

Применение объёмных резонаторов в пьезоэлектрических электроакустических преобразователях

Валерий Шарапов, Анна Салагор, Жанна Сотула, Василий Заика
(г. Черкассы, Украина)

В статье приведены результаты исследований влияния объёмных резонаторов на характеристики электроакустических преобразователей. В частности, при использовании резонатора Гельмгольца, четвертьволнового и конусообразного резонаторов может быть повышен уровень звукового давления, снижена рабочая частота и расширена полоса частот.

ВВЕДЕНИЕ

Электроакустические преобразователи (ЭАП) широко применяются для работы в воздушной среде (системы охраны, измерительная техника), в воде (локаторы, эхолоты, подводная связь), для создания звуковых волн в твёрдых телах (неразрушающий контроль) и др. [1–8].

Известно, что низкочастотный звук распространяется в воде практически без затухания на расстояние до нескольких тысяч километров благодаря формированию в океане звукового канала – акустического волновода рефракционного типа. Именно поэтому низкочастотная акустика имеет очевидные преимущества при решении актуальных задач, в том числе оборонных [9].

Пьезоэлектрические преобразователи (ПП) часто используются в электроакустике [3, 4]. Как правило, возбуждение ПП производят на резонансной частоте, где индуктивное и ёмкостное сопротивление компенсируют друг друга, и выходное сопротивление пьезоэлемента (ПЭ) становится в основном активным. Максимальный ток через ПЭ и максимальная мощность, излучаемая ПЭ, могут быть достигнуты именно на резонансной частоте.

Пьезоэлектрический элемент представляет собой электромеханическую колебательную систему с достаточно

высокой добротностью. Присоединение к такой системе механических или электрических элементов изменяет её параметры [4, 10, 11]. В частности, если к ПЭ присоединить механически и электрически второй ПЭ или металлическую пластину, получается т.н. биморфный элемент [2], резонансная частота которого на порядок ниже резонансной частоты мономорфного ПЭ, а чувствительность выше [4, 6].

Резонансную частоту круглого биморфного элемента можно оценить по формуле [6]:

$$f_0 \approx \frac{0,45cb}{r^2 \sqrt{1-\mu^2}}, \quad (1)$$

где $c = \sqrt{E\rho}$; b – толщина ПЭ; r – радиус ПЭ; E – модуль Юнга; ρ – плотность материала ПЭ; μ – коэффициент Пуассона.

Как следует из формулы (1), дальнейшее уменьшение резонансной частоты биморфного элемента возможно, в основном, за счёт уменьшения толщины ПЭ и увеличения его радиуса. Изменение этих параметров имеет свои технологические и габаритные ограничения. Резонансная частота применяемых на практике биморфных элементов обычно составляет несколько килогерц [1–6]. Присоединение к ПП индуктивности позволяет увеличить чувствительность, а также расширить полосу рабочих частот [10]. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований влияния *объёмных резонаторов* на характеристики ЭАП.

РЕЗОНАТОР ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Акустические колебательные системы используются в виде полостей, каналов и

объёмных резонаторов, которые (в сочетании) могут образовывать сложные устройства, по своему действию аналогичные резонансным контурам, фильтрам и т.д. С их помощью можно выделять или подавлять определённые участки звукового диапазона частот [12, 13].

Примером простейшей акустической колебательной системы является резонатор Гельмгольца (см. рис. 1). Он представляет собой сосуд сферической формы с открытой горловиной. Воздух в горловине является колеблющейся массой, а объём воздуха в сосуде играет роль упругого элемента. Разумеется, такое разделение справедливо лишь приближенно, т.к. часть воздуха в полости обладает инерционным сопротивлением. Однако при достаточно большой величине отношения площади отверстия к площади сечения полости точность такого приближения является удовлетворительной. Основная часть кинетической энергии колебаний оказывается сосредоточенной в горле резонатора, где колебательная скорость частиц воздуха имеет наибольшую величину [12].

Собственная частота резонатора Гельмгольца равна [12]:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}, \quad (2)$$

где: f_r – частота, Гц; c_0 – скорость звука в воздухе (340 м/с); S – сечение отверстия, м²; L – длина отверстия, м; V – объём резонатора, м³.

Например, для сосуда объёмом 1 л с горловиной длиной 1 см и сечением 1 см² частота резонанса составит примерно 170 Гц. Следует отметить, что длина волны для этой частоты составляет около 2 м, что значительно больше размеров резонатора. Следовательно, это не стоячая акустическая волна в самом резонаторе. Действительно, в полости можно возбудить только волны, длина которых меньше характерного размера резонатора

$$\lambda \leq \sqrt[3]{V}. \quad (3)$$

Для данного примера – это частоты выше 3 кГц.

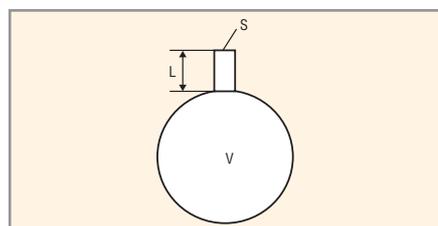


Рис. 1. Резонатор Гельмгольца

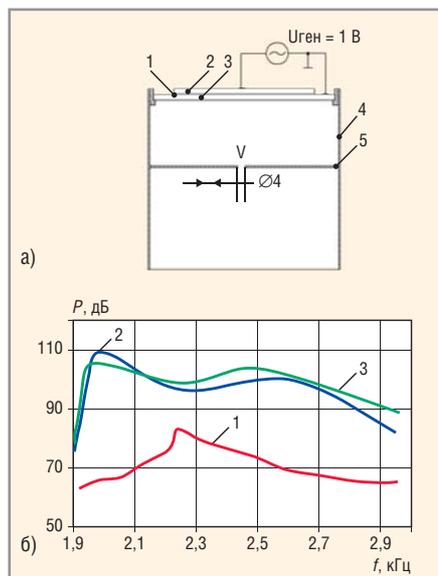


Рис. 2. Преобразователь с резонатором Гельмгольца

а) конструкция: 1 – биморфный ПЭ; 2 – ПЭ; 3 – металлическая пластина; 4 – цилиндр; 5 – перегородка; б) АЧХ: 1 – без резонатора Гельмгольца; 2 – с резонатором Гельмгольца ($V = 8 \text{ см}^3$); 3 – с резонатором Гельмгольца ($V = 16 \text{ см}^3$)

Для экспериментов с резонаторами использовался биморфный элемент пьезокерамического ЭАП типа ЗП-19, изготовленный АО «Аврора» (Волгоград). Биморфный элемент этого преобразователя состоит из стальной (марки 40Х) пластины диаметром 32 мм и толщиной 0,15 мм и ПЭ из керамики ЦТС-19 диаметром 23 мм и толщиной 0,2 мм. Преобразователь подключался к генератору электрических колебаний ГЗ-106. С помощью шумомера фирмы RFT измерялась его АЧХ по звуковому давлению.

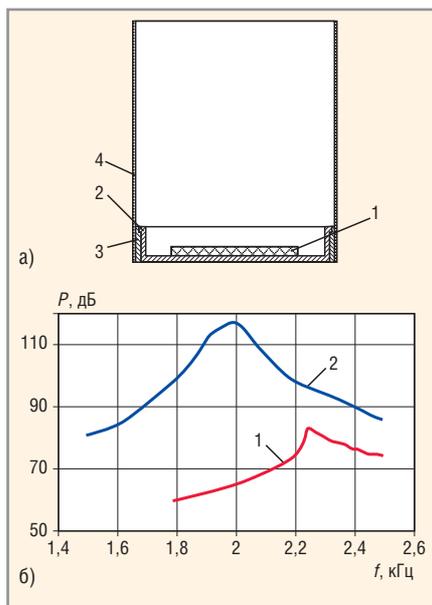


Рис. 3. ЗАП с четвертьволновым резонатором

а) конструкция: 1 – ПЭ; 2 – металлическая пластина; 3 – корпус; 4 – цилиндр; б) АЧХ: 1 – без резонатора; 2 – с резонатором

ЭАП с резонатором Гельмгольца цилиндрической формы

На корпусе ЗП-19 закреплялся полый цилиндр длиной 30 мм, изготовленный из бронзы толщиной 0,2 мм. Внутри цилиндра устанавливалась перегородка с отверстием диаметром 4 мм, положение которой внутри цилиндра изменялось, варьируя объём резонатора. Конструкция преобразователя и его АЧХ показаны на рисунке 2. На рисунке 2б видно, что применение резонатора Гельмгольца повысило уровень звукового давления на 15–40 дБ и расширило полосу рабочих частот.

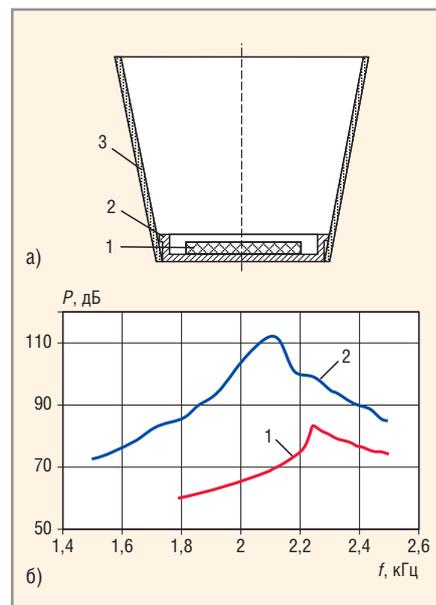


Рис. 4. ЗАП с конусообразным резонатором

а) конструкция: 1 – ПЭ; 2 – металлическая пластина; 3 – полый срезанный конус; б) АЧХ: 1 – без резонатора; 2 – с резонатором

ЭАП с четвертьволновым резонатором

В этом случае на корпусе ЗП-19 был закреплён полый цилиндр длиной 37 мм, изготовленный из бронзы толщиной 0,2 мм. Конструкция преобразователя с четвертьволновым резонатором и его АЧХ показаны на рисунке 3. Как видно из рисунка 3б, применение четвертьволнового резонатора повысило уровень звукового давления на 15–50 дБ и расширило полосу рабочих частот.

ЭАП с конусообразным резонатором

На корпусе ЗП-19 был закреплён полый усечённый конус длиной 37 мм,

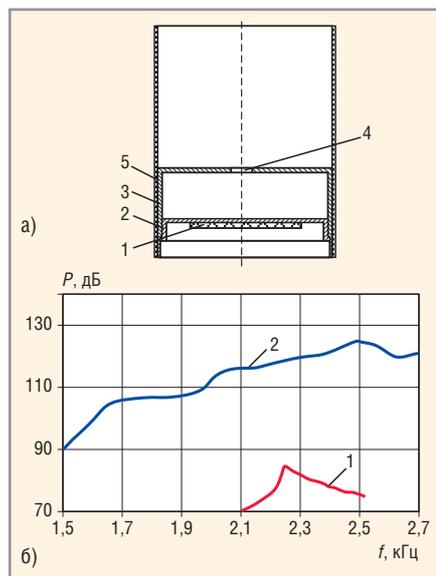


Рис. 5. ЗАП с резонатором Гельмгольца и с четвертьволновым резонатором

а) конструкция: 1 – ПЭ; 2 – металлическая пластина; 3 – корпус; 4 – отверстие; 5 – цилиндр;
б) АЧХ: 1 – без резонаторов; 2 – с резонаторами

изготовленный из бронзы толщиной 0,2 мм. Конструкция преобразователя с конусообразным резонатором и его АЧХ показаны на рисунке 4. Видно, что применение конусообразного резонатора привело к росту уровня звукового

давления на 15–40 дБ и расширило полосу рабочих частот (см. рис. 4б).

ЗАП с резонатором Гельмгольца и с четвертьволновым резонатором

Одна из возможных конструкций ЭАП с четвертьволновым резонатором и резонатором Гельмгольца и его АЧХ показаны на рисунке 5. В этом случае применение объёмных резонаторов позволило увеличить уровень звукового давления на 35–50 дБ и расширить полосу рабочих частот (см. рис. 5б).

Приведённые в статье результаты могут быть использованы при проектировании пьезоэлектрических электроакустических преобразователей различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sbarapov V.* Piezoceramic sensors. Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York. 2011.
2. *Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В.* Пьезоэлектрические датчики. Техносфера. 2006.
3. *Sbarapov V., Sotula Zh., Kumitskaya L.* Piezoelectric Electroacoustic Transducers. – Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York. 2013.

4. *Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г.* Электроакустические преобразователи. Техносфера. 2013.
5. *Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Базило К.В., Куницкая Л.Г.* Пьезоэлектрические трансформаторы и датчики. Черкассы: Вертикаль. 2010.
6. *Евтотов А.П., Колесников А.Е., Коретин Е.А.* и др. Справочник по гидроакустике. Судостроение. 1988.
7. *Домаркас В.И., Кажис Р.-Й.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Лиентис, Вильнюс. 1975.
8. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля. Под редакцией И.Н. Ермолова. Машиностроение. 1986.
9. www.ipfran.ru.
10. *Шарапов В.М., Сотула Ж.В., Куницкая Л.Г., Ткаченко А.С.* Изменение параметров пьезоэлектрических преобразователей с помощью добавочных элементов. Современная электроника. № 3. 2013. С. 56–57.
11. *Шарапов В.М., Сотула Ж.В.* Пьезоэлектрические преобразователи. Новые технологии проектирования. Электроника: НТБ. № 5. 2012. С. 96–102.
12. www.bluesmobil.com.
13. Фурдуев В.В. Электроакустика. ОГИЗ. 1948.

