



ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УРОВНЕМЕРОВ

С. А. НАЙДА, д-р техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Получены соотношения для расчета преобразователя с высокой модой изгибных колебаний. В преобразователе применяется многослойное согласующее покрытие. В результате обеспечивается возможность определения уровней до 61 м, а амплитуда колебательной скорости на рабочей поверхности достигает величины, достаточной для ее самоочищения.

Relationships were derived for design of transducers with a high mode of bending vibrations. A multilayered matching coating is used in the transducer. As a result, the possibility of determination of up to 61 m levels is provided, and the amplitude of vibrational speed on the working surface reaches the value sufficient for its self-cleaning.

Действие большинства УЗ уровнемеров основано на измерении времени распространения УЗ волн в воздухе от преобразователя до контролируемой поверхности и обратно при известной (или измеряемой) скорости звука [1–6].

Наибольшее распространение получили эхоимпульсные воздушные уровнемеры. Длительность зондирующих импульсов в них $t_{\text{и}}$ не должна превышать удвоенного времени распространения ультразвука от преобразователя до контролируемой поверхности при минимальном расстоянии L_{min} до этой поверхности:

$$\tau_{\text{и}} \leq \frac{2L_{\text{min}}}{c}, \quad (1)$$

где c — скорость звука в воздухе.

Воздушное зондирование в диапазоне частот 10...200 кГц применяется для сыпучих тел и жидкостей с большим затуханием. Основным источником погрешностей при таком способе измерений заключается в зависимости скорости распространения от температуры воздуха:

$$\alpha = \Delta c / \Delta t = 0,59 \text{ м/с} \cdot \text{°С}. \quad (2)$$

При $\Delta t = 50 \text{ °С}$ значение $\Delta c = 0,59 \cdot 50 \cong 30 \text{ м/с}$ составляет 10 % скорости $c = 340 \text{ м/с}$. Включение в схему прибора опорного (реперного) канала для компенсации изменения скорости частично исключает эту погрешность. В большинстве случаев реперный канал представляет собой дополнительный преобразователь, установленный на фиксированном расстоянии l от реперного отражателя, т. е. в пределах мертвой зоны обычно $l = 0,5 \text{ м}$. При этом, естественно, остается погрешность, обусловленная наличием градиента скорости УЗ по высоте емкости.

Существенное затруднение представляет создание эффективных излучателей УЗ для газовой среды. Удовлетворительного согласования с акустическим импедансом среды в случае пьезоэлек-

трических преобразователей удается достичь с использованием изгибных мод колебаний излучающего элемента. Приемники, как правило, тоже применяют пьезоэлектрические.

Для случая совмещенного преобразователя важным фактором является отношение принятого сигнала к уровню помех (шумов). Это отношение ограничивает возможности уровнемера, диапазон его работы и мертвую зону, где сигнал не может быть принят из-за большой амплитуды послезвучания датчика. Обычно зона составляет 0,5 м при добротности акустических датчиков $Q \cong 50$. Длительность зондирования определяется необходимостью иметь 10...20 колебаний высокой частоты в канале радиоимпульса ($t_{\text{и}} = (10...20)T$). Тогда при частоте 50 кГц ($T = 20 \text{ мкс}$) получаем требуемую длительность 0,2...0,4 мс.

Из-за наличия давления в контролируемой емкости, влияния ее стенок, необходимости измерения слоя жидкости, состава газа и температуры к уровнемерам предъявляют более жесткие требования относительно конструкций акустических датчиков и к построению электронных схем. Считалось, что для эксплуатации в промышленных условиях наиболее приемлемой конструкцией акустического датчика для измерения и приема УЗ колебаний в воздухе (газе) является «пьезоэлектрический преобразователь с преобразованием поршневых толщинных колебаний в изгибные с применением согласующих крышек резонаторов и рупоров». Механизм такого преобразования автор [4] не раскрывает.

Рассмотрим современные преобразователи серии LR (long range) фирмы «Milltronics», которые обеспечивают максимальную передачу акустической энергии и гарантируют эффективную работу в диапазонах до 61 м в самых сложных условиях в различных отраслях промышленности. Режим акустической вибрации позволяет работать без техобслуживания в условиях высокой запы-



ленности, турбулентности паров и электромагнитных помех.

Параметры преобразователей серии LR приведены в табл. 1, а конструкция представлена на рис. 1 [7]. Изгибные колебания диска возбуждаются с помощью привода, скрепленного с диском в его центре. В результате отражения от окружности закрепления диска в корпусе в нем возникает стоячая в радиальном направлении волна, в которой смещения и скорости в смежных пучностях имеют противоположные знаки, поэтому излучение в тыльную сторону отсутствует.

С фронтальной стороны эффективность излучения увеличивается в результате наложения определенным образом многослойного материала, согласующего акустические импедансы. Разработанная и запатентованная Milltronics многослойная система обеспечивает возможность определения уровней до 61 м.

Получить соотношения для расчета этой системы и явилось целью настоящей работы.

Следует отметить еще одно преимущество преобразователя типа LR, которое не отмечается в работах [7, 8]: он значительно легче из-за отсутствия цилиндра из пьезокерамики. Поэтому может подвешиваться на кабеле, что приводит к значительному уменьшению акустических помех по фланцу, а следовательно, увеличению отношения сигнал–шум.

Поскольку пьезопреобразователи с изгибной модой колебаний тоже должны характеризоваться указанным преимуществом, нами были проанализированы возможности их создания и в случае больших диаметров. Препятствием для этого является возбуждение, аналогично громкоговорителям [11], высокомодовых колебаний и падение эффективности излучения. Один из путей устранения паразитных колебаний используется при создании пьезоэлементов УЗ сканеров: разбиение элемента на электрически соединенные, но акустически изолированные пьезоэлементы. Правда, и используются не изгибные, а толщинные колебания.

Изгибные колебания тонкого диска. Свободные колебания. Основой акустического излучателя–приемника уровнемеров LR-21, LR-13 является тонкий диск радиусом a , не имеющий натяжения и зажатый по контуру. Вывод волнового уравнения свободных колебаний пластины требует ряда сложных рассуждений и да-

ется подробно в курсах теории упругости. Оно имеет следующий вид [9, 10]:

$$\nabla^4 y - k^4 y = 0, \quad (3)$$

где ∇ — оператор дифференцирования; $y(t) = y(r, \varphi)e^{-i\omega t}$, $y(r, \varphi)$ — распределение амплитуд смещения; $k^4 = \omega^2 \rho h / D$; $D = Eh^3 / 12(1 - \sigma^2)$ — цилиндрическая жесткость на изгиб; E — модуль упругости (Юнга); σ — коэффициент Пуассона материала диска; h и ρ — его толщина и удельная плотность.

Видно, что уравнение (3) распадается на два уравнения:

$$\nabla^2 y + k^2 y = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 y - k^2 y = 0. \quad (6)$$

В полярных координатах решение уравнения (5) будет:

$$Y = \frac{\cos}{\sin} m \varphi J_m(kr),$$

где m — целое число; J_m — функция Бесселя первого рода m -го порядка.

Решение уравнения (6) получаем заменой k на ik :

$$Y = \frac{\cos}{\sin} m \varphi I_m(kr),$$

где $I_m(kr) = i^{-m} J_m(ikr)$ — модифицированная или гиперболическая функция Бесселя m -го порядка.

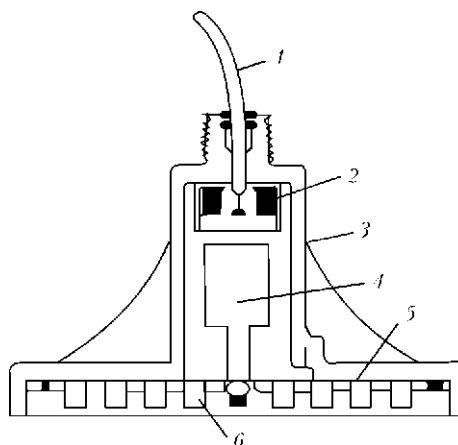


Рис. 1. Конструкция преобразователя серии LR: 1 — кабель; 2 — преобразователь; 3 — алюминиевый корпус; 4 — привод; 5 — диск с изгибной модой колебаний; 6 — устойство для согласования акустических импедансов, изготовленное из пенопласта

Таблица 1. Параметры преобразователей фирмы «Milltronics» серии LR

Тип	Частота, кГц	Максимальный диапазон, м	Угол излучения, град.	Температура, °С	Диаметр преобразователя, мм	Диаметр фланца, мм
LR-21	21	30	5,5	-40 +77	172	267
LR-13	13	61	5,5	-40 +77	268	356



Общее решение уравнения (3) имеет вид:

$$Y(r, \varphi) = \frac{\cos}{\sin} m\varphi [AJ_m(kr) + BI_m(kr)]. \quad (7)$$

Граничные условия, соответствующие зажатому по контуру радиуса α диску, следующие:

$$Y(r, \varphi) = 0, \\ dY/dr_{r=\alpha} = 0.$$

Первое условие будет удовлетворено, если положить

$$B = -A \frac{J_m(ka)}{I_m(ka)}, \quad (8)$$

а второе — если взять значение k , удовлетворяющее условию

$$I_m(kr) \frac{d}{dr} J_m(kr) - J_m(kr) \frac{d}{dr} I_m(kr) = 0 \text{ при } r = a. \quad (9)$$

Собственные частоты колебаний такого диска определяются выражением:

$$f_{mq} = \frac{\pi h}{4a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \cdot \beta_{mq}^2, \quad (10)$$

где $\beta_{mq} = \frac{(ka)_{mq}}{\pi}$, $(ka)_{mq}$ — q -й корень уравнения (9).

Ограничившись случаем $m = 0$, получим:

$$\beta_{01} = 1,015; \beta_{02} = 2,007; \beta_{03} = 3,000; \beta_{0q} \xrightarrow{q \rightarrow \infty} q. \quad (11)$$



Рис. 2. Рабочая поверхность преобразователя LR-13

В результате свободных колебаний диска в нем устанавливается стоячая по радиусу волна, причем узловые радиусы определяются выражением:

$$r_{0q} = \frac{\pi}{k} \beta_{0q} = a \frac{\beta_{0q}}{\beta_{0\max}}. \quad (12)$$

Их необходимо знать для размещения на поверхности диска элемента двойного акустического согласования. Условие тонкой пластины, а следовательно, и применимости приведенных выше выражений имеет вид:

$$hk \ll 1, \quad (13)$$

или с учетом того, что $k = \frac{\pi}{a} \beta_{0\max}$,

$$\frac{\pi h}{a} \beta_{0\max} \ll 1. \quad (14)$$

Время установления режима стоячей волны, будет:

$$\tau_{уст} = \frac{2ak}{\omega} = \frac{4a}{\sqrt{E/3\rho(1-\sigma^2)}} \frac{1}{(\pi h/a) \beta_{0\max}}. \quad (15)$$

При возбуждении импульсами УЗЧ полученные выражения применимы, если

$$\tau_u \gg \tau_{уст} \quad (16)$$

Для сопоставления выражения (9) с расположением узловых радиусов в датчике LR-13 (рис. 2) [7] были измерены диаметры окружностей, отделяющих канавки от выступов в пенопласте и выявлено, что углубление в центре объединяет области с $q = 1$ и $q = 2$, т. е. первым узловым радиусом является r_2 . Отношения последующих радиусов к r_2 представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что уже при $q \geq 4$ измеренное отношение находится между теоретическими, но ближе к отношению корней функции Бесселя. Это можно объяснить следующим образом. Функции Бесселя являются решением уравнения (5) Бесселя, которое является также уравнением колебаний мембраны, и описывают две бегущие волны. Гиперболические функции Бесселя $I_m(ka)$ являются решением уравнения (6) и описывают экспоненциально убывающие с расстоянием волны. Поэтому для эффективного использования всей поверхности диска необходимо, чтобы второй член в квадратных скобках выражения (7) на большей части поверхности был мал, что и достигается коррекцией радиуса α при заданной частоте резонанса.

Таблица 2. Отношение последующих радиусов к r_2 , измеренное и полученное с учетом значений выражений (11), и для $J_0(kr)_q$

q	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
r_q/r_2	1	1,56	2,00	2,7	3,15	3,75	4,25	4,82	5,40	6,0	6,45
для (11)	1	1,50	2,00	2,5	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,5	6,00
$J_0(kr)$	1	1,58	2,14	2,7	3,28	3,85	4,40	5,00	4,47	6,1	6,7



Вынужденные колебания. Поскольку в интересующем нас случае распределение свободных колебаний по поверхности диска аналогично распределению по поверхности мембраны, можно воспользоваться результатами рассмотрения вынужденных колебаний мембраны [9]. Круглые мембраны используются обычно в микрофонах. Колебания таких мембран, а также диска равномерного распределенной по их поверхности силы, обусловленной звуковым давлением, в связи с чем смещения симметричны относительно центра, т. е. при заданном r не зависят от φ . Решение неоднородного уравнения установившегося режима и амплитуды смещения будет иметь вид:

$$y = AJ_0(kr) - \frac{P_m}{P\omega^2}, \quad (17)$$

где P_m — амплитуда давления.

Величина A определяется из граничного условия $y(a) = 0$. Тогда

$$y = \frac{P_m}{P\omega^2} \left[\frac{J_0(kr)}{J_0(ka)} - 1 \right]. \quad (18)$$

Как видим, при тех значениях ka , когда $J_0(ka) = 0$, функция $y \rightarrow \infty$, т. е. наблюдаются резонансы, так что резонансные частоты совпадают с собственными частотами колебаний мембраны

$$ka = \pi\beta_{0n} \cong (n - \frac{1}{4})\pi. \quad (19)$$

Отметим, что в микрофонах $ka < 1$, тогда как в нашем случае, наоборот, $ka \gg 1$ (при $n = 12$, $ka = 36,8$).

Многослойное двумерное согласование. Техника двумерного согласования в литературе не рассматривалась, а была запатентована фирмой «Milltronics». Рассмотрим режим излучения. Известно [10], что влияние среды, окружающей мембрану, зависит прежде всего от того, происходит ли распространение волн в среде быстрее или медленнее, чем распространение изгибных волн в самой мембране. Если средой является воздух, то случай, когда $v_{ср} \ll v_{мб}$, практически встречается редко, но расчет установившегося движения при этом не вызывает затруднений.

В случае $v_{ср} \ll v_{мб}$ эффективность движения одной части поверхности быстро передается через среду и влияет на другие участки, так что в пределе реакция среды однородна по всей мембране и пропорциональна среднему смещению \bar{y} .

Однако даже в случае тяжелой мембраны влиянием среды в первом приближении можно пренебречь. Это тем более можно сделать в случае пластины (диска).

Наиболее просто сделать диск излучающим можно, закрыв через одну кольцевые зоны между узловыми диаметрами акустическими экранами,

расположенными от диска на небольшом расстоянии. Тогда незакрытые зоны, колеблющиеся в фазе, будут действовать как поршень, и излучать звук в среду. Правда, интенсивность излучения в воздух из-за большой разницы акустических импедансов диска и воздуха будет малой. Увеличить ее можно, наклеив на излучающие зоны четвертьволновые слои с промежуточным значением импеданса. Однако такая система негерметична и непригодна для работы в сильно запыленной среде.

Решение проблемы состоит в следующем. На весь диск наклеивается пенопласт с канавками, глубина которых такая, что разность фаз колебаний, распространяющихся по пенопласту и воздуху, равна π . Это условие можно записать в виде

$$l = \frac{\lambda_B}{2} \frac{1}{1 - v_B/v_{п}}, \quad (20)$$

где v_B , $v_{п}$ — скорости распространения звука в воздухе и пенопласте соответственно.

Выбираем толщину пенопласта по дну канавки, равной $\lambda_{п}/4$, и полагаем

$$l = n\lambda_{п}/2, \quad (21)$$

т.е. путь звука в пенопласте нечетно кратен $\lambda_{п}/4$. Тогда с учетом (20) условие (21) принимает вид:

$$\frac{v_{п}}{v_B} = \frac{1+n}{n}. \quad (22)$$

Пусть, например, $f = 13$ кГц ($\lambda_B = 2,62 \cdot 10^{-2}$ м) и $n = 1$, тогда $\lambda_{п} = 5,25 \cdot 10^{-2}$ м, $\lambda_{п}/4 = 1,31 \cdot 10^{-2}$ м, $\lambda_{п}/2 = 2,62 \cdot 10^{-2}$ м. Таким образом, толщина пенопласта по дну канавки равна 1,3 см, а общая — 3,9 см; $v_{п} = 2v_B = 680$ м/с. Близкое значение скорости продольных волн $v_{п} = 850 \pm 10$ м/с имеет, например, пенополиуретан ППУ-3 с объемным весом $\rho = 2,00$ кг/м³ (для воздуха $\rho_B = 1,22$ кг/м³). Однако применение только одного четвертьволнового согласующего слоя, представляющего в месте контакта с ним пластины удельную акустическую нагрузку $z_{вх} = z_{сл}^2/z_B = 69 \cdot 10^6$ Па·с/м, создает торможение диска.

Учитывая, что $L_{min} = 0,9$ м для LR, получаем согласно (1) $\tau_{п} \leq 5,3$ мс.

Для частоты 13 кГц ($T = 7,8$ мкс) это составляет $f \tau_{п} = 69$ периодов, тогда как для измерения достаточно всего (10...20) периодов, т. е. в 3...7 раз меньше. Такое превышение длительности импульса необходимо для «встряхивания» пыли или конденсированных на поверхности паров жидкости.

Пример расчета пьезопреобразователя с высокой модой изгибных колебаний. Ориентируясь на максимальную дальность в пыльной среде 30 м, выберем частоту и размер диска, равными использованным в датчике LR-21 ($f = 21$ кГц, $a = 12,7$ см).



1. Определим толщину диска из выражения (10) и взяв $\beta_{012} = 11,75$ в соответствии с (19):

$$h = \frac{4a^2 f_{012}}{\pi \beta_{012}^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 3,26 \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \text{ (м)}.$$

Для стали $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 8 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma = 0,265$:

$$\sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}, h_{ст} = 1,1 \text{ мм};$$

для алюминия (дюралю) $E = 0,774 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma = 0,353$:

$$\sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 3,32 \cdot 10^3 \text{ м/с}, h_{Al} = 0,98 \text{ мм}.$$

2. Определим величину k из соотношения

$$k = \frac{\pi}{a} \beta_{012} = 2,9 \cdot 10^2, \text{ и}$$

$$v_{изл} = \frac{\omega}{k} = 4,55 \cdot 10^2 \text{ м/с} < 8 \cdot 10^2 \text{ м/с}$$

где $8 \cdot 10^2$ м/с — скорость звука в пенопласте.

3. Проверяем условие тонкой пластины

$$h_{ст,Al} k \cong 0,29 \ll 1.$$

Индукционный привод диска. Индукционный привод диска (рис. 2) представляет собой трансформатор, многослойная первичная обмотка которого закреплена, а вторичная образована цилиндром из ферромагнитного материала, скрепленного жестко с центральной частью диска. Снаружи первичной обмотки находится замкнутый цилиндр определенной формы, сжимающий переменное магнитное поле по оси подвижного цилиндра-якоря. Переменный ток вызовет силу притяжения якоря дважды за период тока, так как наводимая во вторичной обмотке ЭДС и ток будут иметь противоположное направление по отношению к первичной обмотке.

При большой величине тока в подвижном цилиндре будет наводиться индукция насыщения, вектор которой будет иметь в основном продоль-

ную компоненту, так как длина цилиндра намного больше толщины стенок.

При движении диска под действием эхо-сигнала переменный магнитный поток через соленоид, обусловленный намагниченностью подвижного цилиндра, создает в обмотке ЭДС. Поскольку частота эхо-сигнала в два раза больше частоты возбужденного тока, то цепи генератора и приемника не оказывают взаимного влияния.

Выводы

Получены соотношения для расчета преобразователя с изгибной модой колебаний. Рассмотрены особенности разработки системы многослойного согласования преобразователя с воздухом. В результате трансформации колебательной скорости в слоях ее амплитуда на рабочей поверхности преобразователя достигает такой величины, что становится возможным ее самоочистление. Кроме того, применение двумерного согласования в преобразователе уровнемера позволяет увеличить его дальность действия до 61 м.

1. Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. — М.: Техносфера, 2006. — 576 с.
2. Шарпов В. М., Мусиенко М. П., Шарпова Е. В. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В. М. Шарпова. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
3. Ультразвук. Малая энциклопедия / Под ред. А. П. Голяминой. — М.: Советская энциклопедия, 1979. — 400 с.
4. Бабиков О. И. Контроль уровня с помощью ультразвука. — М.: Энергия, 1971. — 98 с.
5. Бабиков О. И. Ультразвуковые приборы контроля. — Л.: Машиностроение, 1985. — 117 с.
6. Носов В. П. Проектирование ультразвуковой измерительной аппаратуры. — М.: Машиностроение, 1972. — 288 с.
7. Milltronics. Non-contacting ultrasonic transducers. Проспект.
8. Milltronics. Guide to simplified process measurement. Проспект.
9. Вахитов Я. Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. — М.: Искусство, 1982. — 415 с.
10. Морз Ф. Колебания и звук. — М.-П.: Гостехиздат, 1949. — 496 с.
11. Алдошина А., Войшвилло А. Г. Высококачественные акустические системы и измерители. — М.: Радио и связь, 1985. — 168 с.

Поступила в редакцию
28.09.2012