

$\Delta C_{ij}/C_{ij}$	$D=10^6 p, \%$	$D=10^7 p, \%$	$D=10^8 p, \%$	Погрешность, %
C_{11}^E	0	+0,02	+0,02	$\pm 0,01$
C_{33}^E	0	0	+0,006	$\pm 0,004$
C_{44}^E	+0,014	-0,01	-0,01	$\pm 0,004$
C_{66}^E	+0,01	+0,05	+0,05	$\pm 0,01$
C_{11}^D	0	0	0	$\pm 0,004$
C_{66}^D	+0,007	-0,01	-0,01	$\pm 0,004$
$\Delta e_{11}/e_{11}$	0	-1,5	-1,5	$\pm 0,4$

удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными по уходу частоты для кристаллов исследованной добротности [3-5].

В заключение отметим, что получаемые рассмотренным выше способом данные могут быть полезны не только при проектировании соответствующих акустоэлектронных устройств, но и при изучении механизмов радиационного воздействия на монокристаллический кварц.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Иванов, Л. Г. Меркулов, В. А. Щукин. Метод прецизионного измерения скоростей ультразвуковых волн в твердых телах. Ультразвуковая техника, 1965, 2, 3-12.
2. А. А. Фотченков, М. М. Шевелько, Л. А. Яковлев. Результаты исследования упругих характеристик синтетического и природного пьезокварца ультразвуковым способом. Изв. ЛЭТИ, 1974, 145, 74-77.
3. A. R. Chi. Effect of X-Ray Irradiation on the Frequency-Temperature Behaviour of AT-cut Quartz Resonators. Phys. Rev., 1957, 107, 6, 1524-1531.
4. J. C. King. The Anelasticity of Natural and Synthetic Quartz at Low Temperature. Bell System. Techn. J., 1959, 38, 2, 573-601.
5. J. C. King, H. H. Sander. Rapid Annealing of Frequency Change in High Frequency Crystal Resonators Following X-Irradiation. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1972, NS-19, 6, 23-32.

Всесоюзный научно-исследовательский институт синтеза минерального сырья, Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступила
10 декабря 1974 г.

УДК 534.232-8

О СПОСОБЕ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ДИСКСТЕРЖНЕВОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ НАПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ

Г. Ф. Львовская

Как известно, в ультразвуковых инструментах с преобразованием направления колебаний можно получить большой коэффициент усиления по амплитуде η (отношение амплитуды рабочего торца инструмента к амплитуде преобразователя).

Наибольшее значение η получается при использовании дискстержневого инструмента со стержнем в качестве рабочего элемента [1, 2]; в таком инструменте помимо эффекта связи между диском и стержнем используется эффект радиальной концентрации в самом диске. Дальнейшего увеличения η можно добиться, применяя диск переменной толщины, утоньшающийся к центру (фиг. 1), поскольку такая конструкция позволяет суммировать два эффекта концентрации. Интересно отметить, что в работе [3] было предложено применять диск переменной толщины, утоньшающийся к краям, в качестве рабочего элемента. При этом повышается амплитуда колебаний рабочей поверхности диска сравнительно с диском постоянной толщины, но два эффекта концентрации, свойственные диску переменной толщины, не суммируются, а действуют противоположно.

Проведем расчет собственных частот и коэффициентов усиления дискостержневой системы с диском, толщина которого уменьшается к центру по степенному закону (наиболее простой для расчета случай). Полученные результаты сравним с результатами для системы с диском постоянной толщины. При расчете будем пользоваться методом, изложенным в работах [2, 4].

Решение уравнения гармонических радиально симметричных плоских колебаний диска, толщина которого $2h(r) = 2ar^\alpha$, где r — текущий радиус, a и α — положительные константы, имеет вид

$$U_r = r^{-\alpha/2} Z_{1/2, \sqrt{\alpha^2 - 4\alpha\nu + 4}}(k_{1\text{пл}}r),$$

где U_r — радиальное смещение, $k_{1\text{пл}} = \omega/c_{1\text{пл}}$ — волновое число продольных волн в диске, $c_{1\text{пл}} = c_1/\sqrt{1-\nu^2}$ — скорость продольных волн в диске, ν — коэффициент Пуассона,

на $c_1 = \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}$ — скорость юнговской волны в материале диска, E_1 — модуль Юнга,

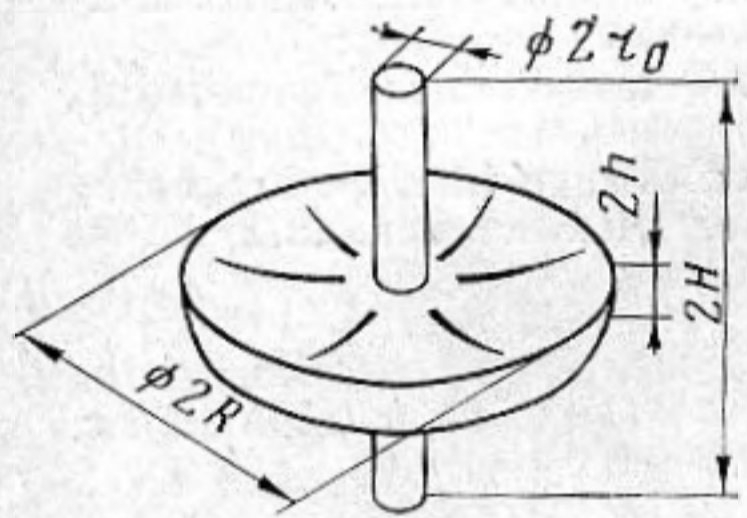
ρ_1 — плотность материала системы, $k_1 = \omega/c_1$; Z — одна из цилиндрических функций или их комбинация.

Для упрощения вычислений выберем величину α такой, чтобы номер цилиндрической функции был целым, т. е. $\alpha^2 - 4\alpha\nu + 4 = 4n^2$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. В этом случае смещения в диске вне элемента связи имеют вид

$$U_r = \frac{1}{r^{\nu + \sqrt{\nu^2 + n^2 - 1}}} [A_1 J_n(k_{1\text{пл}}r) + B_1 N_n(k_{1\text{пл}}r)],$$

где J_n и N_n — функции Бесселя и Неймана соответственно, A_1 и B_1 — постоянные коэффициенты, а радиальная компонента тензора напряжений запишется как

$$\Sigma_{rr} = \frac{E_1}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial U_r}{\partial r} + \nu \frac{U_r}{r} \right] = \frac{E_1}{1-\nu^2} \frac{1}{r^{\nu + \sqrt{\nu^2 + n^2 - 1}}} [A_1 y_0(k_{1\text{пл}}r) + B_1 n_0(k_{1\text{пл}}r)],$$



Фиг. 1

где

$$y_0(k_{1\text{пл}}r) = k_{1\text{пл}} J_{n-1}(k_{1\text{пл}}r) - \frac{n + \sqrt{\nu^2 + n^2 - 1}}{r} J_n(k_{1\text{пл}}r),$$

$$n_0(k_{1\text{пл}}r) = k_{1\text{пл}} N_{n-1}(k_{1\text{пл}}r) - \frac{n + \sqrt{\nu^2 + n^2 - 1}}{r} N_n(k_{1\text{пл}}r).$$

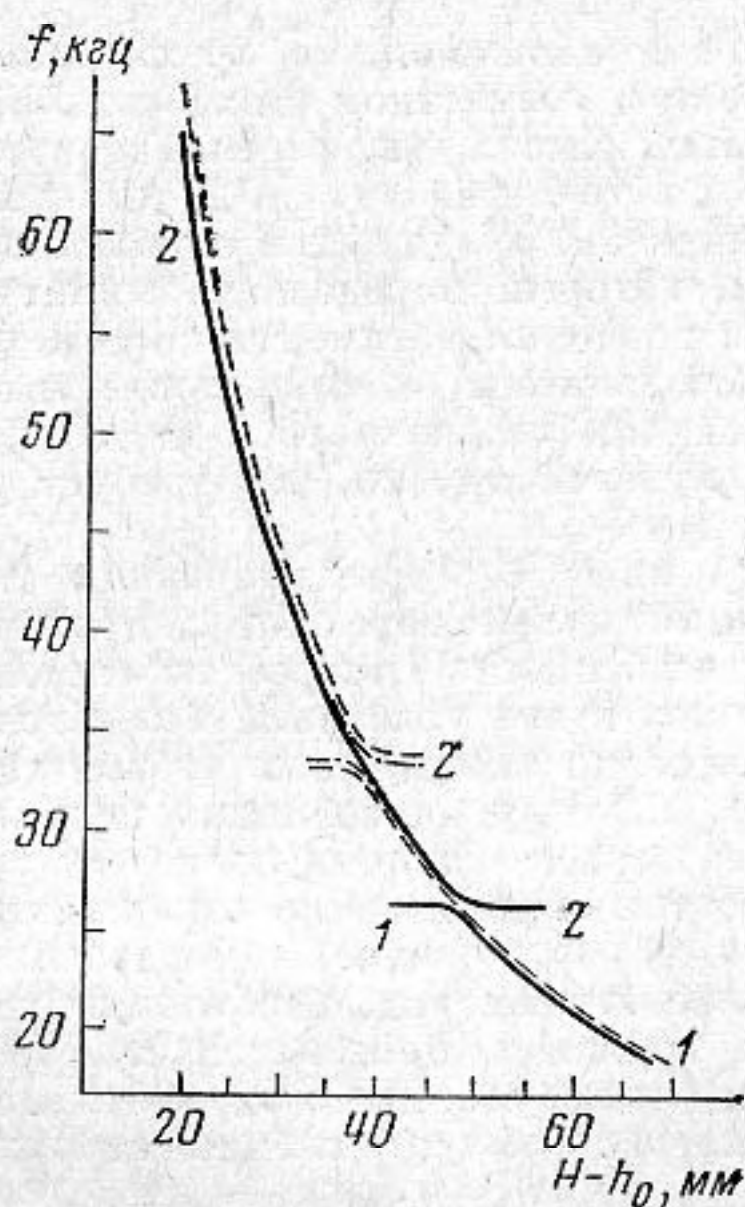
Из граничных условий на свободной цилиндрической поверхности диска и на границах между элементами получим характеристическое уравнение

$$(1) \quad \frac{1-\nu}{1-2\nu} [k_1 h_0 \sin k_1(H-h_0) - \cos k_1(H-h_0)] [y_0(k_{1\text{пл}}R) N_n(k_{1\text{пл}}r_0) - n_0(k_{1\text{пл}}R) J_n(k_{1\text{пл}}r_0)] - r_0 \left[k_1 h_0 \sin k_1(H-h_0) - \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cos k_1(H-h_0) \right] [y_0(k_{1\text{пл}}R) n_0(k_{1\text{пл}}r_0) - n_0(k_{1\text{пл}}R) y_0(k_{1\text{пл}}r_0)] = 0.$$

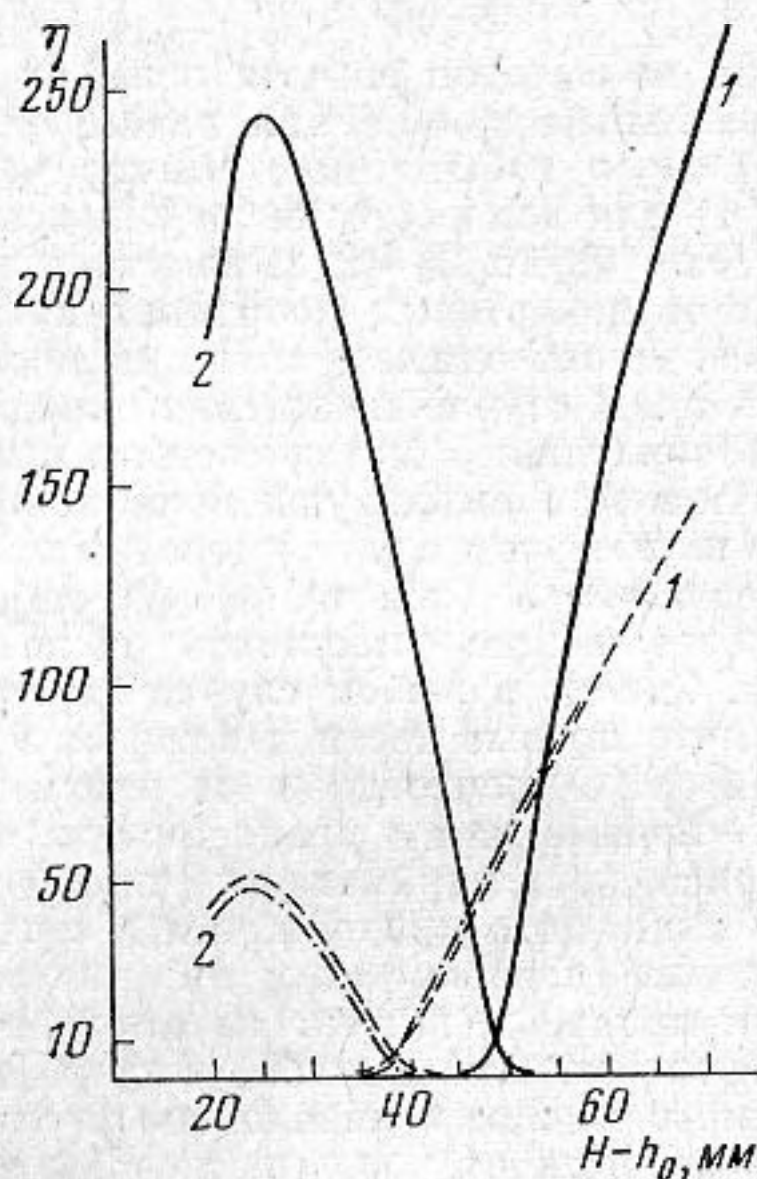
Коэффициент усиления, определяемый как отношение амплитуды колебаний торцов стержня к амплитуде на свободной цилиндрической поверхности диска, равен

$$(2) \quad \eta = \left| \frac{h_0}{r_0} \left(\frac{R}{r_0} \right)^{\nu + \sqrt{\nu^2 + n^2 - 1}} \frac{2\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \frac{[y_0(k_{1\text{пл}}R) N_n(k_{1\text{пл}}r_0) - n_0(k_{1\text{пл}}R) J_n(k_{1\text{пл}}r_0)]}{\left[k_1 h_0 \sin k_1(H-h_0) - \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cos k_1(H-h_0) \right]} \times \frac{[y_0(k_{1\text{пл}}R) N_n(k_{1\text{пл}}R) - n_0(k_{1\text{пл}}R) J_n(k_{1\text{пл}}R)]}{[y_0(k_{1\text{пл}}R) N_n(k_{1\text{пл}}r_0) - n_0(k_{1\text{пл}}R) J_n(k_{1\text{пл}}r_0)]} \right|.$$

По формулам (1) и (2) были проведены вычисления при $n=1$ для следующих параметров системы: $\nu=0,29$; $c_1=5200$ м/сек; $R=52$ мм, $r_0=6$ мм, $h_0=h(r_0)=0,52$ мм, $\alpha=1,16$, $h(R)=6,4$ мм. Численные результаты приведены на фиг. 2 (резонансные частоты) и фиг. 3 (значения η) сплошными линиями для диска переменной толщины, штриховыми и штрихпунктирными линиями для дисков постоянной толщины, рав-



Фиг. 2



Фиг. 3

ной соответственно $2h(R)$ и $2h_0$. Нумерация кривых на фиг. 3 соответствует нумерации кривых на фиг. 2.

Из фиг. 3 видно, что, как и следовало ожидать, система с диском переменной толщины дает большие коэффициенты усиления, чем система с диском постоянной толщины.

В дальнейшем желательно исследовать системы с дисками переменной толщины при других законах ее изменения и найти наиболее выгодную с точки зрения получения большого усиления форму диска.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Гинин, А. В. Стамов-Витковский, Б. Г. Мамет. Ультразвуковой преобразователь. Авт. свид. № 281047. Бюл. изобрет., № 28, 1970.
2. Г. Ф. Поволоцкая. Теоретическое исследование инструментов с преобразованием направления колебаний. Акуст. ж., 1974, 20, 1, 87—94.
3. К. Itoh, E. Mori. Studies on Resonator with Directional Converter (R—L Type Converter with Circular Disk of Various Thickness). J. Acoust. Soc. Japan, 1974, 30, 11, 587—591.
4. Г. Ф. Поволоцкая. Расчет двухстержневого ультразвукового инструмента, работающего с малой активной нагрузкой. Акуст. ж., 1975, 21, 4, 598—604.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
24 декабря 1975 г.