

УДК 534.232

МЕХАНИКА

Член-корреспондент АН СССР В. В. БОГОРОДСКИЙ, Е. А. КОРЕПИН,
М. В. РУЧЬЕВ

О МАКСИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Коэффициент полезного действия излучателя является важной акустической характеристикой, определяющей как эффективность преобразования электрической энергии в механическую, так и степень разогрева излучателя. В общем случае к.п.д. электроакустического излучателя при работе на частотах, близких к резонансным, определяется соотношением

$$\eta_{\text{аз}} = \eta_{\text{эм}} \eta_{\text{ма}} = \left(1 + \frac{r_s + r_{\text{мп}}}{n^2 R}\right)^{-1} \left(1 + \frac{r_{\text{мп}}}{r_s}\right)^{-1} =$$

$$= \left(1 + \frac{\text{tg } \delta (1 - k_c^2)}{k_c^2 Q}\right)^{-1} \left(1 - \frac{Q}{Q_v}\right), \quad (1)$$

где $\eta_{\text{эм}}$ и $\eta_{\text{ма}}$ — электромеханический и механоакустический к.п.д. излучателя, r_s и $r_{\text{мп}}$ — сопротивление излучателя и механических потерь, n и R — коэффициент электромеханической трансформации и сопротивление электрических потерь, Q_v и Q — механическая добротность излучателя в воздухе и в воде, k_c и $\text{tg } \delta$ — коэффициент электромеханической связи и тангенс угла диэлектрических потерь излучателя.

Известен способ максимизации к.п.д. излучателя за счет варьирования величины сопротивления излучения r_s , осуществляемого путем изменения угла экранирования. Однако реализация этой возможности в большинстве практических случаев затруднена из-за необходимости экранирования противофазных участков излучающих поверхностей и нейтрализации с помощью экранов взаимных влияний совместно работающих излучателей.

При заданных габаритных размерах излучателя и угле его экранирования (т. е. при заданном сопротивлении излучения r_s) более результативным является определяемый соотношением (1) путь реализации значения добротности излучателя в воде, соответствующей максимальному значению его к.п.д.

Если в соотношение (1) подставить значения r_s и основных составляющих $r_{\text{мп}}$, оно приобретает вид

$$\eta_{\text{аз}} = \left\{ 1 + \frac{\text{tg } \delta (1 - k_c^2)}{k_c^2} \left[\omega_p c_3 r_s \left(1 + \frac{r_3 + r_k + r_a}{r_s} \right) \right] \right\}^{-1} \times$$

$$\times \left[1 + \left(r_3 + r_k + \frac{\eta_a}{\omega_p c_3} \right) \frac{1}{r_s} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где ω_p и c_3 — резонансная частота и эквивалентная гибкость излучателя, r_3 , r_k и r_a — сопротивление механических потерь в экране, креплении и активном элементе, η_a — коэффициент механических потерь в активном элементе.

Если при постоянных габаритах и угле экранирования излучателя изменения толщины его активного элемента не вызывают изменений величин $\text{tg } \delta$, k_c , ω_p , r_s , r_3 , r_k и η_a , что справедливо для самых распространенных современных цилиндрических и стержневых излучателей, то, как видно из

выражения (2), максимизация $\eta_{\text{аэ}}$ может быть осуществлена за счет оптимального выбора гибкости излучателя c_s и соответствующего ей значения добротности его колебательной системы. При этом легко показать, что

$$c_{s_{\text{опт}}} = \left\{ \eta_{\text{а}} \left[\frac{k_c^2}{\lg \delta (1 - k_c^2)} + \eta_{\text{а}} \right] / \left[\omega_p^2 r_s^2 \left(1 + \frac{r_s + r_{\text{к}}}{r_s} \right) \right] \right\}^{1/2};$$

$$\eta_{\text{аэ max}} = \left\{ 1 + \frac{\lg \delta (1 - k_c^2)}{k_c^2} \left[\eta_{\text{а}} + \sqrt{\eta_{\text{а}} \left[\frac{k_c^2}{\lg \delta (1 - k_c^2)} + \eta_{\text{а}} \right]} \right] \right\}^{-1} \times$$

$$\times \left\{ \left(1 + \frac{\alpha_s R_s k_s + \eta_{\text{к}}}{\alpha \omega_{\text{пк}} r_s} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{\eta_{\text{а}}}{k_c^2 / [(1 - k_c^2) \lg \delta] + \eta_{\text{а}}}} \right) \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где α и α_s — безразмерные коэффициенты в соотношениях для расчета сопротивления излучения $r_s = \alpha (\rho c)_{\text{в}} s_{\text{и}}$ и механических потерь в экране

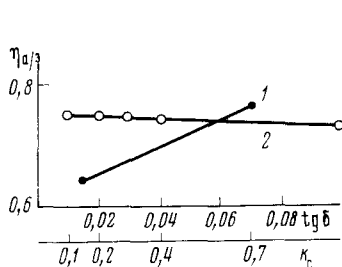


Рис. 1. Зависимости $\eta_{\text{а/3}}$ от k_c (1) и $\lg \delta$ (2)

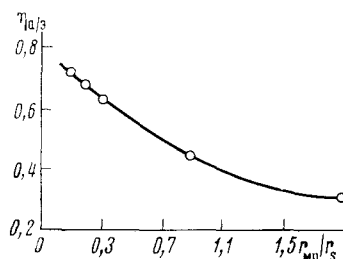


Рис. 2. Зависимость $\eta_{\text{а/3}}$ от отношения $r_{\text{мп}}/2s$

$r_s = \alpha_s R_s s_s$, $(\rho c)_{\text{в}}$ и R_s — удельные акустические сопротивления воды и экрана, $s_{\text{и}}$ и s_s — площади излучающей и экранированной поверхностей, k_c — коэффициент, равный $s_s/s_{\text{и}}$, $\eta_{\text{к}}$ — коэффициент механических потерь в креплении.

Из выражения (3) видно, что к.п.д. излучателя, имеющего оптимальное значение гибкости, определяется параметрами механических η_i и R_s и электрических $\lg \delta$ потерь, а также коэффициентом связи используемых в нем материалов. В конструкциях современных преобразователей, достаточно хорошо акустически нагруженных, т. е. имеющих значение безразмерного коэффициента α в выражении для сопротивления излучения r_s , равное $\alpha \approx 1$, реализуются следующие значения указанных выше параметров: $\lg \delta \leq 0,02$; $k_c \leq 0,7$; $\eta_{\text{а}} \approx 0,01$; $r_s/r_s \approx 0,2$; $r_{\text{к}}/r_s \approx 0,1$. Им соответствуют хорошо подтвержденные экспериментально максимальные расчетные значения к.п.д. излучателя $\eta_{\text{аэ max}} \approx 0,76$.

Из приведенной на рис. 1 расчетной зависимости к.п.д. излучателя, имеющего оптимальную акустическую нагрузку, от величин k_c и $\lg \delta$ видно, что к.п.д. излучателей, использующих современные пьезокерамические материалы, существенно зависит от значения k_c и относительно слабо — от значения $\lg \delta$.

Однако возможности реализации оптимального значения c_s в ряде случаев могут ограничиваться напряженным состоянием, определяемым условиями эксплуатации. Для силовой конструкции это ограничение определяется величинами механических напряжений, создаваемых гидростатическим давлением и ударной нагрузкой, для компенсированной конструкции — только ударной нагрузкой. Поэтому к.п.д. реальных излучателей обычно бывает ниже η_{max} .

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, к.п.д. современных излучателей существенным образом зависит от степени их акустической нагрузки, т. е. величины r_s .

Таблица 1

Расположение излучателей	Волновые размеры		Значения сопротивления, приведенных к электрической стороне, ом				Эксп. значения к.п.д., %		
	D/λ	H/λ	r_a	r_k	r_o	$r_{мп}$	$\eta_{мэ}$	$\eta_{ам}$	$\eta_{эа}$
Группа излучателей	1	0,5	30	70	100	200	93	83	77,5
Одиночный излучатель	0,5	0,25	64	100	260	424	96	20	19
Группа излучателей	0,5	0,25	64	100	260	424	95	47,5	46
Группа излучателей	0,5	0,25	64	100	260	424	94	82	76

Чтобы обеспечить возможность гибкого управления диаграммой направленности группы излучателей, обычно выбирают волновые размеры их излучающих поверхностей $D/\lambda < 1$ и $H/\lambda < 1$ (D и H — диаметр и высота излучателя, λ — длина излучаемой волны в воде). При этом степень акустической нагруженности преобразователей может существенно убывать (α может иметь значение до $\alpha=0,2-1,0$), что ведет к возрастанию отношения $r_{мп}/r_s$:

$$\frac{r_{мп}}{r_s} \approx \frac{r_k + r_o}{r_s} = \frac{\eta_k A_{кр}}{\alpha \omega_p A_{пр}} + \frac{\alpha_s R_o}{\alpha (\rho c)_v} k_s,$$

где $A_{кр}$, $A_{пр}$ — размеры крепления и излучателя.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость $\eta_{эа}=f(r_{мп}/r_s)$, из которой видно, что ухудшение степени акустического нагружения излучателя может в 2—3 раза снизить его к.п.д.

Таким образом, для максимизации к.п.д. необходимо обеспечивать максимально возможную акустическую нагрузку излучателей; использовать материалы и акустические экраны с максимальным значением k_s и минимальным значением механических и электрических потерь; осуществлять оптимизацию гибкостей излучателей.

Поступило
30 IX 1975