

10. В. А. Буров, В. А. Красильников. Непосредственное наблюдение искажения формы интенсивных ультразвуковых волн в жидкости. Докл. АН СССР, 1958, 118, 5, 920—923.
11. С. С. Кугателадзе и др. О структуре слабой ударной волны в газожидкостной среде. Докл. АН СССР, 1972, 207, 2, 313.

Акустический институт  
Академии наук СССР

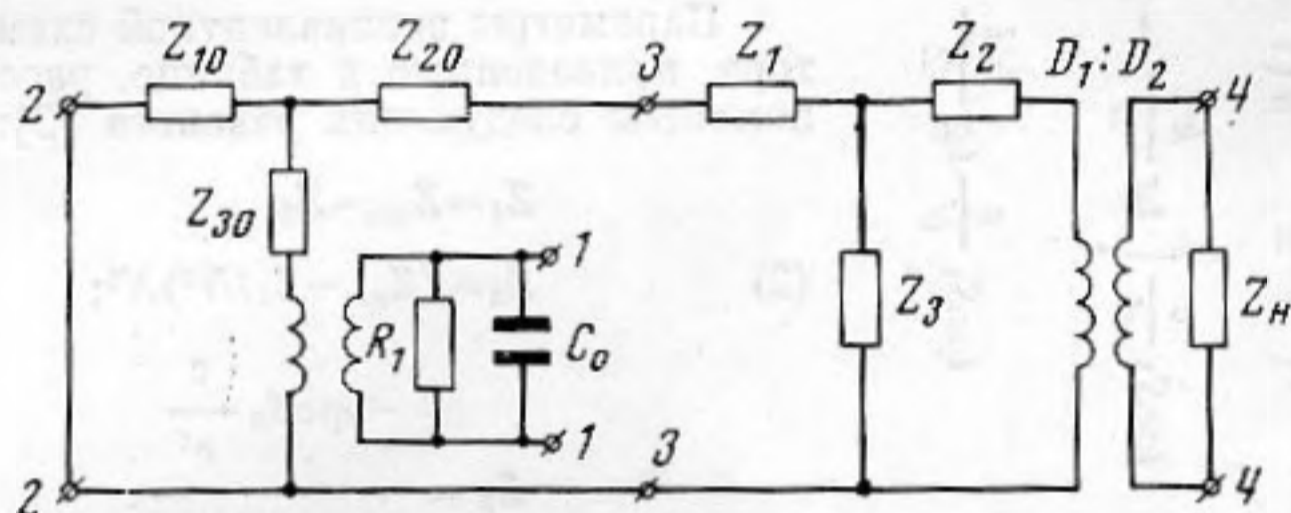
Поступила  
21 декабря 1973 г.

УДК 534.232

## ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ

А. Я. Снытко

Волноводы переменного сечения — концентраторы — находят широкое применение в технике ультразвука для увеличения амплитуды колебаний рабочего конца ультразвуковых инструментов. В работе [1] Меркуловым рассмотрена теория концентраторов трех типов: конического, экспоненциального, катеноидального. Эти концентраторы обладают приблизительно одинаковым коэффициентом усиления амплитуды при малых значениях параметра  $N$  ( $N < 5$ ), где  $N = \frac{D_1}{D_2}$ ,  $D_1$  и  $D_2$  — диаметры входного и выходного сечения концентратора. При больших значениях  $N$  у катеноидального концентратора усиление больше, чем у экспоненциального, а у экспоненциального существенно больше, чем у конического.



Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя, нагруженного через концентратор

Расчислявая колебательную систему, состоящую из магнитострикционного или пьезоэлектрического преобразователей и однородного волновода, часто пользуются методами теории четырехполюсников, представляя преобразователь и волновод в виде Т-образной или П-образной эквивалентной схемы. Расчет упрощается, если для определения резонансной частоты колебательной системы и входных импеданцев волноводных нагрузок применяется номограмма Вольперта [2, 3]. Аналогичный метод расчета можно применить и для преобразователей с концентраторами, если концентратор представить эквивалентной схемой.

В радиотехнике [2] известен прием построения эквивалентной схемы несимметричного четырехполюсника (в качестве которого может рассматриваться концентратор) в виде однородного волновода и двух трансформаторов на его входе и выходе. Однако этот прием не удобен из-за громоздких выражений для эквивалентной постоянной распространения и для коэффициентов трансформации, которые в данном случае зависят от длины волновода. Рассмотрим другой, более удобный способ построения эквивалентной схемы ультразвукового концентратора в виде несимметричного четырехполюсника и последовательно подключенного к нему трансформатора с коэффициентом трансформации  $N$ . Применительно к экспоненциальному концентратору этот способ использован в работе [4].

Эквивалентная схема для колебательной системы, состоящей из пьезоэлектрического стержневого преобразователя и концентратора, нагруженного на импеданс  $Z_H$ , представлена на фигуре. Параметры схемы определены в таблице для всех трех типов концентраторов. На фигуре и в таблице приняты следующие обозначения:  $Z_{10}$ ,  $Z_{20}$ ,  $Z_{30}$  — импедансы Т-образной схемы преобразователя;  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  — импедансы Т-образной схемы концентратора;  $S_0$  — площадь поперечного сечения преобразователя;  $S_1$  и  $S_2$  — площадь входного и выходного сечений концентратора;  $l_0$  — длина преобразователя;  $l$  — длина концентратора;  $\rho_0$  и  $\rho_1$  — плотность материала преобразователя.



Тип устройства	$Z_{10}, Z_1$	$Z_{20}, Z_2$	$Z_{30}, Z_3$	Волновое число	$1/N$	$S(x)$
Преобразователь	$i\rho c_0 S_0 \operatorname{tg} \frac{k_0 l_0}{2}$	$i\rho c_0 S_0 \operatorname{tg} \frac{k_0 l_0}{2}$	$-\frac{i\rho c_0 S_0}{\sin k_0 l}$	$k_0$	1	1
Конический концентратор	$i\rho c S_1 \left( \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{\alpha}{k} \right)$	$i\rho c S_1 \left( \operatorname{tg} \frac{kl}{2} - \frac{\alpha}{k(1-\alpha l)} \right)$	$-\frac{i\rho c S_1}{\sin kl}$	$k$	$1 - \alpha l$	$S_1 (1 - \alpha x)^2$
Экспоненциальный концентратор	$i\rho c S_1 \frac{c}{c'} \left( \operatorname{tg} \frac{k'l}{2} + \frac{\beta}{k'} \right)$	$i\rho c S_1 \frac{c}{c'} \left( \operatorname{tg} \frac{k'l}{2} - \frac{\beta}{k'} \right)$	$-\frac{i\rho c S_1 \frac{c}{c'}}{\sin k'l}$	$k' = \sqrt{k^2 - \beta^2}$	$e^{-\beta l}$	$S_1 e^{-2\beta x}$
Катеноидальный концентратор	$i\rho c S_1 \frac{c}{c'} \left( \operatorname{tg} \frac{k'l}{2} + \frac{\gamma \operatorname{th} \gamma l}{k'} \right)$	$i\rho c S_1 \frac{c}{c'} \operatorname{tg} \frac{k'l}{2}$	$-\frac{i\rho c S_1 \frac{c}{c'}}{\sin k'l}$	$k' = \sqrt{k^2 - \gamma^2}$	$ch \gamma l$	$S_2 ch(l-x)\gamma$

зователя и концентратора соответственно;  $c_0$  и  $k_0$  — скорость звука и волновое число для преобразователя;  $c'$ ,  $k'$  и  $c$ ,  $k$  — скорость звука и волновое число для концентратора и для изготовленного из того же материала волновода постоянного сечения соответственно;  $C_0$  и  $R_1$  — собственная емкость зажатого преобразователя и сопротивление его электрических потерь;  $\alpha = \frac{1-1/N}{l}$ ;  $\beta = \frac{\ln N}{l}$ ;  $\gamma = \frac{\operatorname{Arch} N}{l}$ ;  $S(x)$  — закон

изменения площади сечения концентратора вдоль оси колебательной системы.

При определении параметров эквивалентной схемы концентратора были использованы данные работы [1] для колебательных скоростей  $V_1$  и  $V_2$  и сил  $F_1$  и  $F_2$ , соответствующих его входному и выходному сечениям. С помощью этих величин вычислялись импедансы холостого хода (обозначены индексами «хх») и короткого замыкания (индексы «кз») на входе и выходе концентратора (индексы 1 и 2 соответственно).

$$(1) \quad \begin{aligned} Z_{xx1} &= - \left[ \frac{F_1}{V_1} \right]_{V_2=0}; & Z_{кз1} &= - \left[ \frac{F_1}{V_1} \right]_{F_2=0}; \\ Z_{xx2} &= \left[ \frac{F_2}{V_2} \right]_{V_1=0}; & Z_{кз2} &= \left[ \frac{F_2}{V_2} \right]_{F_1=0}. \end{aligned}$$

Параметры эквивалентной схемы концентратора, приведенные в таблице, рассчитывались с помощью следующих равенств [2]:

$$(2) \quad \begin{aligned} Z_1 &= Z_{xx1} - Z_3; \\ Z_2 &= (Z_{xx2} - Z_3/N^2)N^2; \\ Z_3 &= \frac{-i\rho c S_0 \frac{c}{c'}}{\sin k'l}. \end{aligned}$$

Эквивалентность схемы соответствующему концентратору подтверждается равенством импедансов холостого хода и короткого замыкания, полученных расчетом по формулам работы [1] и непосредственно из схем.

Как видно из таблицы, в частном случае при соблюдении условия:

$$(3) \quad \operatorname{tg} \frac{k'l}{2} \gg \begin{cases} \frac{\alpha}{k(1-\alpha l)} & \text{— для конического концентратора,} \\ \beta/k' & \text{— для экспоненциального концентратора,} \\ \gamma \operatorname{th} \gamma l/k' & \text{— для катеноидального концентратора} \end{cases}$$

параметры эквивалентной схемы  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_3$  рассчитываются для концентратора так же, как и для волновода постоянного сечения. Однако в отличие от схемы однородного волновода схема концентратора содержит трансформатор  $D_1 : D_2$ , преобразующий сопротивление нагрузки в  $N^2$  раз.

Применение эквивалентных схем концентраторов позволяет перенести все выводы относительно оптимального выбора параметров составной колебательной системы с волноводами постоянного сечения [5] на систему преобразователь — концентратор или любую другую комби-



нированную систему. При несоблюдении условия (3) расчеты производятся с помощью выражений, приведенных в таблице.

При условии  $\alpha, \beta, \gamma \rightarrow 0$ , имеем  $k' \rightarrow k, c' \rightarrow c, D_2 \rightarrow D_1$ , и эквивалентная схема концентратора переходит в эквивалентную схему волновода постоянного сечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Г. Меркулов. Расчет ультразвуковых концентраторов. Акуст. ж., 1957, 3, 3, 230—238.
2. Х. Мейнке, Ф. Гундлах. Радиотехнический справочник, т. 1 (пер. с нем.), М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
3. А. Я. Снытко. К методике расчета параметров стержневых пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей с волноводами. Тезисы докл. на VII Всес. акуст. конф. Л., 1971, 196.
4. E. A. Neppiras. Mechanical consideration in transducer analysis. Ultrasonic Review. May 1963, 3—4.
5. И. П. Голямина, Ю. А. Рыжкин, Н. А. Хлопотунова. Оптимальные частоты для составных ультразвуковых колебательных систем. Тр. VI Междунар. акуст. конгр. Токио, 1968, VI, K85—K88.

Акустический институт  
Академии наук СССР

Поступила  
22 октября 1971 г.

