

# Изменение параметров пьезоэлектрических преобразователей с помощью добавочных элементов

Валерий Шарапов, Жанна Сотула, Лариса Куницкая, Александр Ткаченко (г. Черкассы, Украина)

В статье описан метод изменения параметров пьезоэлектрических преобразователей с помощью добавочных элементов. В частности, может быть увеличена выходная мощность преобразователя, снижена рабочая частота и расширена полоса частот, а также могут быть получены преобразователи со свойствами дифференцирующих и интегрирующих цепей.

Пьезоэлектрические преобразователи и датчики широко применяются в электроакустике, в ультразвуковой, медицинской, измерительной технике, в сканирующих зондовых наномикроскопах, пьезодвигателях и в других областях науки и техники [1–3]. Особое место пьезоэлектрические преобразователи занимают в гидроакустике, являясь по существу ушами и глазами подводных и надводных кораблей.

Как известно [4], преобразователь – это устройство, которое преобразует одну физическую величину или энергию в другую физическую величину или энергию, например, тепловую энергию – в электрическую, силу – в перемещение, давление – в электрическое напряжение или ток, электрическое напряжение одного уровня – в электрическое напряжение другого уровня, и т.д.

В работе [5] описаны методы синтеза (создания, проектирования) пьезоэлектрических преобразователей. Эти методы позволяют не только расширять возможности технологии проектирования, но и создавать преобразователи с необходимыми характеристиками. Среди описанных технологий особый интерес представляет технология добавочных элементов, не требующих какой-либо доработки пьезоэлемента и изменяющих характеристики преобразователя за счёт внешних цепей.

## Основные параметры пьезоэлемента на различных частотах

Частота, кГц	0,8	1,2	2,5
$r_0$ , КОм	9,3	5,9	3,9
Звуковое давление, дБ	80	93	97

Поскольку пьезоэлемент представляет собой электромеханическую колебательную систему, присоединение к нему механических или электрических элементов изменяет параметры этой системы [6]. Здесь возможны как минимум два варианта. В первом случае к пьезоэлементу *механически* присоединяют металлическую пластину, второй пьезоэлемент или ультразвуковой концентратор. Во втором случае к пьезоэлементу *электрически* присоединяют ёмкость, индуктивность, сопротивление, ещё один пьезоэлемент или часть пьезоэлемента.

Присоединение металлической пластины к пьезоэлементу превращает мноморфный пьезоэлемент в биморфный, при этом появляется новый вид колебаний – изгибные. Эти колебания являются самыми низкочастотными для пьезоэлектрических преобразователей, при этом чувствительность преобразователя увеличивается на порядок и более; аналогичный результат достигается при соединении двух пьезоэлементов [1, 5]. Присоединение к пьезоэлементу ультразвукового концентратора снижает рабочую частоту устройства и увеличивает амплитуду смещения. Такие устройства используются в ультразвуковой обработке материалов [6, 7] и в измерительных устройствах [1].

Не меньший интерес представляет добавление к пьезоэлементу электрических элементов – индуктивности, ёмкости, активного сопротивления и цепей, составленных из этих элементов. Упрощённая эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента изображена на рисунке 1а. На этой схеме  $C_{эл}$  – ёмкость между элект-

родами пьезоэлемента,  $L_{д}$ ,  $C_{д}$ ,  $R$  – динамические индуктивность и ёмкость, а также активные потери в пьезоэлементе. Если присоединить к входу пьезоэлемента индуктивность [9] (см. рис. 1б) таким образом, чтобы эта индуктивность и ёмкость между электродами образовали последовательный колебательный контур  $L_{доб}C_{эл}$ , то резонансную частоту этого контура можно определить по известной формуле:

$$f_{доб} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{доб}C_{эл}}}. \quad (1)$$

Резонансная частота собственно пьезоэлемента

$$f_{ПЭ} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{д}C_{д}}}. \quad (2)$$

Кроме того, возникает резонанс на частоте

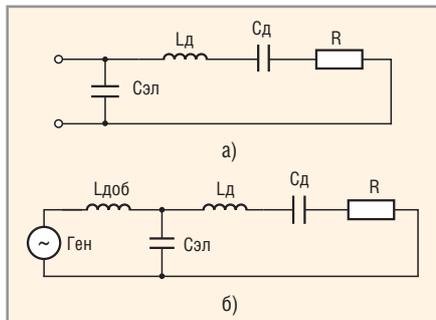
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{доб} + L_{д})C_{д}}}. \quad (3)$$

В зависимости от величин  $C_{эл}$  и  $L_{доб}$  возможны три случая:

$$\begin{aligned} f_{доб} &= f_{ПЭ}; \\ f_{доб} &> f_{ПЭ}; \\ f_{доб} &< f_{ПЭ}. \end{aligned} \quad (4)$$

Экспериментальную проверку выполним для электроакустического преобразователя ЗП-19. Преобразователь состоит из стальной пластины (марки 40Х) диаметром 32 мм и толщиной 0,15 мм. К пластине приклеен эпоксидным компаундом пьезоэлемент диаметром 23 мм и толщиной 0,2 мм. Получившийся биморфный элемент закреплён в корпусе из ударопрочного полистирола.

Проверку выполним в пьезотрансформаторном режиме, для чего один из электродов пьезоэлемента разделим на две части – кольцо и диск (см. рис. 2а). Эквивалентная электрическая схема такого преобразователя показана на рисунке 2б, где  $Tr$  – идеальный трансформатор,  $C_{вых}$  – ёмкость между



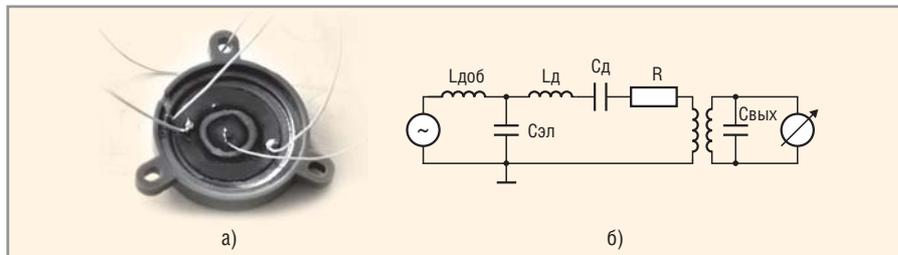
**Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента (а), эквивалентная схема пьезоэлемента с дополнительной индуктивностью (б)**

выходными электродами пьезотрансформатора.

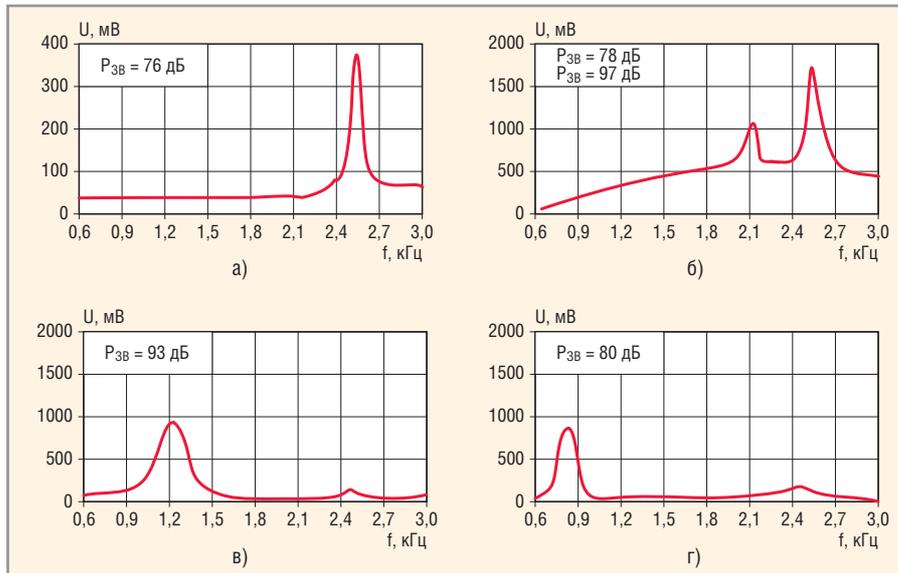
Для проведения экспериментов были изготовлены катушки индуктивности ( $L_{доб}$ ) 0,24, 1,0 и 2,4 Гн. Эти индуктивности с ёмкостью  $C_{эл}$  (17 нФ) образуют резонансные частоты 2,5, 1,22 и 0,8 кГц соответственно. На рисунке 3 показаны АЧХ этого преобразователя, где основная резонансная частота изгибных колебаний равна примерно 2,5 кГц. Измерения проводились в пьезотрансформаторном режиме. На резонансной частоте также измерялось звуковое давление с помощью шумомера фирмы RFT.

Характеристики преобразователя были измерены при подключении каждой из индуктивностей (см. рис. 3б – 3г). Одновременно на указанных частотах измерялось собственное (активное) сопротивление потерь  $r_0$  (см. таблицу). Видно, что с понижением частоты потери в пьезоэлементе увеличиваются. Рисунок 3 подтверждает, что, используя дополнительные колебательные контуры, создаваемые с помощью дополнительной индуктивности и межэлектродной ёмкости пьезоэлемента, можно создавать низкочастотные акустические колебания с помощью преобразователя сравнительно высокой частоты.

На рисунке 4 показаны варианты схем преобразователей с добавочными колебательными контурами, которые позволяют увеличить выходную мощность (звуковое давление). Если выбрать величину  $f_{доб}$  близкой к  $f_p$ , можно не только повысить уровень звукового давления, но и расширить полосу пропускания преобразователя, что актуально для преобразователей, используемых для подводной связи. Разумеется, приведённые схемы не исчерпывают все возможности таких преобразователей.

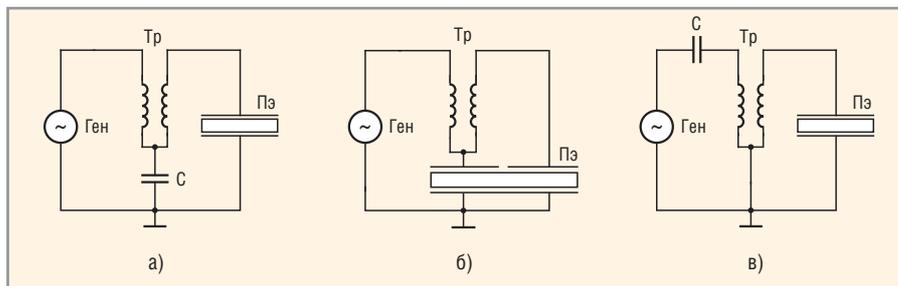


**Рис. 2. Электроакустический преобразователь ЗП-19 (а), эквивалентная схема (б)**



**Рис. 3. АЧХ преобразователя ЗП-19**

а)  $L_{доб} = 0$ ; б)  $L_{доб} = 0,24$  Гн; в)  $L_{доб} = 1,0$  Гн; г)  $L_{доб} = 2,4$  Гн



**Рис. 4. Преобразователи с добавочными колебательными контурами**

Следует также отметить, что при подключении к пьезоэлементу активных сопротивлений могут быть получены преобразователи со свойствами дифференцирующих и интегрирующих цепей, которые могут найти применение в измерительном и технологическом оборудовании.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Шаронов В.М., Мусиенко М.П., Шаронова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. Техносфера, 2006.
2. Sbararov V. Piezoceramic sensors. Springer, 2011.
3. Шаронов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Базило К.В., Куницкая Л.Г. Пьезокерамические трансформаторы и датчики. Черкассы: Вертикаль, 2010.

4. Шаронов В.М. и др. Датчики. Техносфера, 2012.
5. Шаронов В.М., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г. Пьезоэлектрические электроакустические преобразователи. Черкассы: Вертикаль, 2012.
6. Шаронов В.М., Сотула Ж.В. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования. Электроника НТБ. 2012. № 5. С. 96–102.
7. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Под ред. И.П. Голяминой. Советская энциклопедия, 1979.
8. Физика и техника мощного ультразвука: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. Наука, 1970.
9. Шаронов В.М. Спосіб створення акустичних коливаль за допомогою п'єзоелемента. Патент України № 56930. Н04R 17/00. 2011. Бюл. № 2.