поэтому разработка способов их оценки является актуальной задачей.

Если расчетную оценку сопротивлений электрических потерь преобразователей можно достаточно строго произвести общепринятыми методами, то строгая расчетная оценка механических потерь, основанная на решении уравнения распространения звуковой волны по элементам конструкций, затруднена из-за наличия в составе современных преобразователей значительного числа упруго связанных элементов сложных конфигураций, выполненных из различных материалов: пьезокерамики, металлов, резины, компаундов и др. (фиг. 1).



Фиг. 1. Схематическое изображение современного цилиндрического преобразователя: *1* – пьезоэлемент; *2* – электроизоляция; *3* – элементы герметизации и крепления; *4* – элементы механического упрочнения; *5* – корпус; *6* – токоввод; *7* – экран

Однако благодаря тому, что заданная форма колебаний преобразователя может быть строго реализована при его изготовлении, возможна достаточно точная для практики приближенная оценка механических потерь, основанная на использовании энергетических соображений.

При работе на заданной форме колебаний преобразователь может быть представлен одноконтурной эквивалентной схемой [1], для которой при колебаниях преобразователя в воздухе * справедливо соотношение

$$r_{\text{мп}}=\eta_{\text{эфф}}\sqrt{\frac{m_{\text{э}}}{c_{\text{э}}}},$$

* Колебания преобразователя в воздухе возбуждаются с теми же механическими напряжениями, температурой и частотой, что и в воде.

где $r_{мп}$ и $\eta_{эфф}$ — сопротивление и эффективный коэффициент механических потерь [2], $c_э$ и $m_э$ — эквивалентные гибкость и масса преобразователя.

При известных энергии потерь ΔP, а также потенциальной $P_п$ и кинетической $P_к$ энергии колеблющегося преобразователя величины $\eta_{эфф}$, $c_э$ и $m_э$ могут быть представлены в виде

$$\eta_{эфф}=\frac{\Delta P}{2\pi P_п};\quad c_э=\frac{w_0^2}{2P_п}\quad \text{и}$$

$$m_э=\frac{2P_к}{\dot{w}_0^2},$$

где w_0 и $\dot{w}_0$ — смещение и скорость точки приведения колебаний.

Смещения элементов наиболее распространенной конструкции цилиндрического преобразователя, совершающего пульсирующие колебания, распределены в плоскости кольца по закону $w(\varphi)=w_0=\text{const}$. Толщина стенки преобразователя по сравнению с его средним радиусом мала, поэтому смещения всех подвижных элементов конструкций с достаточной для практики точностью можно считать равными смещению точки приведения: $w_1=w_2=w_3=w_4=w_0$ *.

В связи с тем что полная энергия потерь равна сумме энергий, рассеиваемых во всех элементах конструкции, и для каждого элемента справедливо соотношение

$$\eta_{эфф}=\frac{\Delta P_i}{2\pi P_{пi}},$$

мы имеем

$$\Delta P=\Delta P_1+\Delta P_2+\Delta P_3+\Delta P_4=2\pi(\eta_1 P_{п1}+\eta_2 P_{п2}+\eta_3 P_{п3}+\eta_4 P_{п4}),$$

где η_i и $P_{пi}$ — коэффициент механических потерь и потенциальная энергия i-го элемента. При этом эффективный коэффициент механических потерь преобразователя приобретает вид

$$\eta_{эфф}=\frac{\Delta P}{2\pi P_п}=\eta_1\frac{P_{п1}}{P_п}+\eta_2\frac{P_{п2}}{P_п}+\eta_3\frac{P_{п3}}{P_п}+\eta_4\frac{P_{п4}}{P_п}.$$

Поскольку $P_п=\dfrac{w_0^2}{2c_э}$ и $P_{пi}=\dfrac{w_0^2}{2c_{эi}}$,

$$\frac{P_{пi}}{P_п}=\frac{w_0^2\,2c_э}{2c_э w_0^2}=\frac{c_э}{c_{эi}}.$$

Отсюда эффективный коэффициент механических потерь преобразователя будет

$$\eta_{эфф}=\left(\frac{\eta_1}{c_{э1}}+\frac{\eta_2}{c_{э2}}+\frac{\eta_3}{c_{э3}}+\frac{\eta_4}{c_{э4}}\right)c_э=\sum_i\frac{\eta_i}{c_{эi}}c_э. \tag{1}$$

С учетом равенства смещений всех элементов эквивалентные гибкость и масса преобразователя равны соответственно

$$c_э=\frac{w^2}{2P_п}=\frac{w^2}{2(P_{п1}+P_{п2}+P_{п3}+P_{п4})},$$

т. е.

$$\frac{1}{c_э}=\frac{1}{c_{э1}}+\frac{1}{c_{э2}}+\frac{1}{c_{э3}}+\frac{1}{c_{э4}},$$

* Индекс при w_i соответствует обозначению элемента на фиг. 1.

и

$$m_э = \frac{2P_к}{\dot{w}_0^2} = \frac{2(P_{к1}+P_{к2}+P_{к3}+P_{к4})}{\dot{w}_0^2} = m_{э1}+m_{э2}+m_{э3}+m_{э4}.$$

Эквивалентная гибкость элемента крепления определяется через потенциальную энергию его сдвиговых деформаций

$$c_{э3} = \frac{w_0^2}{2P_{п3}} = \frac{w_0^2}{2\frac{1}{2}\int\limits_0^{2\pi} \tau\gamma r_3 d_3\, d\varphi} = \frac{h_3}{2\pi r_3 d_3 G_3},$$

где τ и γ — напряжение и деформация сдвига, r_3, d_3, h_3 — средний радиус, толщина и высота крепления, G_3 — модуль сдвига материала крепления. Для случая пульсирующих колебаний гибкость двух торцевых креплений цилиндра будет

$$c_{э3} = \frac{h_3}{4\pi r_3 d_3 G_3}.$$

Соотношения для определения $c_{эi}$ и $m_{эi}$ при пульсирующей форме колебаний цилиндрических деталей (i=1, 2 и 4) имеют вид [1]

$$c_{эi} = \frac{r_i}{2\pi h_i d_i E_{юi}}, \quad m_{эi} = \rho_i h_i d_i\, 2\pi r_i,$$

где r_i, h_i, d_i — средний радиус, высота и толщина i-го цилиндрического элемента, ρ_i и $E_{юi}$ — плотность и модуль Юнга соответственного материала.

На основании изложенного выражение для определения эффективного коэффициента потерь принимает вид

$$\eta_{эфф} = 2\pi c_э \left(\frac{\eta_1 h_1 d_1 E_{ю1}}{r_1} + \frac{\eta_2 h_2 d_2 E_{ю2}}{r_2} + \frac{2\eta_3 r_3 d_3 G_3}{h_3} + \frac{\eta_4 h_4 d_4 E_{ю4}}{r_4}\right). \tag{2}$$

Значения коэффициентов потерь материалов, необходимые для расчетного определения $\eta_{эфф}$, могут быть либо заимствованы из работ [3, 4], либо определены экспериментальным путем. Последнее наиболее удобно осуществлять с использованием импеданцного метода [1]. При этом для определения коэффициента потерь по значениям экспериментальных точек импеданцной характеристики, снимаемой при постоянном возбуждающем электрическом напряжении, используется соотношение

$$\eta = 2(\omega_а - \omega_р)\sqrt{\frac{u_р}{u_а}} \Big/ \omega_р\left(\frac{u_р}{u_а} - 1\right),$$

где $\omega_р$ и $\omega_а$ — значения резонансной и антирезонансной частот, $u_р$ и $u_а$ — значения напряжений на частотах $\omega_р$ и $\omega_а$ на измерительном сопротивлении, включенном последовательно с преобразователем.

Импеданцный метод удобен тем, что он позволяет определить коэффициент потерь как в простейших пьезоэлементах, так и в пьезоэлементах, к которым присоединены элементы склейки, электроизоляции, крепления, герметизации и т. д. При этом по определенным таким образом значениям эффективных коэффициентов потерь соответственных элементов, а также по известным размерам и модулям Юнга соответственных материалов с помощью соотношений (1) и (2) можно определить коэффициент потерь материалов, оформленных в виде деталей реальных конфигураций.

Данные о преобразователе	ω_p	Добротность Q			
		пьезоэлемента	активного элемента	армированного активного элемента	герметизированного преобразователя
Секционированный цилиндр $\varnothing\ d_0$	ω_0	500	148	160	60
Секционированный цилиндр $\varnothing\ 0{,}40\ d_0$	$2{,}4\omega_0$	500	141	150	48
Сплошной цилиндр $\varnothing\ 0{,}22\ d_0$	$4{,}0\omega_0$	250	–	–	40

В таблице приведены определенные с помощью этого метода значения добротностей $Q=1/\eta_{эфф}$ элементов преобразователей, использующих пьезокерамику ТБК-3 и крепления из резины, на различных этапах их изготовления.

Из данных таблицы видно, что наибольший вклад в значение эффективного коэффициента потерь вносят клей и элементы крепления активного элемента, выполненные из полимерных материалов. Определенная экспериментальным путем зависимость коэффициента механических потерь активного элемента от числа слоев клея N может быть экстраполирована соотношением

$$\eta_{эфф}=\eta_к+aN,$$

где $\eta_к$ — коэффициент механических потерь пьезокерамики, a — постоянный коэффициент для пьезокерамики состава ТБК-3 и клея ДМ5-65, равный $a\approx7\cdot10^{-5}$.

Следует отметить, что вычисленные с помощью соотношения (1) значения коэффициента потерь материалов, использованных в конструкции, хорошо совпадают с известными литературными данными. В частности, для крепления, выполненного из резины, на частоте $\omega_p=18{,}8$ *кгц* получено значение $\eta_{эфф}=0{,}3$, что совпадает с данными, приведенными в работе [4].

С учетом экспериментальных данных для преобразователей, указанных в таблице, соотношение (1) может быть представлено в виде

$$\eta_{эфф}\approx\left(\frac{\eta_1 k_а}{c_{э1}}+\frac{\eta_3}{c_{э3}}\right)c_э, \tag{3}$$

где $k_а$ — коэффициент, учитывающий влияние механического упрочнения и равный $k_а\approx0{,}83$.

Значения эффективного коэффициента механических потерь, полученные расчетным путем (см. таблицу), отличаются от экспериментальных данных не более чем на 10%.

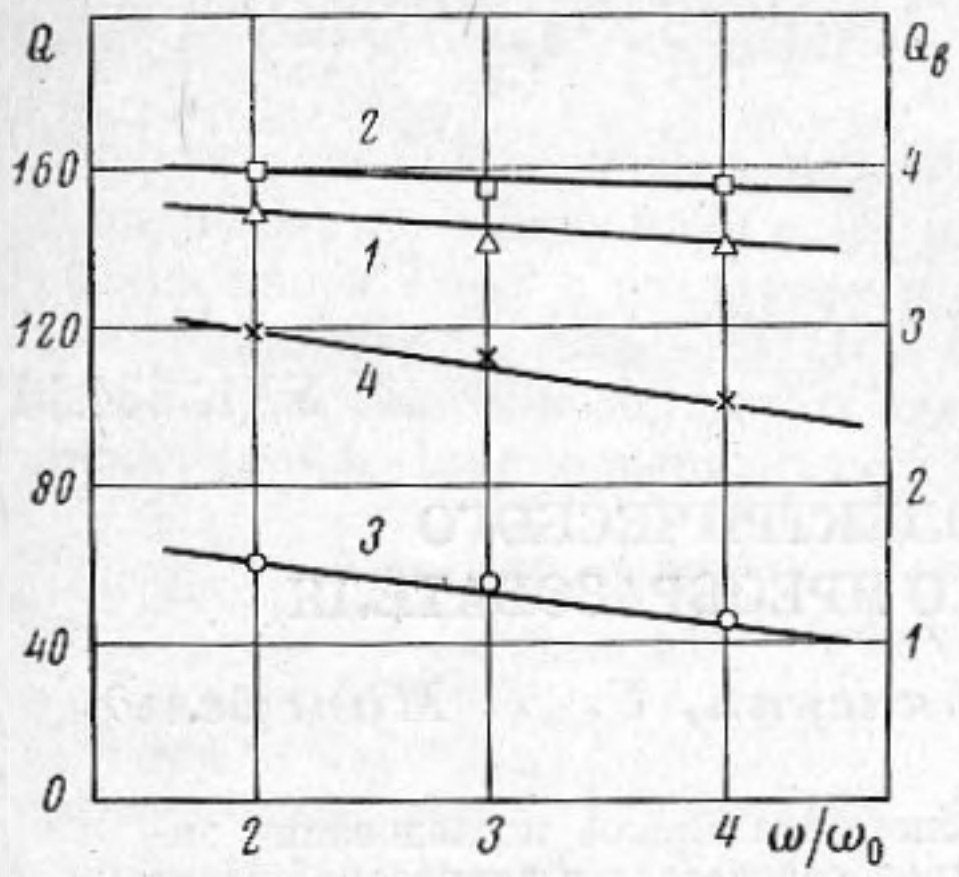
На фиг. 2 и 3 приведены зависимости добротности преобразователей и их элементов от амплитуды механических напряжений, а также от частоты колебаний и температуры, из которых видно существенное возрастание потерь с ростом частоты и амплитуды механических напряжений. Значительного изменения потерь в диапазоне температур от 0 до +60° С не замечено. Таким образом, при выполнении расчетов следует использовать параметры материалов, соответствующие рабочим частотам, механическим напряжениям и температуре преобразователей.

При работе в воде к механическим потерям в собственно преобразователе должны быть добавлены потери в экранах

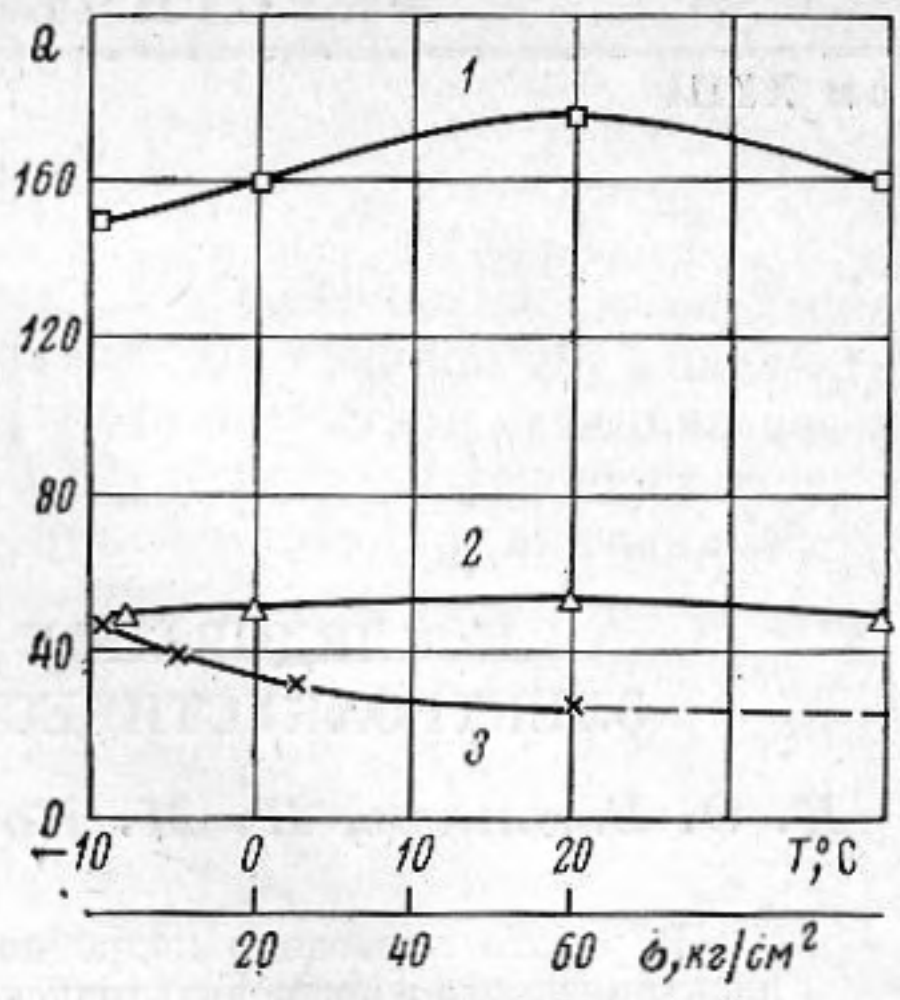
$$r_5=R_э S_э,$$

где $R_э$ — удельные механические потери в экране, $S_э$ — площадь экранированной поверхности преобразователя. При этом выражение для определения полного сопротивления механических потерь в экранированном преобразователе в общем случае будет

$$r_{мп}=r_1+r_2+r_3+r_4+r_5=\left(\eta_1\frac{1}{c_{э1}}+\eta_2\frac{1}{c_{э2}}+\eta_3\frac{1}{c_{э3}}+\eta_4\frac{1}{c_{э4}}\right)\sqrt{m_э c_э}+R_э S_э.$$



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Зависимость добротности элементов преобразователя от частоты колебаний в звуковом диапазоне частот: *1* – неармированный активный элемент; *2* – армированный активный элемент; *3* – преобразователь в сборе; *4* – крепление

Фиг. 3. Зависимость добротности преобразователя и его элементов от температуры (*1* и *2*) и амплитуды механического напряжения (*3*): *1* – неармированный активный элемент; *2*, *3* – преобразователь в сборе

Расчетные и экспериментальные оценки, выполненные нами, показывают, что для современных преобразователей удается достигнуть значений отношений сопротивления механических потерь в элементах конструкции r_i к сопротивлению излучения r_s полностью нагруженного преобразователя, находящихся в пределах

$$\frac{r_1}{r_s}=0{,}05;\quad \frac{r_2}{r_s}=0{,}02;$$

$$\frac{r}{r_s}=(0{,}1-0{,}15);\quad \frac{r}{r_s}=0{,}01;$$

$$\frac{r_5}{r_s}=(0{,}1-0{,}2).$$

Из приведенных материалов видно, что описанный выше способ энергетического расчетного определения сопротивления механических потерь может применяться для приближенной оценки коэффициента и сопротивления механических потерь электроакустических преобразователей и их элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Л. Я. Гутин.* Некоторые основные вопросы современной гидроакустики. Докт. дис., ЛЭТИ, 1947.
2. *В. С. Ильинский.* Защита аппаратов от динамических воздействий. М., «Энергия», 1970.
3. *В. С. Постников.* Внутреннее трение в металлах. М., «Металлургия», 1969.
4. *Е. Скучик.* Основы акустики, ч. 2. М., Изд-во иностр. лит., 1959.

Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт

Поступила
4 мая 1976 г.