АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVIII 1982 Вып. 6

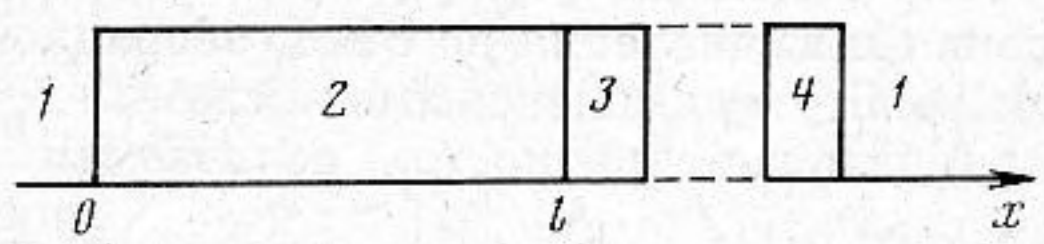
УДК 534.232

ОБ АСИММЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С СОГЛАСУЮЩИМИ ПЕРЕХОДНЫМИ СЛОЯМИ

Задирленко И. М., Кузьменко А. Г.

Рассмотрен режим излучения стержневого преобразователя, нагруженного на жидкость, с одной стороны, непосредственно, а с другой — через слой. Показано, что с увеличением числа слоев асимметрия излучения проявляется в большей полосе частот.

В практике часто требуется, чтобы электроакустический преобразователь был широкополосным и излучал энергию только в одном рабочем направлении. В режиме одностороннего излучения, как показано в [1], полоса пропускания может быть значительно расширена применением нескольких переходных четвертьволновых слоев с определенными величинами волновых сопротивлений. Асимметрия излучения преобразователя с одним согласующим переходным слоем исследована в [2], где показано, что интенсивность излучения в тыльном направлении в 16 раз меньше, чем в прямом направлении, на частоте антирезонанса пьезоэлемента. Однако на краях полосы пропускания это соотношение уменьшается до четырех. Таким образом, преобразователь является широкополосным, но его однонаправленность проявляется в узкой полосе частот. В связи с отмеченными результатами работ [1, 2] представляет интерес рассмотреть возможность расширения полосы пропускания двусторонне нагруженного преобразователя с помощью нескольких переходных слоев и исследовать степень асимметрии излучения для преобразователей с широкой полосой пропускания. В соответствии с выводами, сделанными в [1], ограничимся рассмотрением числа переходных слоев, не превышающего четырех.



Фиг. 1. Расчетная модель двусторонне нагруженного преобразователя. *1* — $z_в$, *2* — $z_к$, *3* — z_n, *4* — z_1

Преобразователь схематически представлен на фиг. 1, где $z_к$ — волновое сопротивление пьезокерамики; z_i — волновое сопротивление i-го слоя; n — число переходных слоев; $z_в$ — волновое сопротивление внешней среды (воды).

При решении задачи пренебрежем механическими потерями в слоях и пьезокерамике. В этом случае акустическая мощность, излучаемая во внешнюю среду, совпадает с мощностью, излучаемой торцами пьезоэлемента. Для определения величины нагрузки на рабочий торец пьезоэлемента ($x=l$) воспользуемся известными формулами для входных удельных импедансов слоев, нагруженных на заданные комплексные импедансы [3]. Зная удельные импедансы нагрузки на торцах пьезоэлемента ($z_в$ и z_l), можно определить, используя уравнения пьезоэффекта и граничные условия при $x=0$ и $x=l$, колебательные скорости торцов, а следовательно, и удельную мощность излучения.

Для колебательных скоростей получаем выражения

$$v|_{x=0}=v_0=\frac{1}{\Delta}[(1-\cos\theta)-j\alpha_{lк}\sin\theta]\frac{d_{33}}{s_{33}^E}\frac{U_m}{z_к l},$$

$$v|_{x=l}=v_l=-\frac{1}{\Delta}[(1-\cos\theta)-j\alpha_{0к}\sin\theta]\frac{d_{33}}{s_{33}^E}\frac{U_m}{z_к l},$$

где

$$\Delta=(\alpha_{l\text{к}}+\alpha_{0\text{к}})\left(\cos\theta-\frac{k_{33}^2}{\theta}\sin\theta\right)+$$

$$+j\left[(1+\alpha_{l\text{к}}\alpha_{0\text{к}})\sin\theta-2\frac{k_{33}^2}{\theta}(1-\cos\theta)\right],$$

$$\alpha_{l\text{к}}=z_l/z_\text{к};\quad \alpha_{0\text{к}}=z_\text{в}/z_\text{к};\quad \theta=\omega l/c;\quad c=(s_{33}^E\rho_\text{к})^{-1/2};$$

U_m — амплитуда электрического напряжения; d_{33} — пьезомодуль, s_{33}^E — упругая постоянная пьезокерамики, $z_\text{к}$ — удельный импеданс пьезокерамики, $\rho_\text{к}$ — плотность пьезокерамики, k_{33}^2 — квадрат коэффициента электромеханической связи; l — длина пьезоэлемента.

Число слоев n	Волновые сопротивления слоев $z\cdot10^{-6}$ кг/м²·с				$\frac{\Delta f}{f_\text{ср}}$, %	K_min, %
	z_1	z_2	z_3	z_4		
1	5,8	—	—	—	53	6,9
2	3	12	—	—	79	4,9
3	3	8	22	—	100	3,9
4	2,2	5	12	25	108	3,9

Приведенные формулы записаны в форме, удобной для программирования и вычисления на ЭВМ, операционные системы которых обеспечивают работу с комплексными числами.

Удельная мощность, излучаемая в тыльном направлении, равна $W_1=\frac{1}{2}|v_0|^2 z_\text{в}$. Удельная мощность, излучаемая в прямом направлении, равна $W_2=\frac{1}{2}|v_l|^2\,\mathrm{Re}\,z_l$.

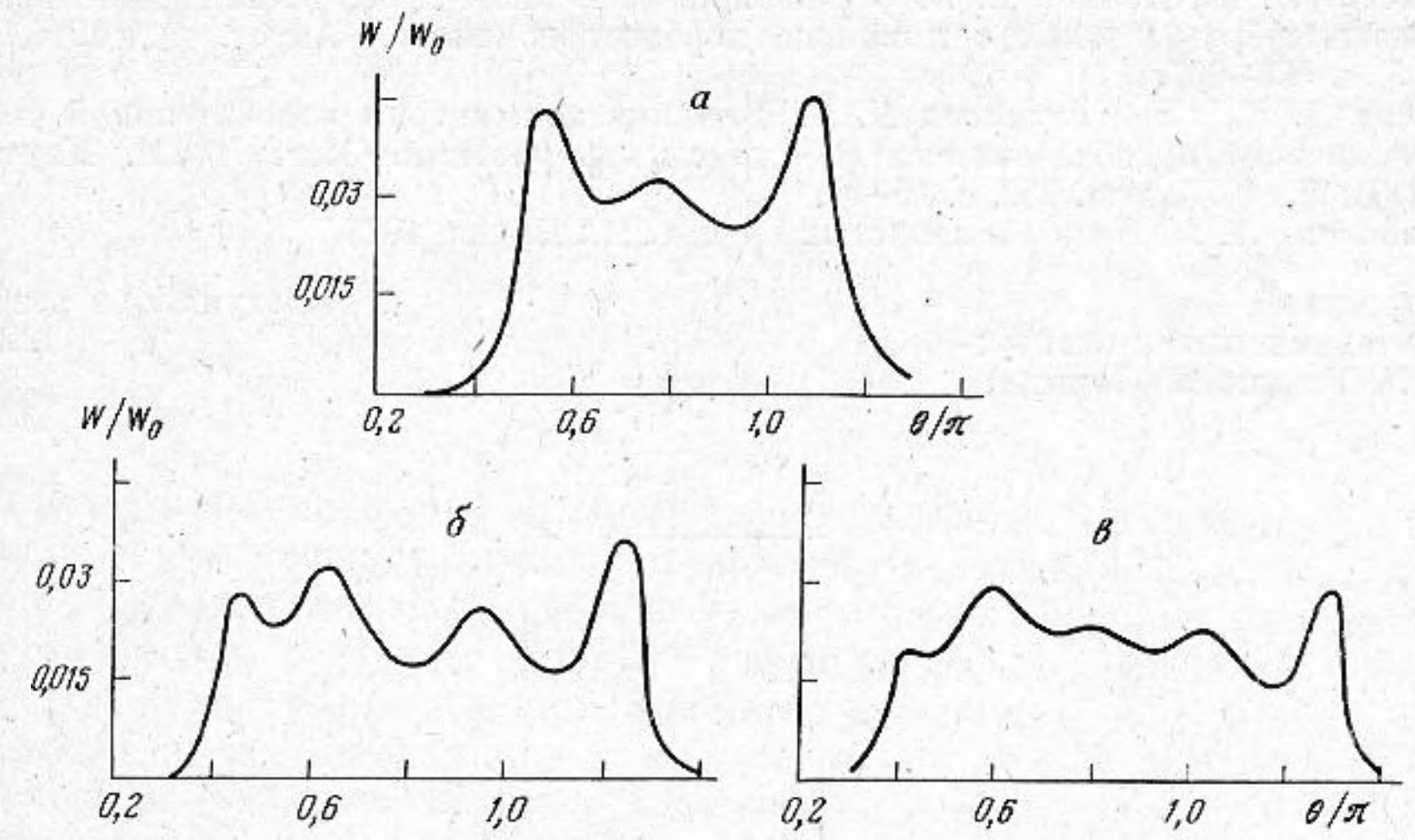
По этим формулам на ЭВМ ЕС-1022 рассчитывались удельные мощности W_1 и W_2 и их отношение $K=W_1/W_2$, характеризующее степень асимметрии излучения преобразователя. Расчеты выполнялись для пьезокерамики ЦТБС-3. На основании расчетов определялись волновые толщины и волновые сопротивления слоев, при которых частотная характеристика излучения в прямом направлении имеет наибольшую ширину полосы пропускания. Волновые толщины всех переходных слоев предполагались одинаковыми. Оптимальное отношение волновой толщины слоя к волновой длине пьезокерамики, как показали расчеты, равно 0,625, что соответствует четвертьволновому слою на частоте резонанса пьезоэлемента ($\theta\simeq0{,}8\pi$). Волновые сопротивления слоев приведены в таблице. Там же приведены величины относительной полосы пропускания $\Delta f/f_\text{ср}$ и минимальные значения K.

Частотные характеристики удельной мощности излучения в прямом направлении при различном числе переходных слоев приведены на фиг. 2. В качестве нормировочного множителя W_0 принята удельная мощность преобразователя без переходных слоев на резонансе при одностороннем излучении. Приведенные характеристики близки к оптимальным, поскольку при дальнейшем уточнении параметров согласующих слоев ширина полосы пропускания изменялась весьма незначительно. Расчеты показали, что оптимальные волновые сопротивления переходных слоев в случае двусторонней нагрузки на воду остаются такими же, как при односторонней нагрузке. Величины полосы пропускания также совпадают с величинами для случая односторонней нагрузки. Причины этого станут ясны из дальнейшего рассмотрения.

На фиг. 3 представлены частотные зависимости коэффициента K. Номера кривых соответствуют числу переходных слоев. Видно, что с увеличением числа согласующих слоев форма кривой становится более прямо-

угольной и расширяется диапазон частот, в котором величины K мало отличаются от минимального значения. Минимальные значения K во всех случаях достигаются внутри полосы пропускания преобразователя. При изменении числа переходных слоев от $n=1$ до $n=4$ минимальное значение K уменьшается от 7 до 4%.

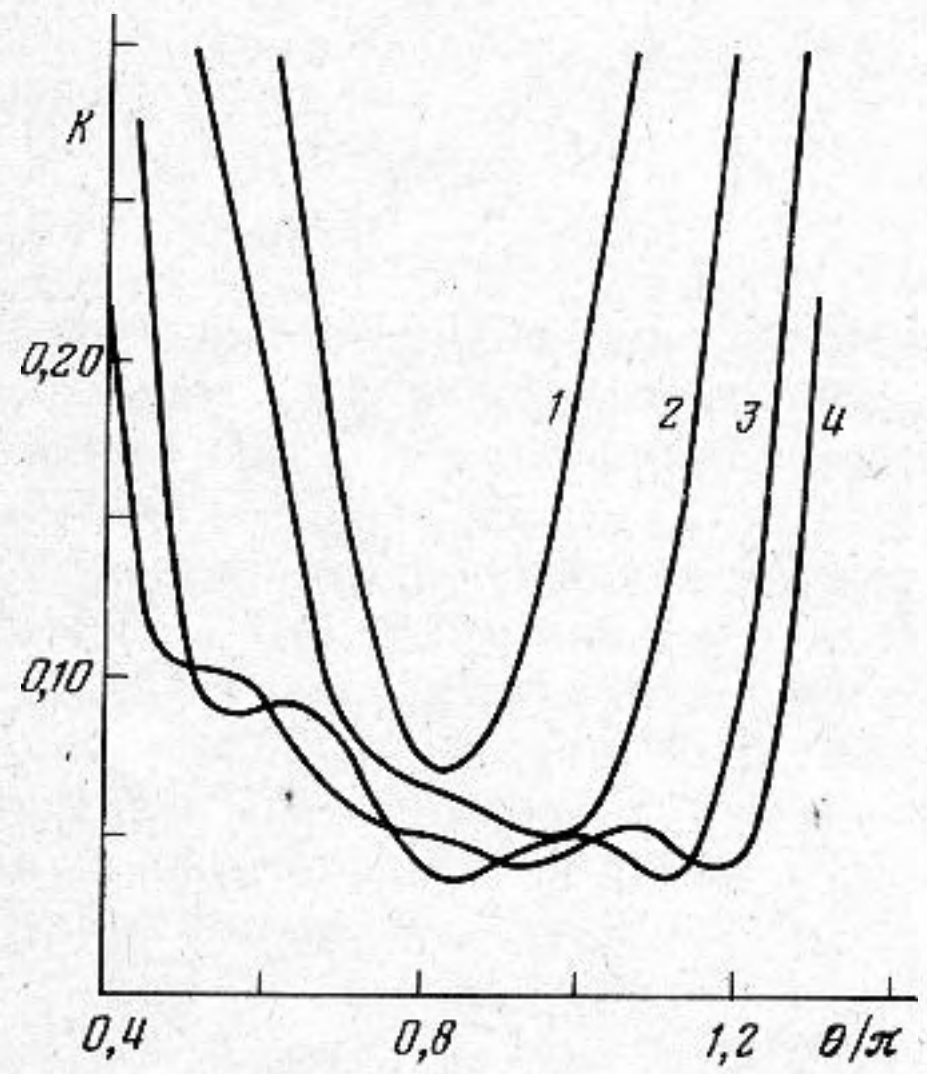
Если для преобразователя с одним переходным слоем однонаправленность сохраняется в узкой полосе частот, то при увеличении числа слоев



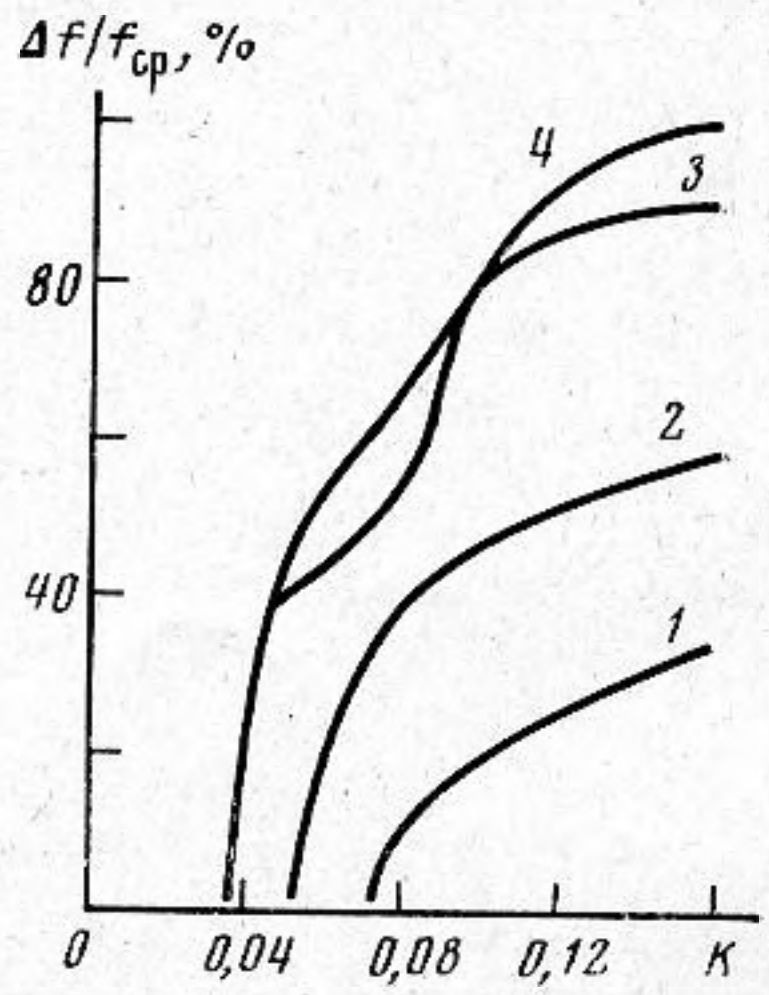
Фиг. 2. Частотные характеристики излучаемой мощности: *а* – $n=2$, *б* – $n=3$, *в* – $n=4$

коэффициент K не превысит значения 7%, соответствующего минимуму для одного переходного слоя, в относительной полосе частот, равной 32% для $n=2$, 48% для $n=3$, 60% для $n=4$.

На фиг. 4 представлены графики относительной полосы частот, в которой величина K не превышает заданного значения. Номера кривых по-



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Частотная зависимость отношения мощностей, излучаемых в прямом и тыльном направлениях

Фиг. 4. Относительная полоса частот, в пределах которой тыльное излучение не превышает заданного уровня

прежнему соответствуют числу слоев. Из приведенных зависимостей наглядно видно преимущество многослойного преобразователя в обеспечении однонаправленности по сравнению со случаем одного переходного

слоя. Таким образом, применение нескольких переходных слоев позволяет получить режим излучения, близкий к одностороннему, в широкой полосе частот. Это, в частности, объясняет совпадение ряда результатов с результатами, полученными в [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев Б. Н., Дианов Д. Б.* О расширении полосы пропускания пьезокерамических преобразователей с помощью переходных слоев.– Акуст. ж., 1974, т. 20, № 5, с. 663–667.
2. *Дианов Д. Б., Константинова Н. Е.* Влияние асимметрии колебательной системы стержневого преобразователя на его характеристики.– Изв. ЛЭТИ. Научн. тр. ЛЭТИ. Л., 1979, вып. 252, с. 25–31.
3. *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.

Ленинградский
электротехнический институт
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию
12.II.1981