

МОУ «Лицей № 43»  
(естественно-технический)

# ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Брянцев Александр

Рогов Александр

Терехин Алексей

Резепов Евгений

Горюнов Максим

10 «В» класс

Саранск  
2010

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b> .....	<b>2</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>3</b>
<b>ОТКРЫТИЕ</b> .....	<b>4</b>
<b>ПРЯМОЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ</b> .....	<b>5</b>
<b>ОБРАТНЫЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ</b> .....	<b>6</b>
<b>ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ</b> .....	<b>7</b>
МОНОКРИСТАЛЛЫ.....	7
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ.....	9
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ.....	10
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	12
<b>ПРИМЕНЕНИЕ</b> .....	<b>13</b>
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	13
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	17
ДАТЧИКИ УДАРА.....	19
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПАКЕТНЫЕ И МОНОБЛОЧНЫЕ АКТЮАТОРЫ.....	20
ДИСКРЕТНЫЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ.....	27
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ЗВУКА.....	39
ПЬЕЗОКНОПКИ.....	56
ПЬЕЗОКЛАВИАТУРЫ И ПАНЕЛИ.....	59
ПЬЕЗОЗАЖИГАЛКИ.....	61
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ.....	62
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ.....	64
ТЕХНОЛОГИЯ ПЬЕЗОПЕЧАТИ.....	65
<b>ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ</b> .....	<b>71</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>74</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>75</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Пьезоэлектрический эффект как новый источник энергии был открыт сравнительно недавно. И хоть он и смог проникнуть во многие сферы нашей сегодняшней жизни, стать полноценным источником энергии, способным заменить существующим, ему, наверное, пока не суждено. Сегодня, сами того не замечая, многие из нас каждый день зажигают газовую плиту пьезозажигалками, кто-то пользуется принтерами со встроенными пьезоэлементами и многими другими вещами. Пользуются, и большинство из них даже не задумывается об этом. Именно поэтому хочется как можно более подробно описать процесс пьезоэффекта и его современное применение.

Пьезоэлектрический эффект присущ некоторым природным кристаллам, таким как кварц и турмалин, которые в течение многих лет использовались в качестве электромеханических преобразователей. Кристаллическая решетка кристаллов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, не имеет центра симметрии. Воздействие (сжимающее или растягивающее), приложенное к такому кристаллу, приводит к поляризации после разделения положительных и отрицательных зарядов, имеющих в каждой отдельной элементарной частице. Эффект практически линейный, то есть степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия, но направление поляризации зависимо, так как усилие сжатия или растяжения генерируют электрические поля, а следовательно, и напряжение, противоположной полярности. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

## ОТКРЫТИЕ

В 1756 г. русский академик Ф. Эпинус обнаружил, что при нагревании кристалла турмалина на его гранях появляются электрические заряды. В дальнейшем этому явлению было присвоено наименование пьезоэлектрического эффекта. Ф. Эпинус предполагал, что причиной электрических явлений, наблюдаемых при изменении температуры, является неравномерный нагрев двух поверхностей, приводящий к появлению в кристалле механических напряжений. Одновременно он указал, что постоянство в распределении полюсов на определённых концах кристалла зависит от его структуры и состава, таким образом, Ф. Эпинус подошел вплотную к открытию пьезоэлектрического эффекта.

Пьезоэлектрический эффект в кристаллах был обнаружен в 1880 г. братьями Пьером и Жаком Кюри, наблюдавшими возникновение на поверхности пластинок, вырезанных при определённой ориентировки из кристалла кварца, электростатических зарядов под действием механических напряжений. Эти заряды пропорциональны механическому напряжению, меняют знак вместе с ним и исчезают при его снятии.

Обратный эффект был предугадан в 1881 г. Липпманом на основе термодинамических соображений и в том же году экспериментально подтверждён братьями Кюри.

Применить открытое явление впервые предложил Поль Ланжевен, также француз. Было это в годы первой мировой войны. Суть предложения заключалась в использовании ультразвука для обнаружения вражеских подводных лодок, а для получения самого ультразвука предлагалось использовать именно пьезоэффект.

## ПРЯМОЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ

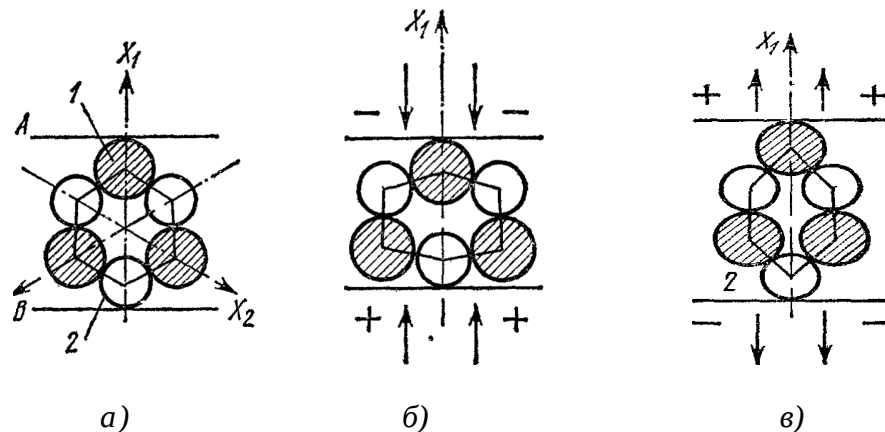
Пьезоэлектрический эффект (пьезоэффект) состоит в том, что существуют такие вещества, при механической деформации которых, в определённых направлениях, на их гранях появляются электрические заряды противоположных знаков. Обращение направления деформации изменяет знаки зарядов на поверхностях на противоположные.

К веществам, в которых наблюдается пьезоэффект, можно отнести ряд полупроводников - CdS, ZnO, GaAs, InSb, Te и др., а также кварц, турмалин, сегнетовую соль, титанат бария, цинковую обманку и другие вещества. Подробнее о них будет рассказано позднее.

Чтобы обнаружить пьезоэлектрические заряды, на грани кристаллической пластинки накладываются металлические обкладки. При разомкнутых обкладках между ними при деформации появляется разность потенциалов. При замкнутых – на них образуются заряды, и в цепи, соединяющей обкладки, в процессе деформации возникает ток.

Пьезоэлектрический эффект объясняется следующим образом: в ионных кристаллах вследствие несовпадения центров положительных и отрицательных ионов имеется электрический момент и в отсутствие внешнего электрического поля. Однако эта поляризация обычно не проявляется, так как она компенсируется зарядами на поверхности. При деформации кристалла положительные и отрицательные ионы решетки смещаются друг относительно друга, и поэтому, вообще говоря, изменяется электрический момент кристалла. Это изменение электрического момента и проявляется в пьезоэлектрическом эффекте.

Рассмотрим *Рис.1*, качественно поясняющий возникновение пьезоэлектрического эффекта.



*Рис 1:* (рис.1, а) соответствует недеформированному кристаллу. На грани А, перпендикулярной к оси  $X_1$ , имеются выступающие положительные заряды, а на параллельной ей грани В - выступающие отрицательные заряды. При сжатии вдоль оси  $X_1$  (рис. 1, б) элементарная ячейка деформируется. При этом положительный ион 1 и отрицательный ион 2 “вдавливается” внутрь ячейки, отчего выступающие заряды (положительный на плоскости А и отрицательный на плоскости В) уменьшаются, что эквивалентно появлению отрицательного заряда на плоскости А и положительного заряда на плоскости В. При растяжении вдоль оси  $X_1$  имеет место обратное (рис. 1, в): ионы 1 и 2 “выталкиваются” из ячейки. Поэтому на грани А возникает дополнительный положительный заряд, а на грани В - отрицательный заряд.

## ОБРАТНЫЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ

Наряду с пьезоэлектрическим эффектом существует и обратное ему явление: в пьезоэлектрических кристаллах возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями. Поэтому, если на металлические обкладки, укрепленные на кристалле, подать электрическое напряжение, то кристалл под действием поля поляризуется и деформируется.

Легко видеть, что необходимость существования обратного пьезоэффекта следует из закона сохранения энергии и факта существования прямого эффекта. Рассмотрим пьезоэлектрическую пластинку (рис. 5) и предположим, что мы сжимаем ее внешними силами  $F$ . Если бы пьезоэффекта не было, то работа внешних сил равнялась бы потенциальной энергии упруго деформированной пластинки. При наличии пьезоэффекта на пластинке появляются заряды, и возникает электрическое поле, которое включает в себе дополнительную энергию. По закону сохранения энергии отсюда следует, что при сжатии пьезоэлектрической пластинки совершается большая работа, а значит, в ней возникают дополнительные силы  $F_1$ , противодействующие сжатию. Это и есть силы обратного пьезоэффекта. Из приведенных рассуждений вытекает связь между знаками обоих эффектов. Если в обоих случаях знаки зарядов на гранях одинаковы, то знаки деформаций различны. Если при сжатии пластинки на гранях появляются заряды, указанные на рис. 1, то при создании такой же поляризации внешним полем пластинка будет растягиваться.

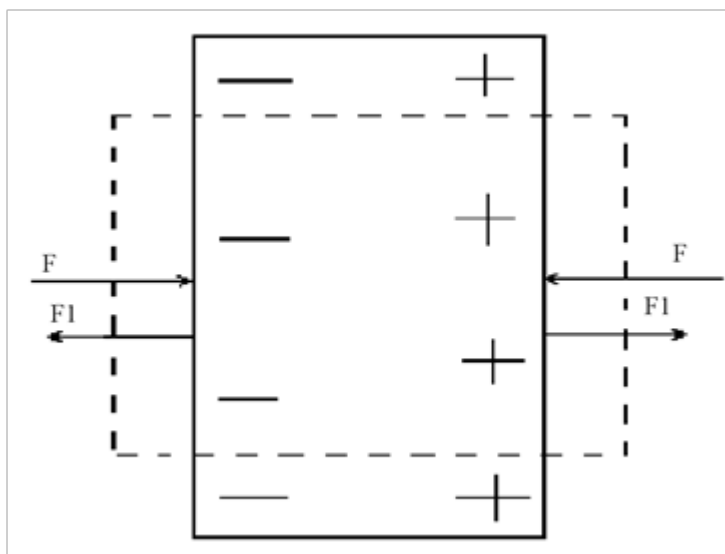


Рис. 1

# ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ

## МОНОКРИСТАЛЛЫ

**Кварц.** Кварц - широко распространённый в природе минерал, ниже температуры 573 по Цельсию кристаллизуется в тригонально-трапецоэдрическом классе гексагональной сингонии. Он принадлежит к энантиоморфному классу и встречается в природе в двух модификациях: правой и левой. По химическому составу кварц представляет собой безводный диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) молекулярная масса 60,06. Кварц относится к числу наиболее твёрдых минералов, обладает высокой химической стойкостью. Внешние формы природных кристаллов кварца отличаются большим разнообразием. Наиболее обычной формой является комбинация гексагональной призмы и ромбоэдров (пирамидальные грани). Грани призмы расширяются к основанию кристалла и имеют на поверхности горизонтальную штриховку. Годный для использования в пьезоэлектрической аппаратуре кварц встречается в природе в виде кристаллов, их обломков и окатанных галек. Цвет от бесцветно-прозрачного (горный хрусталь) до чёрного (морион). Обычно природные кристаллы кварца содержат в себе различные дефекты, снижающие их ценность. К числу дефектов относятся включение инородных минералов (рутил хлорит), трещины, пузыри, фантомы, голубые иглы, свили и двойники. В настоящее время наряду с природными используются синтетические кристаллы кварца, выращиваемые в автоклавах при повышенных температуре и давлении из насыщенных диоксидом кремния щелочных растворов. Пьезоэлектрические свойства кварца широко используются в технике для стабилизации и фильтрации радиочастот, генерирования ультразвуковых колебаний и для измерения механических величин (пьезометрия).

**Турмалин.** Турмалин кристаллизуется в тригонально-пирамидальном классе тригональной сингонии. Кристаллы призматические с продольной штриховкой, удлинённые, часто игольчатой формы. По химическому составу турмалин представляет собой сложный алюмоборосиликат с примесями магния, железа или щелочных металлов (Na, Li, K). Цвет от чёрного до зелёного, также красный до розового, реже бесцветный. При трении электризуется, обладает сильным пьезоэлектрическим эффектом. Турмалин широко распространён в природе, однако в большинстве случаев кристаллы избилуют трещинами. Бездефектные кристаллы, годные для пьезоэлектрических резонаторов, встречаются редко. Основным преимуществом турмалина является большее значение частного коэффициента по сравнению с кварцем. Благодаря этому, а также из-за большей механической прочности турмалина возможно изготовление резонаторов на более высокие частоты. В настоящее время турмалин почти не используется для изготовления пьезоэлектрических резонаторов и имеет ограниченное применение для измерения гидростатического давления.

**Сегнетова соль.** Сегнетова соль кристаллизуется в ромботетраэдрическом классе ромбической сингонии. Принадлежность к энантиоморфному классу определяет теоретическую возможность существования правых и левых кристаллов сегнетовой соли. Однако получаемые из отходов виноделия кристаллы сегнетовой соли бывают только правыми. Для предохранения от воздействия влаги пьезоэлементы из сегнетовой соли покрывают тонкими пленками лака. Пьезоэлементы из сегнетовой соли широко использовались в аппаратуре, работающей в сравнительно узком температурном интервале, в частности, в звукоснимателях. Однако в настоящее время они почти полностью вытеснены керамическими пьезоэлементами.

**Дигидрофосфат аммония.** Дигидрофосфат аммония кристаллизуется в тетрагональной сингонии. Кристаллы представляют собой комбинацию тетрагональной пирамиды и

призмы. Кристаллы дигидрофосфата не содержат кристаллизованной воды и не обезвоживаются. При 93% относительной влажности воздуха кристаллы начинают поглощать влагу и растворяются. Дигидрофосфат аммония плавится при температуре 190 градусов Цельсия, однако выше 100 градусов с поверхности кристалла начинает улетучиваться аммиак. Это ограничивает верхний предел рабочих температур. В настоящее время вследствие широкого развития пьезоэлектрической керамики применение дигидрофосфата аммония ограничено.

**Винокислый калий.** Винокислый калий (условное обозначение ВК) кристаллизуется в монокристаллической сингонии. Содержащаяся в ВК кристаллизационная вода прочно связана. Опытным путём установлено, что до температуры 80 градусов обезвоживание не наступает. Заметное растворение ВК начинается при 80% влажности. Резонаторы из ВК имеют высокие добротности и коэффициента электромеханической связи. Они могут заменять кварц в фильтрах дальней связи.

**Ниобат лития.** Ниобат лития - синтетический кристалл, кристаллизуется в дитригонально-пирамидальном классе ромбоэдрической сингонии. Ниобат лития не растворяется в воде, не разлагается при высоких температурах, отличается высокой механической прочностью. По электрическим свойствам он представляет собой сегнетоэлектрик с температурой Кюри около 1200 градусов Цельсия. Благодаря своим высоким пьезоэлектрическим и механическим свойствам, в том числе и высокой добротности, ниобат лития является перспективным материалом для изготовления преобразователей различного назначения. Тонкие (толщиной около одного микрометра) пленки ниобата лития, получаемые катодным распылением в вакууме, представляют собой ориентированные поликристаллические текстуры, которые могут быть использованы в качестве излучателей и приемников ультравысоких колебаний СВЧ - диапазона.



## ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ

**Пьезоэлектрические текстуры.** Текстуры, представляющие собой ориентированную определенным образом в пространстве совокупность пьезоэлектрических кристаллов, не имеющую центра симметрии, могут обладать пьезоэлектрическим эффектом. Пьезоэффект в текстурах сегнетовой соли был открыт А. В. Шубниковым; им же были установлены основные закономерности пьезоэффекта в аналогичных средах. Пьезотекстуры сегнетовой соли, получаемые нанесением расплава сегнетовой соли на подложку с помощью кисти, имеют один пьезомодуль  $d_{14}$  сегнетовой соли. В настоящее время такие текстуры не представляют практического интереса. Наибольшее значение имеют текстуры на основе поляризованной пьезоэлектрической керамики.

**Пьезоэлектрическая керамика.** Сегнетоэлектрические свойства таких материалов обуславливают возможность пьезоэлектрического эффекта. Под влиянием постоянного электрического поля некоторая часть доменов ориентируется в направлении приложенного поля. После снятия внешнего поля большая часть доменов удерживается в своем новом положении из-за внутреннего поля, которое возникает в результате параллельной ориентации направлений поляризации доменов. Благодаря этому керамика становится полярной текстурой, которая обладает пьезоэффектом. Керамическая технология изготовления пьезоэлементов не накладывает принципиальных ограничений на их форму и размеры. Эти обстоятельства, а также высокие значения пьезоэлектрических характеристик обусловили широкое применение керамических пьезоэлементов в технике, в особенности в устройствах для излучения и приема ультразвуковых колебаний. Особенности технологии изготовления керамических пьезоэлементов. Отличительной чертой процесса изготовления пьезокерамических изделий является их поляризация сильным постоянным электрическим полем, которое прикладывается обычно после нанесения электродов на спеченную заготовку, полученную одним из методов керамической технологии.

## ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ.

Материалы с различными свойствами подразделяются на марки (по составу и характеристикам) и на функциональные группы (по назначению). Материалы функциональной группы 1 применяются для изготовления высокочувствительных пьезоэлементов, работающих в режиме приема или излучения механических колебаний. Материалы функциональной группы 2 предназначены для пьезоэлементов, эксплуатирующихся в условиях сильных электрических полей или высоких механических напряжений. Материалы функциональной группы 3 применяются для изготовления пьезоэлементов, обладающих повышенной стабильностью резонансных частот в зависимости от температуры и времени, а функциональной группы 4 - для высокотемпературных пьезоэлементов.

Рассмотрим теперь свойства пьезокерамики различных типов.

**Материалы на основе титаната бария.** Титанат бария является сегнетоэлектриком. Пьезокерамика титаната бария (ТБ-1) широко применяется для изготовления преобразователей, к которым не предъявляют жесткие требования по температурной и временной стабильности характеристик. Отсутствие в рецептуре титаната бария летучих при обжиге компонентов и простота технологии изготовления пьезоэлементов делают этот материал по-прежнему распространенным в технике.

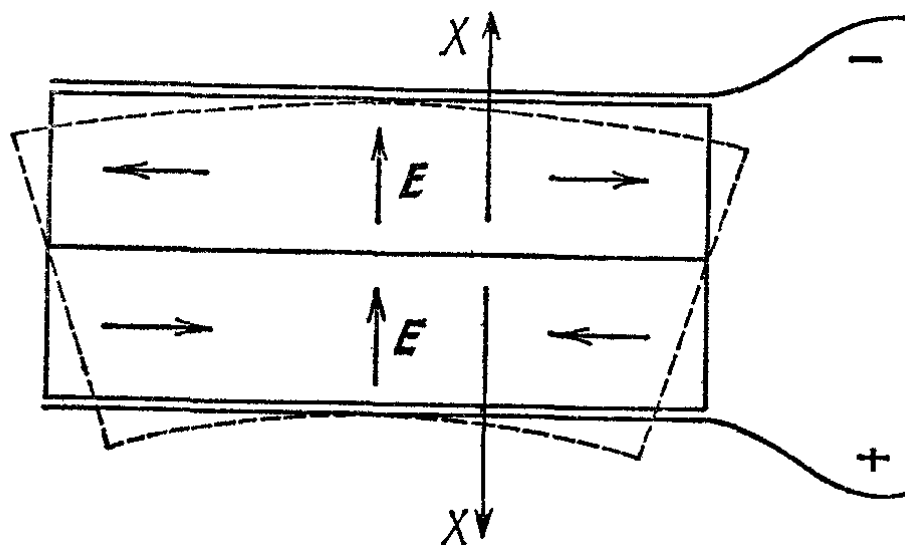
**Материалы на основе твердых растворов титаната - цирконата свинца.** Твердые растворы титаната свинца обладают очень высокими значениями пьезоэлектрических характеристик. На основе этих твердых растворов были разработаны серии технологических пьезокерамических материалов, условное наименование ЦТС (за рубежом PZT).

Технология изготовления изделий из материалов типа ЦТС усложнена тем, что они содержат в своем составе оксид свинца, который частично улетучивается при высокотемпературном обжиге, что приводит к плохой воспроизводимости свойств. Поэтому обжиг заготовок пьезоэлементов проводят в атмосфере паров оксида свинца, для чего заготовки помещают в плотно закрытые капсулы, содержащие засыпку из оксидных соединений свинца. Тем не менее, высокие характеристики этого типа материалов делают их весьма распространенными для изготовления пьезоэлектрических преобразователей различного назначения: для электроакустических приборов, ультразвуковой техники, пьезометрии, а также и некоторых видов радиотехнических фильтров.

**Материалы на основе метаниобата свинца.** Твердые растворы метаниобатов свинца и бария имеют высокую температуру точки Кюри. Материалы на их основе имеют стабильные в широком температурном интервале значения пьезомодулей и резонансных частот. Технология изготовления изделий из них проще, чем из материалов марки ЦТС, так как входящие в состав ниобатной керамики оксид свинца практически не летуч при обжиге.

**Пьезоэлектрики-полимеры.** Некоторые полимерные материалы в виде механически ориентированных и поляризованных в электрическом поле пленок являются полярными текстурами, в которых наблюдается пьезоэлектрический эффект. Среди них практический интерес представляет поливинилиденфторид (ПВДФ). При вытяжке пленок из этого полимера на 300...400% они ориентируются с образованием особой конформации, которая после поляризации в сильном электрическом поле приобретает пьезоэлектрический эффект.

## ДИЭЛЕКТРИКИ



На рисунке показан пьезоэлемент работающий на изгиб. При появлении напряжения на обкладках одна из пластинок сжимается в поперечном направлении и удлиняется в продольном, а другая - растягивается и укорачивается, отчего и возникает деформация изгиба. Если изгибать такой пьезоэлемент внешними силами, то между его обкладками возникает электрическое напряжение. Соединение пластинок в этом случае соответствует последовательному соединению конденсаторов. Очевидно, что такой пьезоэлемент не отвечает на сжатия и растяжения: в этом случае в каждой из пластинок возникает электрическое поле, но поля направлены противоположно, и поэтому напряжение между обкладками равно нулю. Электромеханические преобразователи находят многочисленные применения в разнообразной электроакустической и измерительной аппаратуре. Укажем на пьезоэлектрические микрофон и телефон, пьезоэлектрический адаптер (в электрических проигрывателях патефонных пластинок), манометры, измерители, вибраций и др. Особенно важные применения имеют пьезоэлектрические колебания кварца. Если поместить кварцевую пластинку между пластинами конденсатора и создать между пластинами переменное напряжение, то при частоте электрических колебаний, совпадающей с одной из собственных механических частот пластинки, наступает механический резонанс и в пластинке возникают очень сильные механические колебания. Такая кварцевая пластинка является мощным излучателем волн сверхзвуковой частоты (кварцевые излучатели), используемых в технике, биологии и медицине, а также в многочисленных физических и физико-химических исследованиях. Пьезоэлектрические колебания применяются также для стабилизации частоты генераторов электрических колебаний в радиотехнике и в других технических устройствах.

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В отличие от пьезоэлектрических кристаллов, пьезокерамические элементы изготавливаются методом полусухого прессования, шликерного литья, горячего литья под давлением, экструзии или изостатического прессования с последующим обжигом на воздухе при температуре 1000–1400 градусов по Цельсию. С целью уменьшения пористости обжиг может проводиться в среде кислорода, или элемент изготавливается с помощью метода горячего литья. По специальной технологии на поверхность заготовок наносятся электроды.

После этого керамику делают пьезоэлектрической с любым выбранным направлением поляризации путем помещения ее в сильное электрическое поле при температуре ниже так называемой точки Кюри. Поляризация обычно является окончательным процессом при изготовлении пьезокерамических элементов, хотя за ним следует термостабилизация и контроль параметров.

Пьезоэлектрическая керамика представляет собой твердый, химически инертный материал, совершенно нечувствительный к влажности и другим атмосферным воздействиям. По механическим качествам она подобна керамическим изоляторам.

В зависимости от предназначения пьезоэлементы могут иметь самую разнообразную конфигурацию — от плоской до объемной (сферы, полусферы и т. п.)

Для последующего понимания целесообразно ввести следующее общепринятое в зарубежной практике условное деление типовых пьезоэлементов в зависимости от их конфигурации: пластина (plate), диск (disc), кольцо (ring), брусок (bar), стержень (rod), цилиндр (cylinder). Существуют также гибкие пьезокерамические элементы: пластинчатые (plate bender) и дисковые (disc bender), которые, в свою очередь, подразделяются на юниморфы (unimorph), то есть однослойные, и биморфы (bimorph) — двухслойные.

Такое условное деление не безупречно (цилиндр по сути дела является трубкой и в зависимости от высоты его можно назвать кольцом; в то время как кольцо по своей конфигурации напоминает шайбу). Вместе с тем, оно общепринято и позволяет упростить в процессе заказа описание требуемого элемента. В нашей же практике один и тот же элемент потребители называют по-разному, и без чертежа или более подробного описания трудно представить порой, какой элемент хотел бы приобрести заказчик. Например, «кольцо» у нас называют кольцом, шайбой и таблеткой, «диск» — диском, шайбой и таблеткой.

## **ПРИМЕНЕНИЕ**

### **ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА**

#### **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**

Изобретение относится к электромеханическим преобразователям энергии, а именно к преобразователям, работающим на основе применения пьезокерамических материалов.

Изобретение может быть использовано в качестве маломощного источника постоянного тока в устройствах с приводом от энергии ветра, пара, воды, мускульной силы и др. в промышленности, сельском хозяйстве, быту.

Базовым элементом большинства известных в настоящее время преобразователей является электромагнитный механизм.

Благодаря длительной истории развития и эксплуатации они доведены до конструктивного совершенства. В то же время недостатки электромагнитных преобразователей известны: это относительно большая масса, применение дорогих дефицитных материалов, сложность устройства, содержащего катушку, магнит или обмотку возбуждения, зависимость генерируемого напряжения от скорости вращения ротора, наводки от искрения и электромагнитных полей и др.

Практика проектирования преобразователей показывает, что в настоящее время многие электромагнитные механизмы могут быть заменены твердотельными, пьезокерамическими, при этом удастся существенно улучшить многие качественные показатели. Так, достигаются большая надежность, снижение массогабаритных показателей, технологичность и на базе этого более низкая стоимость, высокий КПД преобразования.

Одним из таких устройств является пьезокерамический генератор постоянного тока, выбранный в качестве прототипа. Этот генератор имеет цилиндрический тонкостенный пьезоэлемент, два деформирующих ролика и два токосъемника.

При деформации роликами поляризованного в радиальном направлении пьезоэлемента на электродах, которыми являются металлизированные поверхности, возникают вследствие прямого пьезоэффекта заряды, которые передаются в виде напряжения потребителю через токосъемные ролики.

## НЕДОСТАТКИ

- малая надежность вследствие того, что тонкослойное покрытие - электроды пьезоэлемента - быстро будет выведено из строя катящимися нажимными и токосъемными роликами;
- сложность конструкции;
- малая эффективность преобразования вследствие того, что при деформации цилиндра в нем имеются зоны сжатия и расширения, в которых при односторонней радиальной поляризации будут возникать одновременно положительные и отрицательные заряды на одном электроде, что приведет к их частичному суммированию, при этом снижается эффективность преобразования.

Эти недостатки отсутствуют в заявленном устройстве пьезоэлектрического генератора постоянного тока, в котором пьезоэлемент выполнен в виде плоского биморфного диска, закрепленного в центре диска и деформируемого в осевом направлении двумя установленными на роторе роликами через гибкую изолирующую прокладку. При этом достигаются существенное упрощение устройства, повышение технологичности, надежности и эффективности преобразования.

Так, при деформации в одном направлении плоского биморфного диска, пластины которого поляризованы, на электродах генерируются заряды, при этом на электродах в зонах сжатия пьезоматериала - потенциал одного знака, на электродах в зонах растяжения - другого. Зоны сжатия и растяжения находятся на разных сторонах диска пьезоэлемента, и поэтому заряды "+" и "-" разделены. Это позволяет снимать напряжение без контактных роликов, прямо с электродов пьезоэлемента.

Для повышения надежности, уменьшения износа деформация пьезоэлемента нажимными роликами производится через гибкую прокладку, закрепленную по краю биморфного диска.

Эта прокладка может быть выполнена в виде мембраны, разделяющей зону привода деформирующих роликов и зону пьезоэлемента. При необходимости разделения зон, например, воздуха и вакуума, воздуха и воды прокладка будет выполнять функцию разделительной мембраны.

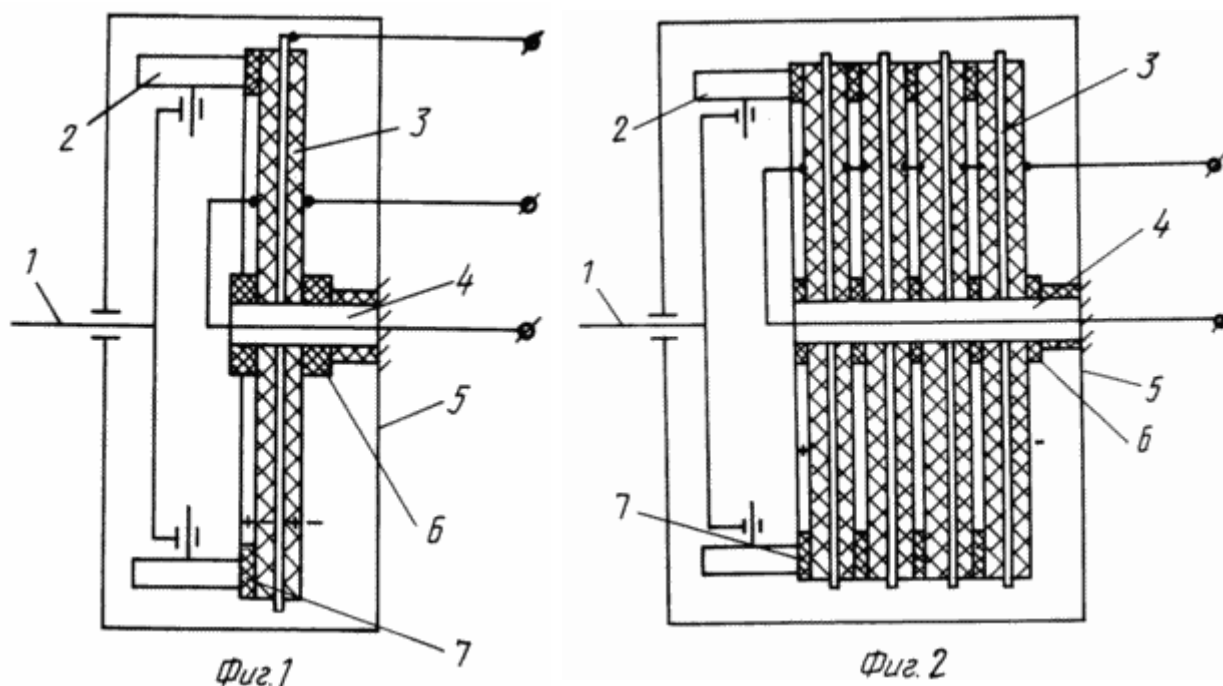
Преимущество плоского дискового элемента заключается еще и в том, что легко реализуется путем применения множества элементов увеличение мощности, получение различных уровней напряжения и уменьшение синфазной составляющей постоянного напряжения. Это достигается путем установки двух и более биморфных дисковых элементов, закрепленных в центре соосно, с возможностью поворота в месте закрепления. При этом генерируемые напряжения в различных пьезоэлементах могут быть суммированы с противофазой по синфазной составляющей напряжения при повороте одного из элементов с последующим его закреплением.

Возникновение синфазной составляющей связано с погрешностями в пьезоматериале, поляризации, эксцентриситетом установки диска пьезоэлемента и деформирующих роликов.

В многоэлементном пьезоэлектрическом генераторе могут быть получены различные уровни напряжений путем соединения электродов пьезоэлементов в электрическую цепь последовательно и параллельно.

Указанные признаки изобретения являются существенными, т.е. влияющими непосредственно на результат, который может быть получен при осуществлении изобретения.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ



На фиг.1 изображен схематически пьезоэлектрический генератор постоянного тока с одним элементом; на фиг.2 - то же с несколькими пьезоэлементами.

Генератор (фиг. 1) имеет ротор 1 с деформирующими роликами 2, биморфный дисковый пьезоэлемент 3, закрепленный с помощью полого штыря 4 на статоре 5. Знаками "+" и "-" на фигурах показано направление поляризации пластин пьезоэлемента. В креплении пьезоэлемента 3 имеются изолирующие шайбы 6, по краю диска пьезоэлемента 3 закреплена гибкая изолирующая прокладка 7, которая, как уже указано выше, может быть выполнена в виде герметизирующей мембраны. В многоэлементном варианте генератора (фиг. 2) пьезоэлементы закреплены на штыре и отделены друг от друга изолирующими шайбами 6, по краю каждого элемента закреплены гибкие прокладки 7.

При вращении ротора 1 от внешнего источника механической энергии ролики 2, которые установлены относительно дисковых пьезоэлементов таким образом, что обеспечивается их деформация, прокатываются по прокладке 7. При деформации пьезоэлемента на электродах вследствие прямого пьезоэффекта возникают заряды, при этом на внешних электродах пьезоэлемента - заряды противоположного знака, которые составляют разности потенциалов.

При вращении ротора и круговой деформации пьезоэлемента на электродах возникает постоянная разность потенциалов, соответствующая величине деформации. Ролики 2 прокатываются по поверхности гибкой прокладки 7. В генераторе могут быть получены два уровня напряжения:

- между внешними электродами;
- между одним из внешних электродов и средним электродом пьезоэлемента, потенциал которого равен нулю.

В одноэлементном генераторе и в многоэлементном прокладка 7 первого элемента имеет функции защиты электрода пьезоэлемента от воздействия со стороны деформирующих роликов 2, изоляции электрода от замыкания через ролики и благодаря гибкости уменьшения потерь энергии на деформацию.

Прокладки второго и других элементов в многоэлементном генераторе имеют функции изоляции электродов соседних элементов и передачи деформирующего усилия без существенного, благодаря гибкости прокладки, увеличения потерь мощности на ее деформацию. Электроды разных пьезоэлементов можно соединять в электрическую цепь последовательно и параллельно, получая различные уровни генерируемого напряжения. Благодаря закреплению пьезоэлементов 3 с возможностью поворота в значительной степени компенсируется синфазная составляющая генерируемого напряжения. Возможность осуществления изобретения подтверждается макетированием с применением дискового диморфного элемента, склеенного из двух пьезокерамических пластин толщиной 0,3 мм, диаметром 65 мм на металлической подложке. Практически осуществимо изготовление дисковых пьезоэлементов для изготовления генератора большой мощности. Проведены проектные работы по созданию многоэлементного генератора для ветроэнергетической силовой установки.



## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



Способ и устройство для генерации переменного тока посредством кольцевых пьезокерамических элементов, работающих в качестве обкладок упорного подшипника, с секторов металлизированной поверхности которых снимается переменный статический потенциал частотой движения шариков. Потенциал направляется в понижающий трансформатор, где порождает переменный электрический ток.

Особенностью способа и устройства является факт использования в качестве энергетического обеспечения не крутящего момента привода, как в обычных генераторах тока, но давления на пьезокерамику, отношение какового к крутящему моменту 0.003 - 0.005 (коэффициент трения для шариковых и роликовых подшипников, характеризующий отношение горизонтальной нагрузки к вертикальной). Ниже приведены прикидочные расчеты возможной установки:

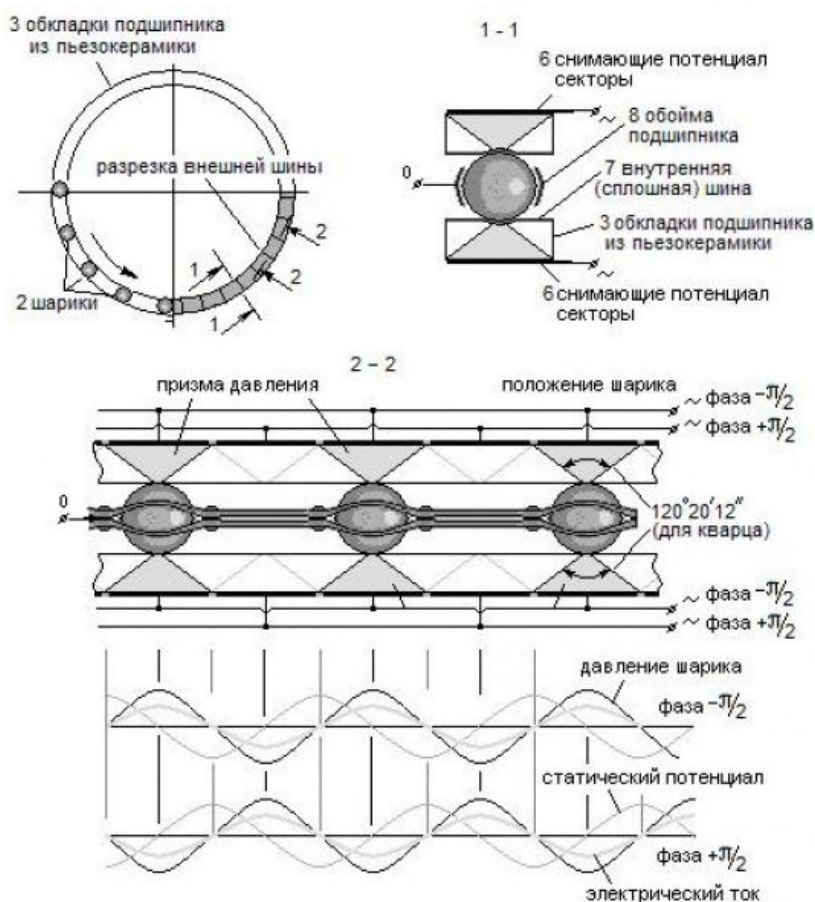
Это цилиндр диаметром 2 и высотой 3 м, из обычного строительного бетона. Вес цилиндра при объемном весе бетона 2.4 тс/м<sup>3</sup> – 71,09 тс, длина окружности основания – 6.283 м. Под цилиндром располагается плоский упорный подшипник с обкладками из пьезокерамики со множеством стальных шариков (роликов). Для приближения к реальности предположим коэффициент ЭМС (электро-механической связи) не 80-90 (как заявляют некоторые производители), всего 60%. Коэффициент трения качения обычных шариковых подшипников составляет 0.003, роликовых – 0.005; учитывая, что обкладки подшипника керамические, коэффициент будет существенно меньшим (с повышением жесткости материала стремится к нулю), но примем максимальный. За один оборот груза 71.09 тс по окружности длиной 6.283 м получим работу:

$$A = \frac{(71.09 \cdot 10000 \cdot 6.283)}{3600} = 1241 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

При этом потеряем на преодоление трения  $1241 \cdot 0.005 = 6,2 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ , остаток составит 1235 Вт\*ч.

При вращении груза со скоростью 10 оборотов в минуту (вполне реальная) и 60% ЭМС мощность генератора составит  $W = 1235 \cdot 0.001 \cdot 10 \cdot 60 \cdot 0.6 = 444.6 \text{ кВт}$ . Чтобы оценить цифру: на средний коттедж достаточно электростанции мощностью 12 кВт, т.е. имеем мощность, достаточную для питания поселка из 37 коттеджей, причем при полном отсутствии затрат, вроде бы за счет работы энергии гравитации.

Способ и устройство заявлены в качестве изобретения 21.04.2010 года.



Способ генерации электрического тока, характеризующийся тем, что в электрический ток преобразуют переменный статический потенциал, получаемый использованием пьезокерамического элемента, отличающийся тем, что используют пьезокерамический элемент, нагруженный подвижной сжимающей нагрузкой и имеющей на поверхности противоположной стороны от нагрузки снимающий потенциал металлический слой, разрезанный на участки перпендикулярно движению нагрузки, на каждом из которых, в следствии периодического нагружения и разгрузки участка пьезокерамики движущейся нагрузкой, возникает переменный статический потенциал, который собирают с одноименных по фазе секторов и направляют в устройство преобразования, представляющее собой понижающий трансформатор с заземленной первичной обмоткой.

Устройство для генерации электрического тока, представляющее собой кольцевой пьезокерамический элемент, отличающееся тем, что кольцевой пьезокерамический элемент выполнен со снимающим потенциал металлическим слоем с одной из сторон, разрезанным на равные по ширине участки, перпендикулярные окружности кольца, на другой стороне которого расположены стальные шарики (ролики), связанные с пружиной (массой пригруза), имеющие возможность движения по окружности кольца, и расстояния между центрами шариков (роликов) равны удвоенному размеру участка.

## ДАТЧИКИ УДАРА



Датчик удара (шок-сенсор, shock sensor) входит в состав большинства охранных систем. Его задача — реагировать на удары по кузову автомобиля. Датчик должен, с одной стороны, иметь высокую чувствительность, чтобы "не прозевать" покушение на Ваш автомобиль, а с другой стороны — не реагировать на посторонние воздействия (удары грома, проезжающий мимо автотранспорт и т.п.).

Для разделения истинных и ложных срабатываний, современные датчики удара строят по двузонному принципу. При легком ударе по кузову или колесу автомобиля должен раздаваться предупреждающий, короткий сигнал сирены. Этим сигнализация информирует потенциального нарушителя о том, что автомобиль находится под охраной. Сильный удар (авария, разбитие стекла, буксировка...) должен вызвать полный цикл тревоги. Для того чтобы отделять легкие удары от сильных и по разному на них реагировать, датчику необходимо иметь два уровня (две зоны) срабатывания.

Центральным звеном любого датчика является чувствительный элемент — устройство, преобразующее удар в электрический сигнал. В зависимости от типа чувствительного элемента различают электромагнитные, микрофонные и пьезокерамические датчики удара. Существуют и другие чувствительные элементы: светодиод в упругом подвесе в паре с фотоприемником; на эффекте Холла и т.д., но они не нашли широкого применения в датчиках автосигнализаций.

В датчиках пьезокерамического типа чувствительный элемент — пьезопластина с дополнительным грузом. Такой чувствительный элемент практически не подвержен влиянию электромагнитных помех, но имеет достаточно большие габариты. Пьезокерамические датчики удара реагируют на сотрясение кузова машины. Поэтому обычно крепятся жестко к кузову. Они устроены проще, поэтому стоят дешевле.

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПАКЕТНЫЕ И МОНОБЛОЧНЫЕ АКТЮАТОРЫ

Пьезоэлектрические актюаторы, как приводы точных микроперемещений, находят все большее применение в различных областях техники. Обеспечивая перемещение от единиц до 200-300 мкм с точностью 0,01 - 0,005 нм, они способны развивать усилия до 50 кН. Как чаще всего бывает, первое применение актюаторы нашли в военной технике, в приборах управления лазерным лучом — как приводы деформируемых лазерных резонаторов в лазерных адаптивных системах.

Однако с учетом компактности, удобства управления перемещением и быстродействия они начали находить свое применение в топливно-распределительных системах бензиновых и дизельных двигателей, в качестве компенсаторов вибрации оборудования, в устройствах точного позиционирования объектов (микролитография, туннельные растровые микроскопы и т. д.).

Принцип действия актюаторов построен на использовании так называемого обратного пьезоэффекта, то есть на деформации пьезоэлемента под действием электрического поля.

В таблице 1 приведены основные типоразмеры и эксплуатационные параметры актюаторов, выпускаемых серийно зарубежными фирмами (Morgan Electro Ceramics, Ceram Tec, Piezomechanik, Ceram Nort America, Xinetics, APC, Piezo Kinetics, Piezo Systems, TRS Ceramics, Ferroperm Group) и российским производителем — ОАО «ЭЛПА».

Таблица 1

Тип актюатора	Стандартные геометрические размеры					Эксплуатационные параметры			
	Диаметр		Длина L	Ширина d	Высота b	Максимальный ход (X), мкм	Емкость (C), мкФ	Частота резонансная (f), кГц	Развиваемая сила (F), кН
	внешний D	внутренний d							
	мм		мм						
<b>Высоковольтные пакетные актюаторы</b>									
Бескорпусные	5÷ 35	-	10÷ 75	-	-	10÷ 110	0,02÷ 3,3	10÷ 50	1÷ 50
В корпусе с предварительным внутренним напряжением	10÷ 3 5	-	25÷ 20 0	-	-	10÷ 250	0,02÷ 6,5	5÷ 40	4÷ 50
<b>Высоковольтные кольцевые актюаторы</b>									
Бескорпусные	10÷ 3 5	5÷ 25	10÷ 10 0	-	-	10÷ 200	0,065÷ 1, 8	10÷ 50	3÷ 20
В корпусе с предварительным вну-	10÷ 3 5	5÷ 25	25÷ 12 5	-	-	10÷ 150	0,065÷ 1, 8	10÷ 40	2÷ 20

тренним напряжением									
Высоковольтные бескорпусные прямоугольные актюаторы	-	-	5÷ 20	2÷ 1 4	3÷ 1 4	7÷ 30	0,07÷ 11	25÷ 240	2÷ 11
<b>Низковольтные актюаторы (полые цилиндры)</b>									
Бескорпусные	15÷ 3 5	10÷ 1 5	10÷ 70	-	-	15÷ 180	0,07÷ 110	10÷ 45	2,8÷ 8
В корпусе с предварительным внутренним напряжением	15÷ 2 5	8÷ 15	15÷ 90	-	-	15÷ 110	0,07÷ 110	10÷ 30	2,8÷ 3
Низковольтные актюаторы в корпусе с предварительным нагружением	4÷ 20	-	20÷ 20 0	-	-	10÷ 200	0,17÷ 110	5÷ 40	0,5÷ 14
Пьезокартридж – низковольтные актюаторы в корпусе с резьбой для фронтального соединения М 8÷ 14	4÷ 10	-	25÷ 15 0	-	-	25÷ 200	0,34÷ 5,6	-	0,15÷ 3
Низковольтные электрострикционные актюаторы (пакет)	5÷ 7	-	20÷ 70	-	-	6÷ 40	1,2÷ 22	-	0,5÷ 1
Полый цилиндр	15	-	3÷ 35	-	-	2÷ 12	4÷ 22	-	0,5÷ 5

Для актюаторов обычно указывается величина свободного перемещения (ход) и развиваемая сила (усилие). Свободное перемещение означает перемещение, которое может быть достигнуто при максимальной величине напряжения при полностью свободном ходе актюатора. Развиваемая сила означает усилие, которым обладает актюатор при максимальной величине напряжения при отсутствии смещения. Величина емкости определяет быстродействие актюатора.

В таблице 1 приведены эксплуатационные параметры в зависимости от геометрических размеров пьезокерамического изделия при минимальном и максимальном значении геометрических параметров. По устройству и технологии изготовления различают пакетные и моноблочные конструкции пьезоактюаторов, которые, в свою очередь, в зависимости от режима включения подразделяются на высоковольтные (максимальное рабочее напряжение до 1000 В) и низковольтные (максимальное рабочее напряжение до 150–200 В).

Развиваемая сила прямо пропорциональна площади сечения актюатора, а величина свободного перемещения линейно зависит от длины актюатора и используемого пьезоке-

рамического материала. Зависимость резонансной частоты и емкости от геометрических размеров определяется соотношениями, приведенными в таблице 2.

Таблица 2

Тип актюатора	Геометрические размеры					Расчетные значения	
	D	d	L	a	в	Резонансная частота, кГц	Емкость, мкФ
	мм	мм	мм	мм	мм		
Пакетный	D	-	L	-	-	$\frac{N}{L}$	$\frac{\epsilon_{33}^T \pi D^2}{4 \times L}$
Кольцевой	D	d	L	-	-	$\frac{2N}{D-d}$	$\frac{2\epsilon_{33}^T \pi L}{\ln D/d}$
Прямоугольный	-	-	L	a	в	$\frac{N}{L}$	$\frac{\epsilon_{33}^T \times a \times в}{L}$

*Примечание:*

$\epsilon_{33}^T$  — диэлектрическая проницаемость пьезоматериала;

$N$  — частотная постоянная пьезоматериала

Пьезоактюаторы работают в двух режимах: однополярный и биполярный режимы.

В биполярном режиме величина напряжения противоположной полярности обычно составляет 20% от величины максимального положительного напряжения. В биполярном режиме работы возможно увеличение хода и усилия на 30% (в таблице 1 эти значения указаны для биполярного режима).

Пьезоактюаторы изготавливаются путем сборки пьезокерамических дисков и колец с металлизированными поверхностями в пакет, в котором для внешних соединений используются металлические межсекционные электроды. Жесткая конструкция формируется либо с помощью высококачественных клеевых материалов, либо путем пайки твердым припоем. Отдельные пьезоэлементы соединены между собой параллельно электрически, что позволяет создать устройство, обладающее максимальной деформацией. Толщина диска и кольца 0,25–0,5 мм, количество слоев 7–40 шт. Материал электродов — серебро и серебряно-палладиевый сплав — наносится методом трафаретной печати на керамическую поверхность (толщина слоя 6–12 мкм).

Для повышения механической прочности, стойкости к климатическим воздействиям и температурным перегрузкам пьезокерамические изделия помещаются в корпус из меди или ее сплавов, обеспечивающий лучший теплосъем. При помещении пьезокерамического актюатора в корпус с целью повышения жесткости конструкции и, соответственно, повышения эксплуатационных параметров и надежности, с помощью специальных устройств (пружин или гибких элементов) осуществляется предварительное механическое нагружение в осевом направлении (предварительное усилие) — усилие сжатия от 50 до 1500 Н. Предварительное нагружение позволяет работать при подаче положительного и отрицательного напряжения, исключает наклон концевых поверхностей актюатора и обеспечивает их параллельность при установке в изделиях.

Конструкция высоковольтных бескорпусных прямоугольных актюаторов представляет собой прямоугольный брус. Актюаторы изготавливаются из моноблока пьезокерами-

ческого материала по технологии изготовления пьезоизделий. На боковую поверхность наносятся серебряные электроды (толщина слоя 6–12 мкм), к которым припаиваются провода. Максимальные габариты определяются возможностями существующего техпроцесса изготовления пьезокерамических изделий.

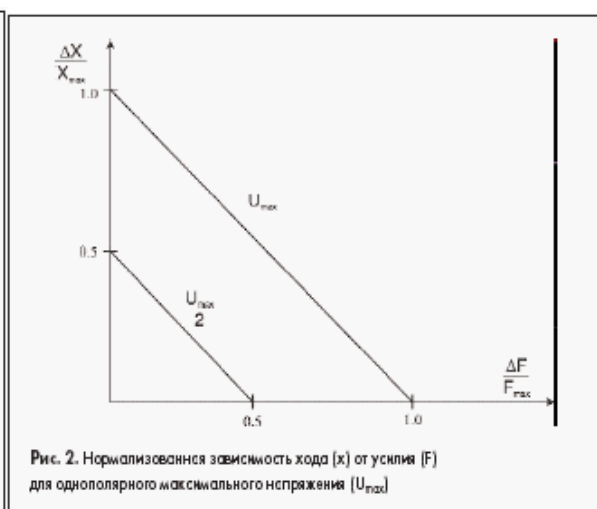
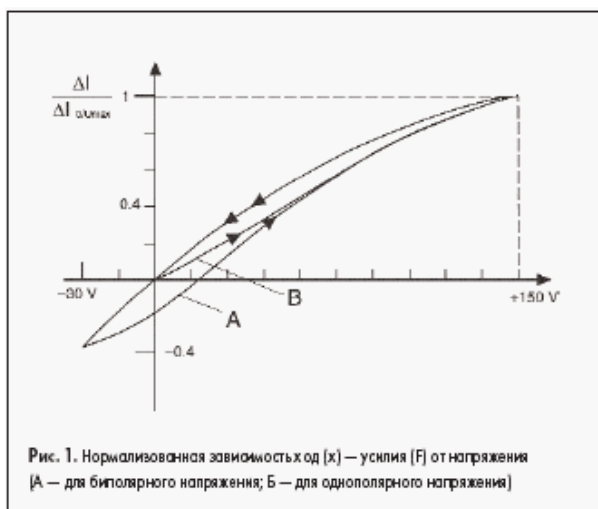
Конструкция низковольтных кольцевых актюаторов представляет моноблок из пьезокерамического материала в виде полого цилиндра, на боковые поверхности которого нанесены серебряные электроды.

Картриджный вариант пакетного актюатора имеет конструктивную особенность, позволяющую выполнять простое крепление актюатора к механической системе с помощью резьбового соединения для фронтального монтажа.

Картриджные актюаторы предназначены для работы в оптико-механических устройствах. С помощью резьбы осуществляется грубая юстировка зеркала, а точная настройка осуществляется пьезовоздействием. Чувствительность — точность перемещения стандартных конструкций актюаторов от 0,01 до 0,1 нм.

Эксплуатация пьезоактюаторов в промышленной аппаратуре в течение пяти лет показала их высокую надежность: частота отказа — менее 1%.

На рис. 1 представлены зависимости основных параметров пьезоактюаторов от напряжения, а на рис. 2 — зависимость перемещения (хода) и развиваемой силы.



Зависимость хода и развиваемой силы от напряжения имеет ярко выраженный гистерезис — различие величины при возрастании и падении напряжения. Данное явление определяется свойствами пьезоматериала. Типовые пьезоматериалы имеют гистерезис 15x20%.

Как видно на рис. 2, величина развиваемого усилия уменьшается с увеличением значения свободного перемещения практически линейно.

В устройствах прецизионного позиционирования необходимо исключить явление гистерезиса в пьезоактюаторах. Это возможно либо путем замены пьезоматериала, либо

путем активной стабилизации пьезоактюатора с применением систем управления с обратной связью.

В настоящее время для стабилизации параметров актюаторов используются электрострикционные материалы. Электрострикционный материал (ниобат магнезия свинца — титаната свинца типа PMN-PT) позволяет получить такие же перемещения и усилия, как и при применении пьезокерамического материала при малой петле гистерезиса  $\sim 1\%$ . Электрострикционные актюаторы обладают внутренней стабильностью и способны точно возвращаться в нулевую точку. Получение аналогичных характеристик в пьезоактюаторах возможно только при применении активной обратной связи с установкой датчиков позиционирования для определения действительного положения.

Основным недостатком электрострикционных актюаторов является зависимость их эксплуатационных параметров от температуры окружающей среды. Оптимальный температурный диапазон  $15\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}$ , максимальное значение параметров при температуре  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

Высокие значения пьезомодуля ( $d_{33} > 2000\text{ нКл/Н}$ ) и диэлектрической проницаемости электрострикционного материала ( $\epsilon T_{33} = 15000\text{--}20000$ , тогда как для пьезокерамики  $\epsilon T_{33} = 1500\text{--}3000$ ) более чем на порядок повышают емкость электрострикционных актюаторов, увеличивая потребление тока, и при этом почти на порядок снижают быстродействие.

По этой причине они в основном используются в квазистатическом режиме работы и нашли свое применение в оптической и электронной промышленности в устройствах квазистатических перемещений при стабильных условиях с оптимальным поддержанием температуры окружающей среды  $+25\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ ).

В настоящее время осуществляется широкое внедрение актюаторов в различные области науки и техники, сформулированы основные требования к актюаторам в перспективных приборных разработках для электронной, химической, фармацевтической, автомобильной промышленности.

Основные области применения:

- прецизионная техника: современные пневматические и гидравлические клапаны с бы-стродействием до  $10\text{ мкс}$ ;
- интеллектуальное управление работой двигателя: предварительный впрыск топлива в двигателях автомобилей и последующее управление аналоговой схемой основного впрыска;
- системы оптической оптоволоконной линии связи — стыковка и подстройка оптических волокон, волоконных лазеров;
- прецизионный контроль и точное позиционирование технологического оборудования в электронном производстве;
- автоюстировка и подстройка лазерных зеркал, интерферометров, приводы для адаптивной оптики;
- управление и компенсация вибрации станков, транспортных средств (активное демпфирование вибрации рамы самолетов).



Широкое внедрение актюаторов сдерживает их относительно высокая стоимость и габариты, что связано со сложностью их компоновки в изделиях.

В последние годы созданы недорогие многослойные актюаторы — альтернатива пакетным актюаторам.

Многослойные актюаторы (рис. 3) состоят из чередующихся тонких слоев пьезокерамики и электродов. Толщина керамического слоя обычно 20–100 мкм. В многослойном актюаторе каждый слой соединен с последующим слоем электрически параллельно. Перемещение, создаваемое структурой, является суммой перемещений всех слоев.



Преимущество конструкции заключается в том, что для заданного уровня деформации требуется напряжение в  $N$  раз ниже ( $N$  — количество слоев, обычно от 10 до 40), чем в монолитном исполнении с теми же размерами. Многослойные актюаторы изготавливаются по стандартной технологии многослойных конденсаторов. На начальном этапе формируется пакет из тонкослойных пластин или шайб.

При большом давлении пакет уплотняется и спекается при высокой температуре. Образуется многослойный керамический блок с параметрами, близкими к теоретическому пределу монолитной керамики. В отличие от пакетных актюаторов, многослойные актюаторы имеют более высокую жесткость и деформацию и, соответственно, более высокую резонансную частоту и быстродействие. Они способны развивать значительные усилия пропорционально площади сечения (сечение  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  может создать усилие до 1000 Н).

В настоящее время сформулированы основные области применения многослойных актюаторов:

- системы впрыска топлива — управление клапанами с быстродействием  $\sim 1\text{--}10 \text{ мс}$  при максимальном ходе 3–5 мкм и усилием до 5 кН;
- системы гашения вибрации, усилие до 100 кН;
- системы торможения и системы подвески автомобиля;
- оптико-механические устройства с системой активной стабилизации;
- системы гашения вибрации корпуса и крыла самолета с целью снижения уровня шума до 40–10 дБ и т. д.

Внедрение актюаторов позволит повысить надежность, безопасность и комфорт современных автомобилей, существенно сократить расход топлива за счет оптимизации режим работы двигателя.

В России основным разработчиком и производителем пьезоактюаторов является ОАО «ЭЛПА». В настоящее время с целью удовлетворения современных требований к пьезоактюаторам в ОАО «ЭЛПА» проводятся исследования и разработки новых типов пьезоактюаторов на базе современных технологий. Новая конструктивно-технологическая база позволяет выпускать по требованиям заказчика уникальные образцы пьезоактюаторов, в полной мере соответствующих уровню разработок лучших аналогичных зарубежных образцов.

## ДИСКРЕТНЫЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Частоты 400 – 500кГц, оказались как нельзя более подходящими для пьезокерамических фильтров. Именно такие частоты способствовали созданию дешёвых, технологичных фильтров, и их размеры оказались в десятки раз меньше, чем у фильтров сосредоточенной селекции на катушках и конденсаторах. Пьезокерамические резонаторы, из которых строится фильтр, обычно выполняют в форме диска диаметром 5 – 6 мм или квадрата со стороной около 5мм. Характеристики фильтра всецело зависят от параметров и количества резонаторов их составляющих.

Далее попытаемся дать представление о том, как работает дискретный полосовой пьезокерамический фильтр и о том, как конструктивно устроены фильтры, выпускаемые в промышленных масштабах. При этом несколько пожертвуем научной строгостью, опустив подробности, которые не столь существенны для первого знакомства. Для начала разберёмся с резонаторами, элементарными кирпичиками фильтров.

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Чем отличается пьезорезонатор от пьезоэлемента? Пьезорезонатор это «улучшенный» пьезоэлемент, если его рассматривать с позиции применения, то есть как колебательный элемент. Резонансная частота резонатора, для выбранного типа колебаний, должна возможно дальше отстоять от частот других типов колебаний. Это достигается конструктивно, путём выбора частотоопределяющего размера, по возможности, значительно больше или меньше других. Резонатор должен обладать достаточно высоким значением механической добротности и высокой стабильностью частоты во времени и в интервале рабочих температур. Это достигается путём выбора подходящей марки пьезокерамического материала. В фильтрах, являющихся предметом нашего рассмотрения, используются дисковые резонаторы, где в качестве основного типа колебаний используются радиальные колебания. Частота радиальных колебаний зависит от радиуса и не зависит от толщины. При таких колебаниях центр диска остаётся неподвижным, и это позволяет, не возмущая процесс колебаний, осуществить электрический и механический контакт в этой неподвижной точке.

Теперь посмотрим на поведение пьезокерамического резонатора. От чего зависит его резонансная частота? Во-первых, от диаметра. Чем больше диаметр, тем ниже частота. Произведение диаметра на частоту – величина постоянная. Она называется частотной постоянной. При заданной длине диаметра резонансная частота определяется всего двумя характеристиками материала из которого он изготовлен. Это плотность и упругость. Как возбудить радиальные колебания диска? Очень просто. Надо приложить переменное усилие по толщине диска. Деформируя диск по толщине, мы вызываем ответную деформацию в перпендикулярном направлении. Это происходит потому, что любое твёрдое тело стремится сохранить свой объём. Разным телам это удаётся по-разному, но в среднем деформация в поперечном направлении составляет 1/3 от деформации в направлении приложенной силы. Так как материал резонатора является пьезоэлектриком, то вынуждающую силу можно создать за счёт пьезоэффекта. Таким образом, приложив переменное напряжение вдоль толщины, можно возбудить радиальные колебания, в том числе, на резонансной частоте.

Далее попытаемся удивить читателя следующим экспериментом. Будем возбуждать в резонаторе свободные затухающие колебания, действуя одиночными импульсами достаточно высокого напряжения длительностью, примерно, полпериода резонансной частоты радиальных колебаний. На рис. 1а такой импульс подаём путём размыкания и замыкания ключа, а на рис.1б, наоборот, путём замыкания и, через полпериода, размыкания ключа.

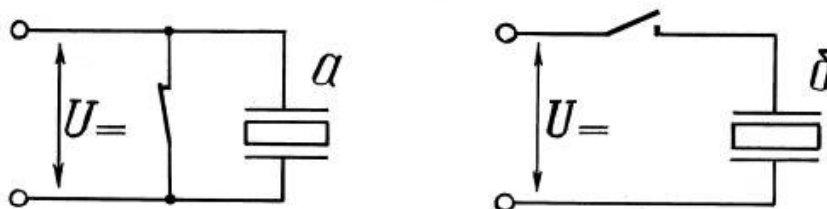


Рис.1. Возбуждение пьезокерамического резонатора путём кратковременного размыкания ключа (а) и кратко-временного замыкания ключа (б).

Такое ударное воздействие возбуждает в резонаторе свободные колебания, частоту которых, без особых технических проблем, можно измерить. Оказывается, частоты свободных колебаний разные! Отличие достигает 20%. Всё дело в условиях, в которых наблюда-

ем колебательный процесс. В первом случае наблюдаем колебания резонатора с закороченными электродами, а во втором – с разомкнутыми. В первом случае потенциал электродов равен 0 (в общем случае – постоянный), тогда как во втором случае, вследствие пьезоэффекта, переменный. Знак изменяющегося напряжения между электродами всегда таков, что оно всегда, как и сила упругости, старается вернуть колеблющийся элемент к положению равновесия. То есть, возникающее вследствие пьезоэффекта напряжение «помогает» силе упругости. Сила упругости или, иными словами, жёсткость становится больше, а значит частота выше. Чем эффективнее пьезоэлектрик, тем больше «пьезодовесок» к силе упругости.

Рассмотрим поведение резонатора под действием вынуждающей силы синусоидальной формы. Соберём схему согласно рис.2 и будем наблюдать осциллограммы напряжений на резонаторе.

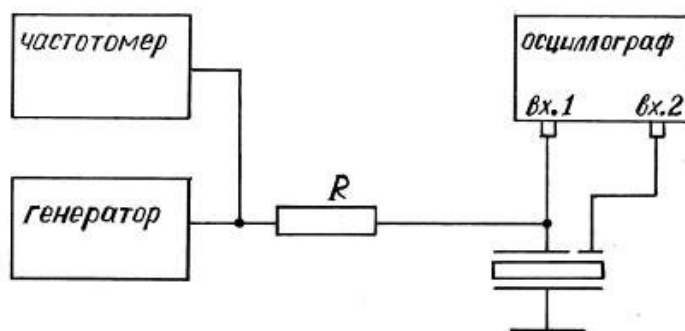


Рис.2. Схема возбуждения резонатора напряжением синусоидальной формы.

Резонатор в этой схеме не совсем обычен. На одном из его электродов «выцарапан» маленький контрольный электрод. Он нам нужен для того, чтобы следить за фактическим состоянием механического колебательного цикла. Ведь напряжение на контрольном электроде, который изолирован от основного, в точности воспроизводит деформацию резонатора. Напряжения с основного и контрольного электрода подадим на входы двухлучевого осциллографа. Настроив генератор на ту частоту, которую мы измерили в предыдущем опыте по рис.1а, заметим, что напряжение на резонаторе уменьшилось в десятки раз, а фазовый сдвиг между напряжениями на основном и контрольном электродах составил почти  $180^\circ$  (смотреть осциллограмму на рис.3 слева). Это означает следующее.

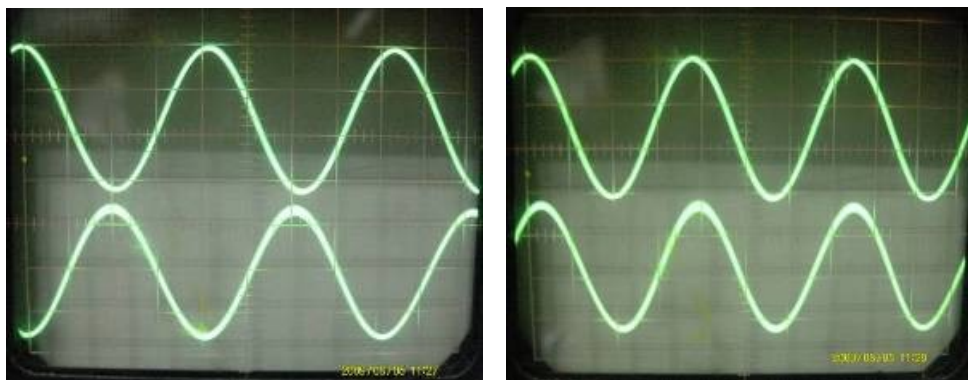


Рис.3. Осциллограммы напряжений на основном (вверху) и контрольном (внизу) электродах

Изменение заряда на основном электроде при механическом колебательном движении постоянно компенсируется притоком или оттоком зарядов от генератора. В результате потенциал остаётся, практически, постоянен и, тем самым, реализуется тот же режим, как с замкнутыми электродами, что на рис.1а. На контрольном же электроде такой компенсации не происходит и напряжение на нём остаётся близким к напряжению генератора. По существу мы убедились в том, что на данной частоте резонатор резко уменьшил своё сопротивление, а напряжение генератора перераспределилось на добавочный резистор R. Тот факт, что нам всё-таки удалось наблюдать осциллограмму, разумеется, при увеличенной чувствительности, свидетельствует о том, что резонатор обладает небольшим эквивалентным сопротивлением, связанным с тепловыми потерями в материале резонатора вследствие внутреннего трения.

На правом фотоснимке, на рис.3, представлена осциллограмма, когда, увеличивая частоту генератора, достигли максимального напряжения на основном электроде. Видим, что при этом фазовый сдвиг с напряжением на контрольном электроде стал близким к нулю. Вспомним, что контрольный электрод у нас изолирован, как и на рис.1б. Следовательно, также и основной электрод ведёт себя как изолированный. Генератор пытается дать заряды или снять заряды с резонатора, а резонатор их либо не берёт, либо не возвращает, либо «догоняет», либо «убегает». Он «выбрал» на этой частоте такую фазу механических колебаний, будто его электроды изолированы от внешнего мира, как контрольный электрод, как электроды на рис.1б. На этой частоте ток минимален, сопротивление велико. Некоторая проводимость резонатора опять же связана с тепловыми потерями в его теле. Потребляемая мощность идёт только на компенсацию этих потерь, она поддерживает незатухающие колебания. Разница в частотах также видна на осциллограммах.

Характерные частоты для двух рассмотренных картин, по принятой терминологии, называются резонансной  $f_r$  и антирезонансной  $f_a$  частотой. Разность этих частот называют резонансным промежутком  $\Delta f$ . На частотах ниже резонансной и выше антирезонансной резонатор проявляет себя как конденсатор, ёмкость которого, главным образом, определяется площадью электродного покрытия и толщиной керамического диэлектрика, который имеет диэлектрическую проницаемость порядка 1000.

Каков порядок величин ёмкостного и эквивалентных активных сопротивлений резонаторов, применяемых в пьезокерамических фильтрах? Ёмкостное сопротивление имеет порядок 2-3 кОм. На резонансной частоте эквивалентное сопротивление имеет активный характер и порядок величины, в среднем, 50-100 Ом. На антирезонансной частоте его сопротивление также активно и имеет порядок сотен килоом. Величина ёмкостного сопротивления обычно равна среднему геометрическому сопротивлений на резонансе и антирезонансе. То есть, при настройке в резонанс сопротивление резонатора уменьшается во столько же раз, во сколько раз увеличивается сопротивление на антирезонансе.

Изучив поведение резонаторов в интервале частот, можно приступить к построению полосовых пьезокерамических фильтров.

## ЛЕСТНИЧНАЯ СХЕМА

Пьезокерамические фильтры, выпускаемые промышленностью, обычно выполняют по лестничной схеме. Эта схема позволяет наиболее просто и дёшево реализовать себя в конструктивном исполнении. Лестничный фильтр состоит из звеньев или ступеней. Простейший фильтр – однозвенный, а два последовательно соединённых резонатора представляют простейшее звено. На рис.4 показана схема двухзвенного лестничного фильтра, из которого становится ясным происхождение названия.

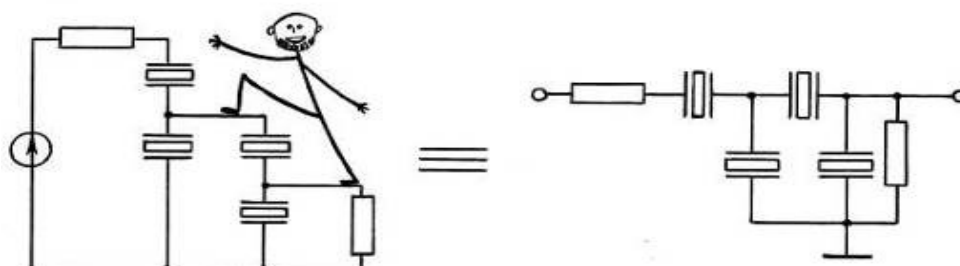


Рис.4. Принципиальные схемы двухзвенного лестничного фильтра.

На правой картинке изображена та же схема в общепринятом виде. Чтобы понять, как работает сколь угодно сложный фильтр, достаточно разобраться с работой отдельного звена.

### Как фильтр фильтрует

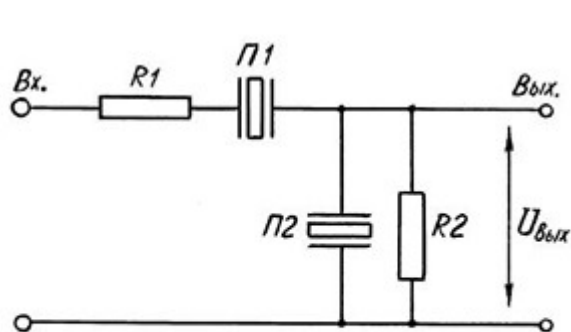


Рис.5. Схема простейшего фильтра

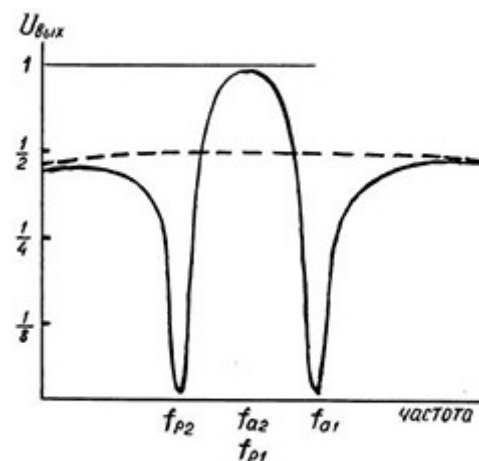


Рис.6. Частотная зависимость выходного напряжения

Рассмотрим схему простейшего, однозвенного фильтра, рис.5. Он включает в себя входное  $R1$  и выходное  $R2$  нагрузочные сопротивления, пьезокерамический резонатор горизонтальной ветви  $\Pi1$  и пьезокерамический резонатор вертикальной ветви  $\Pi2$ . Предположим, что резонаторы взяты с одинаковой ёмкостью. Пусть резисторы также одинаковы, а по величине равны сопротивлению конденсатора, который имеет такую же ёмкость, как у резонаторов. (Частоту имеем в виду равной номинальной частоте фильтра).

Далее условимся, что мы владеем каким-то фантастическим способом, позволяющим включать и выключать пьезоэффект. Выключив пьезоэффект, мы превратим резона-

торы в конденсаторы. Тогда характеристика схемы будет иметь вид пунктирной линии, изображённой на рис.6. Перед тем как включить пьезоэффект раскроем маленькую хитрость. Резонаторы П1 и П2 настроены не на одну и ту же частоту. Их частоты сдвинуты на величину резонансного промежутка  $\Delta f$  таким образом, что резонансная частота  $f_{p1}$  резонатора П1 равна антирезонансной частоте  $f_{a2}$  резонатора П2. Расстановка частот показана на частотной оси рис.6. Рассматривая схему на рис.5 как частотнозависимый делитель напряжения и зная порядки эквивалентных сопротивлений резонаторов П1 и П2 на отмеченных частотах, можно легко убедиться, что частотная зависимость напряжения на выходе делителя будет именно такой, как изображена на рис.6. На этой зависимости имеют место два полюса на частотах  $f_{p2}$  и  $f_{a1}$ . В левом полюсе сигнал близок к нулю из-за малого сопротивления резонатора П2, а в правом – благодаря большому сопротивлению резонатора П1. Между полюсами формируется полоса пропускания. Нетрудно видеть, что напряжение на выходе делителя, в точке  $f_{a2}$ ,  $f_{p1}$ , в основном определяется соотношением плеч резистивного делителя R1 и R2. Картина между полюсами радует, чего нельзя сказать о внешней части. Кривая вне полюсов очень быстро сливается с пунктирной линией, где напряжение лишь, приблизительно, в два раза меньше, чем в центре полосы пропускания. Оно, это напряжение, определяется отношением ёмкостей резонаторов. Уменьшив ёмкость резонатора П1 и увеличив ёмкость П2, мы улучшим характеристику фильтра за полюсами. Он будет лучше подавлять сигналы вне полосы пропускания. Повлияет ли такое действие на форму кривой внутри полюсов? Да, повлияет, и в худшую сторону. Но эта форма настолько хороша, что может пойти на некоторые жертвы. Эти жертвы будут незначительны и вполне допустимы при отношении ёмкостей 4 - 6. Поэтому резонаторы для горизонтальных и вертикальных ветвей делают разными. Первые должны иметь ёмкость в несколько раз меньше, чем у вторых, и их выполняют более толстыми и с площадью электрода поменьше. Однако и в этом случае подавление сигнала за пределами полосы пропускания будет недостаточно. Дальнейшее улучшение характеристики фильтров достигается увеличением количества звеньев. Далее познакомимся с устройством промышленного многозвенного лестничного фильтра.



## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР ФП1П1-60

Параметрический ряд фильтров ФП1П1-60 насчитывает более десятка типонаименований. За годы, прошедшие от разработки и начала производства, этих фильтров, в общей сложности, было выпущено около 50 миллионов штук. Такой высокий количественный показатель был достигнут благодаря созданию технологии массового производства резонаторов, простотой его устройства фильтра и лёгкостью сборки.

Фильтр состоит из 7 резонаторов, в том числе 4 резонатора стоят в вертикальных ветвях и 3 резонатора в горизонтальных. При выборе схемы, для обеспечения требуемых характеристик, возможны и другие варианты. Например, 3 резонатора в вертикальных ветвях и 4 – в горизонтальных. Или вариант с 6 или 8 резонаторами (3 или 4 звена). Однако выбранный вариант (см. рис.7а) является уникальным в том смысле, что только он допускает самое простое компоновочное решение при минимальном числе деталей. Это решение иллюстрируется на рис.7б. Только эта принципиальная схема позволила расположить резонаторы в одну линию, чередуясь с одинаковыми пружинящими контактами.

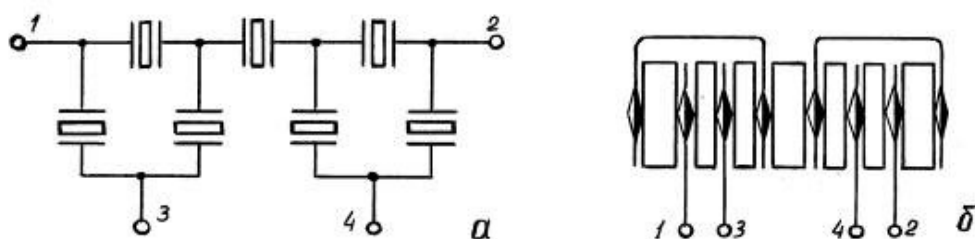


Рис.7. Принципиальная схема пьезокерамического фильтра ФП1П1-60 (а) и соответствующая компоновочная схема (б).

Четыре контакта попарно соединены внутри фильтра, а четыре снабжены внешними выводами. Конструкция фильтра создана на основе этой компоновочной схемы. Фильтр состоит, не считая резонаторов, всего лишь из четырёх видов деталей. Это ячеистый корпус, четыре контакта с выводами, два контакта с перемычками и пластмассовая прокладка для защиты сборки от герметизирующего компаунда. Устройство фильтра и одновременно последовательность сборки, начиная от набора деталей и кончая герметизацией компаундом, показана на рис.8.



Рис.8. Устройство и последовательность сборки пьезокерамического фильтра ФП1П1-60.

Пьезокерамические фильтры ФП1П1-60, имея в своём составе семь резонаторов, обладают превосходными фильтрующими характеристиками и удовлетворяют требованиям подавляющего большинства применений. Лишь в некоторых специальных случаях используются фильтры с увеличенным количеством резонаторов. Рассмотрим типичную амплитудно-частотную характеристику и сделаем некоторые комментарии.

## АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В качестве примера возьмём пьезокерамический фильтр ФП1П1-60-06, который предназначен для формирования частотной характеристики тракта промежуточной частоты сигналов с узкополосной частотной модуляцией. Его типичная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) или, иначе, характеристика затухания приведена на рис.9.

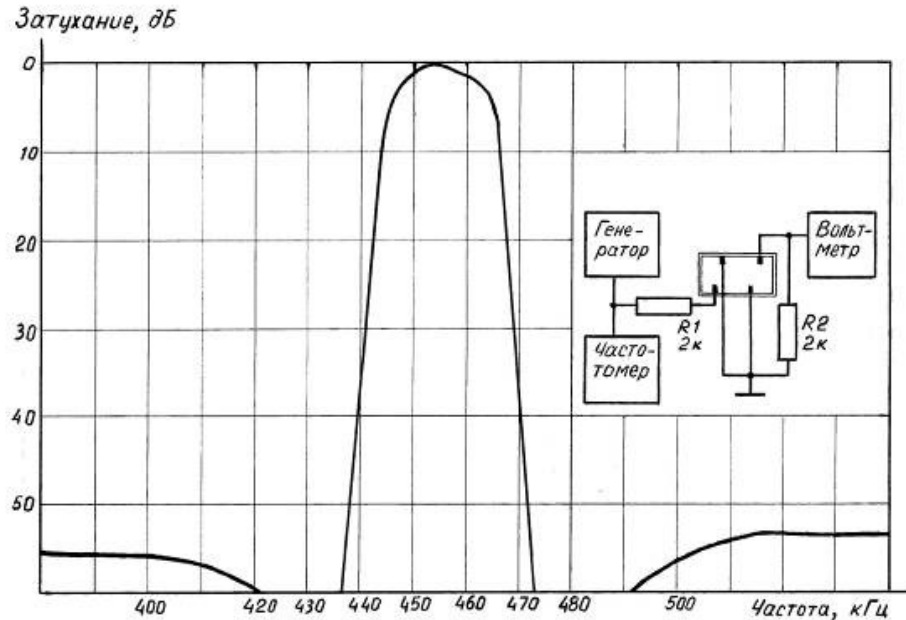


Рис.9. Типичная АЧХ пьезокерамического фильтра ФП1П1-60-06 со схемой измерения.

На поле того же рисунка изображена схема, с помощью которой эта характеристика была снята. Фильтр имеет номинальную частоту 455кГц. Отсчёт затухания ведётся от высшей точки АЧХ, в которой фильтр вносит минимальные потери. Минимальная величина вносимого затухания для данного типоминнала составляет обычно 2дБ. Характеристика в области полюсов не показана. Она обрезана на уровне 60 дБ. Полосу пропускания оценивают по уровню 6дБ. Она, в этом примере, составляет 21 – 22кГц. Такая полоса необходима для неискажённой передачи сигнала с узкополосной ЧМ. Посмотрим теперь на общие особенности пьезокерамических фильтров в отличие от фильтров, построенных с использованием колебательных LC-контуров, и подробнее обсудим некоторые параметры АЧХ.

АЧХ пьезокерамических лестничных фильтров, будучи составленными из высокодобротных элементов (механическая добротность порядка 500) и имея полюса затухания, отличается очень крутыми склонами. Затухание же, вносимое фильтром в полосе задерживания, постоянно в широком интервале. На очень низких частотах оно увеличивается. На частоте выше номинальной первая паразитная полоса пропускания фильтров с круглыми резонаторами находится вблизи 1,1 – 1,2 МГц. Её относительный уровень составляет 20 – 25дБ от основной полосы. Если фильтр собран из квадратных резонаторов, то паразитная полоса находится около 700кГц. Затухание за пределами полосы пропускания называется гарантированным затуханием. Его нормируют для конкретного диапазона частот, например,  $f_{\text{ном}} \pm 100\text{кГц}$ , исключая, конечно, полосу пропускания по уровню заданной величины гарантированного затухания. Задание такой полосы задерживания имеет чисто методический смысл. Так удобно изготовителю осуществлять контроль. Реальная же полоса задер-

живания начинается от нуля и, фактически, ограничивается первой паразитной полосой пропускания, частота которой была указана выше.

Сделаем несколько замечаний по поводу состава и формулирования параметров АЧХ. Некоторые параметры, в силу традиции, восходящей к LC-фильтрам, применительно к пьезокерамическим фильтрам теряют смысл или превращаются в формальность. Так, важнейшим параметром LC-фильтров является величина затухания при отстройке от центральной частоты. Только этот параметр характеризует его селективность. В случае АМ-сигналов принята отстройка  $\pm 9\text{кГц}$ . Это означает, что при ещё большей отстройке затухание будет ещё больше. В случае пьезокерамических фильтров – иная ситуация. Она зависит от того, на какой участок характеристики попадём, отстроившись от центральной частоты. Можно декларировать поистине фантастическое затухание, если величину отстройки совместить с полюсами. Но какой в этом практический смысл, если при ещё большей отстройке затухание быстро уменьшается до величины гарантированного. Существует ряд пьезокерамических фильтров типа ФП1П1-61 (ниже мы вернёмся к ним), типонаминалы которых отличаются величиной затухания при отстройке на  $\pm 9\text{кГц}$ . Это формальное отличие по существу не сказывается на качестве АМ-тракта, а даёт лишь повод изготовителю назначать более высокую цену за «лучшие» типонаминалы. Более естественным для пьезокерамических фильтров и методически более удобным является задание параметров АЧХ в области полосы пропускания путём ограничения снизу полосы пропускания по уровню бдБ и ограничения сверху по уровню, равному по величине норме гарантированного затухания.

Обсудим форму АЧХ в пределах полосы пропускания. В более простых случаях применения достаточно наложить ограничение на неравномерность характеристики по амплитуде, то есть на относительный уровень всплесков и провалов. Допустим, на характеристике нет всплесков и провалов. Как теперь должна выглядеть идеальная характеристика? Может быть, её вершина должна быть плоская, а склоны строго вертикальными? Оказывается, она не должна быть такой. Любой фильтр вносит в сигнал, помимо амплитудно-частотных, также фазовые искажения. В случае прохождения аналогового сигнала с аудио информацией фазовые искажения значения не имеют, так как сигнал предназначен для наших ушей, которые нечувствительны к фазовым искажениям. Другое дело, когда производится передача сигнала в цифровом формате и сигнал должен затем преобразовываться в аналоговый. В этом случае все компоненты сигнала должны получить одинаковую временную задержку (замедление). Это возможно лишь при линейной фазо-частотной характеристике или параболической амплитудно-частотной характеристике. АЧХ фильтра параболой не может быть в принципе, так как она заключена между асимптотами, однако её центральной части можно придать форму, близкую к параболе.

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ФП1П1-61

Возвратимся к рис.7. Отбросим на принципиальной схеме фильтра ФП1П1-60 слева или справа три резонатора, а на компоновочной схеме те же три резонатора и два контакта. Тогда, в конструктивном смысле, будем иметь частный случай более простого фильтра. В фильтре ФП1П1-61 только две детали отличаются от деталей фильтра ФП1П1-60. Это укороченные корпус и прокладка. Фильтры ФП1П1-61, имея уменьшенные размеры и довольно неплохие, благодаря двухзвенной схеме, параметры, нашли самое широкое применение в портативных приёмниках АМ-вещания. Этим фильтрам также было выпущено не менее 50 миллионов штук.

Приведём пример амплитудно-частотной характеристики одного из типонаименований (ФП1П1-61-04) этого фильтра. Она изображена на рис.10. На рис.11 изображены фотографии внешнего вида фильтров ФП1П1-61.

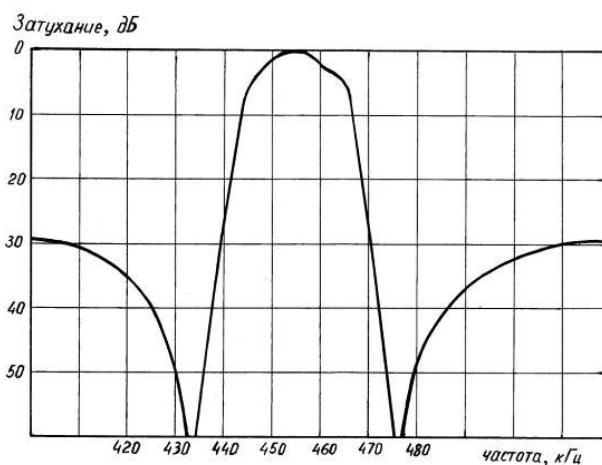


Рис.10. Амплитудно-частотная характеристика фильтра ФП1П1-61-04-Х

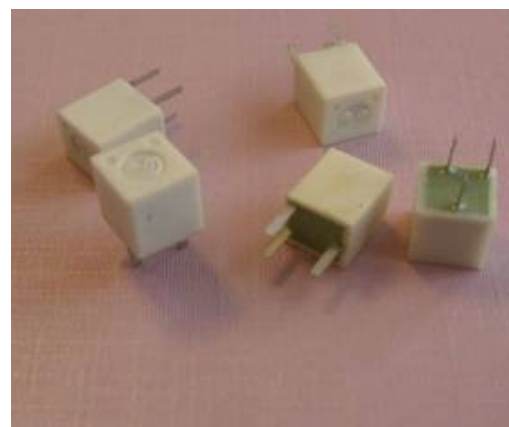


Рис.11. Фильтры ФП1П1-61

Мы выбрали для иллюстрации данный типонаименование с тем, чтобы сопоставить с аналогичной по полосе пропускания и номинальной частоте характеристикой фильтра ФП1П1-60-06. Изображение приводим в тех же координатных осях, чтобы показать их отличие в связи с разным количеством резонаторов.

## КАК УПРАВЛЯТЬ ПАРАМЕТРАМИ

Это очень просто. Интегральное потребительское качество (назовём это так) дискретного пьезокерамического фильтра определяется количеством резонаторов. Для конкретной принципиальной схемы с выбранным числом резонаторов это качество остаётся постоянным. Имеется в виду следующее. Варьируя параметры резонаторов, можно улучшить тот или иной параметр, но только ценой ухудшения другого параметра. Увеличение ёмкостного отношения влечёт увеличение гарантированного затухания. Это хорошо. Одновременно увеличиваются вносимые потери и уменьшается крутизна склонов. Это плохо. Тем не менее, на практике, этот механизм создания типономиналов используют, так как возможны разные компромиссные решения в зависимости от особенностей применения. Однако основной вопрос, который должен интересовать разработчика – это сколько в фильтре резонаторов. Хорошее гарантированное затухание в полосе задерживания обеспечивается достаточным количеством резонаторов. Фильтр ФП1П1-60 содержит семь резонаторов. Достаточно ли это? Он обеспечивает величину гарантированного затухания не менее 50дБ. Надо ли ещё улучшать этот показатель? Скорей всего нет, потому что затухание свыше 50дБ непросто реализовать в составе устройства без принятия специальных мер по исключению прохождения сигнала в обход фильтра. Монтажная ёмкость между входом и выходом всего в 1пФ уже ограничивает затухание на уровне 40дБ. Для некоторых применений требуются фильтры с особо крутыми склонами АЧХ, например, для выделения одной боковой полосы. В этом случае используют резонаторы с небольшим ёмкостным отношением, а потерю затухания, в связи с этим, восполняют количеством звеньев. Фильтр одной боковой полосы ФП1П1-64 имеет в своём составе 13 резонаторов.

Как управлять шириной полосы пропускания? Ранее мы видели, что расстояние между полюсами фильтра равно удвоенному резонансному ( $2\Delta f$ ) промежутку. Ширина полосы пропускания по уровню 6дБ обычно близка к  $\Delta f$ . Она может быть шире или уже. Это зависит от ёмкостного отношения. Резонансный промежуток это показатель полосности. Пьезокерамические материалы, применяемые в фильтрах, покрывают интервал относительных резонансных промежутков (по отношению к номинальной частоте) от 1% до 10%. Стало быть, фильтры на частоту 455кГц могут иметь ширину полосы пропускания по уровню 6дБ от 4-5 до 40-50кГц.

## ДИСКРИМИНАТОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Основная область применения дискриминаторных фильтров – схемы детектирования частотно-модулированных сигналов. Обычно дискретный дискриминаторный фильтр включает в себя всего лишь один резонатор и представляет собой двухполюсник, а его рабочей характеристикой служит фазо-частотная характеристика.

Прохождение сигнала в устройстве детектирования с применением пьезокерамического дискриминаторного фильтра происходит следующим образом. Ограниченный по амплитуде частотно-модулированный сигнал поступает на элемент фильтра, на выходе которого приобретает фазовый сдвиг, пропорциональный отклонению частоты сигнала от несущей частоты. Сигнал приобретает фазовую модуляцию по закону частотной. Затем фазо-модулированный сигнал поступает на фазовый детектор. На второй вход фазового детектора поступает, в качестве опорного, тот же сигнал, но без приобретённого фазового сдвига. На выходе фазового детектора выделяется демодулированный низкочастотный сигнал. Напряжение демодулированного сигнала пропорционально приобретённому фазовому сдвигу. Чтобы после демодуляции сигнал получился без искажений, приобретённый фазовый сдвиг также должен быть пропорционален отклонению частоты. А это значит, что фазо-частотная характеристика фильтра должна быть линейна в рабочем интервале частот.

Резонатор полосового фильтра, нельзя использовать как элемент дискриминаторного фильтра. На его фазо-частотной характеристике нет подходящего рабочего участка. Она состоит, либо из слишком пологих, либо из слишком крутых участков. Причина тому – высокая добротность. Для дискриминаторных фильтров применяется пьезокерамика с пониженной (50 – 100) механической добротностью. На рис.12 приведены фазо-частотные характеристики пьезокерамических резонаторов.

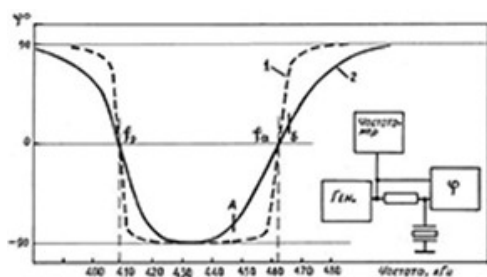


Рис.12. Фазо-частотные характеристики пьезокерамических резонаторов с высокой механической добротностью (кривая 1) и с пониженной добротностью (кривая 2)

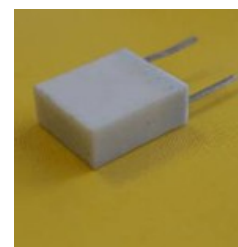


Рис.13. Пьезокерамический дискриминаторный фильтр ФП1Д1-22

В условиях серийного производства фазо-частотную характеристику дискриминаторных фильтров контролирует опосредованно. Непосредственно измеряются параметры демодулированного сигнала – амплитуда сигнала и коэффициент нелинейных искажений. Более того, нормы на эти параметры устанавливают для конкретной схемы детектирования, в составе которой контролируют фильтр, и при оговоренной величине девиации несущей. Существует множество интегральных микросхем приёмных трактов, которые предназначены для работы с пьезокерамическими дискриминаторными фильтрами. Каждый тип микросхемы по-своему влияет на фазо-частотную характеристику фильтра. Микросхемы также отличаются по степени предварительного усиления демодулированного сигнала. Поэтому нормы на параметры дискриминаторных фильтров формулируют применительно к «своей» микросхеме. В частности, фильтры ФП1Д1-22 были разработаны для использования в паре с микросхемой К174ХА26 или с её аналогами.

## **ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ЗВУКА**

Пьезокерамические излучатели звука получили весьма широкое распространение в самых различных областях техники. Нажимая кнопку калькулятора или мобильного телефона, мы слышим звук. Отклонение работы технологического оборудования от штатного режима сопровождается звуковым сигналом. Факт считывания цены товара подтверждает звуковой сигнал. При проникновении на охраняемый объект или в случае пожарной тревоги включается звуковой оповещатель. Во всех этих и многих других случаях использование именно пьезокерамических излучателей звука весьма оправдано ввиду их низкой стоимости и малого энергопотребления и веса по сравнению с традиционными электромагнитными и магнитоэлектрическими преобразователями.

В данной статье даётся представление об особенностях техники пьезокерамических электроакустических преобразователей, приводятся примеры серийно выпускаемых и разрабатываемых излучателей звука – звонков, оповещателей, сирен, рассматриваются особенности электронных схем с пьезокерамическими излучателями звука. Большой частью материал статьи составлен на основе личного опыта автора по разработке устройств с использованием пьезокерамики и ориентирован, главным образом, на инженеров по радиоэлектронике, имеющих дело с источниками звука или желающих «краем глаза» заглянуть в смежное направление техники.

## КАК С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ПОЛУЧИТЬ ЗВУК

Вообще, пьезокерамика неблагоприятная субстанция, для того, чтобы свои колебания сообщить воздушной среде. Проиллюстрируем это на таком примере. Пусть в пьезокерамическом образце возбуждена стоячая волна. Она характеризуется некоторым значением звукового давления и амплитудой смещения частиц при колебаниях. Поставим вопрос. Как отличаются амплитуды колебаний частиц в керамике и в воздухе при равных там и там звуковых давлениях? Ответ: в 75 тысяч раз. Причина в том, что произведение плотности воздуха на скорость звука в воздухе в 75 тысяч раз меньше, чем аналогичное произведение для керамики. Доля излучения по мощности ещё меньше – одна семидесятипяти тысячная в квадрате! Иное дело, передача звука в воду. Её плотность в тысячу раз больше и скорость звука в пять раз больше, чем у воздуха. Поэтому техника гидроакустики и техника воздушной акустики имеют мало общего.

Несмотря на такую пессимистическую предпосылку с помощью пьезокерамики удаётся получать значительные показатели по громкости. Отдельные образцы пьезокерамических преобразователей могут развивать звуковое давление на расстоянии 1м до 130дБ. Как ощутить эту цифру? Это болевой порог. Абсолютное значение звукового давления, соответствующего 130дБ – это 60 н/м<sup>2</sup> или 6 кГ/м<sup>2</sup>. Такой звук давит на барабанную перепонку с силой, примерно 0,2Г.

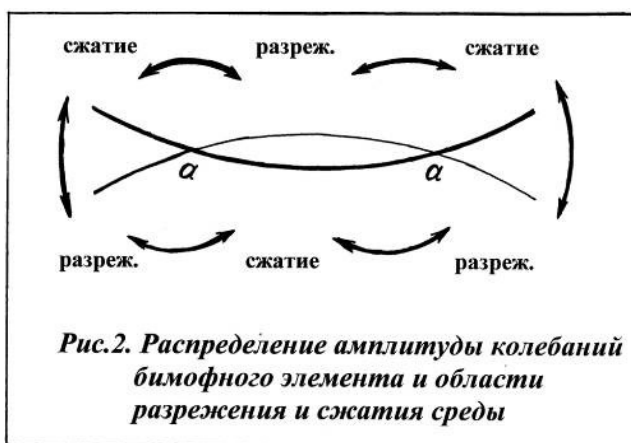
Кто не знает, что такое биметаллическая пластина? Две спечённые металлические пластины с различными коэффициентами линейного расширения при нагревании изгибаются на величину, многократно превышающую термическое удлинение. А если бы одна из пластин удлинялась, а другая пластина укорачивалась?.. Необходимым элементом электроакустического преобразователя с применением пьезокерамики является биморфная конструкция из двух тонких пьезоэлементов, из которых один при подаче напряжения растягивается, а другой сжимается. Чаще всего между пьезоэлементами вклеивается третий элемент – металлическая мембрана. Металл придаёт прочность конструкции. Ещё чаще бывает достаточно использовать один пьезоэлемент, а в качестве второго элемента биморфа служит сама мембрана (см. рис.1). Такие конструкции называют Биморфными пьезоэлементами или пьезоблоками.



Их обычные размеры 10 – 60 мм в диаметре и 0,2 – 1,5 мм по толщине. При этом диаметр пьезоэлемента обычно в 1,5 – 2 раза меньше диаметра мембраны. При подаче на пьезоэлемент напряжения его диаметр, в зависимости от полярности, либо увеличивается,



либо уменьшается. Порядок изменения диаметра составляет 0,05 мкм на каждые 10В напряжения. Однако, вследствие изгиба, края мембраны приподнимутся или опустятся на 20мкм. Таким образом, малое расширение пьезоэлемента мы преобразовали в 400 раз большее изгибное смещение на краю мембраны. Вот уже упомянутое число 75000 превратилось в 187! Но двинемся дальше. Теперь нужно использовать явление резонанса. Ведь при резонансе амплитуда возрастает в число раз, равное добротности. Обычное значение добротности пьезоблока равно 50 – 70 единиц, и теперь пресловутые 75000 превращаются в обыкновенную тройку. Казалось бы задача решена, но не тут то было! Несмотря на большую амплитуду пьезоблок не звучит. Он не излучает звук. Маленький пьезоблок совсем не слышно. Пьезоблок большего размера слышно, но слабо. В чём кроется причина? Обратимся к рис.2, на котором схематично изображены две фазы колебаний круглого биморфного элемента. Точками **a** отмечена окружность нулевой амплитуды – узловая окружность.



На краю и в центре элемента Амплитуда максимальна, но колебательное движение происходит в противофазе. Для каждой фазы колебаний образуются три пары областей разрежения-сжатия воздуха. Поскольку размер пьезоблока меньше длины волны звука (для частоты 2 – 3кГц длина волны 110 – 170мм) области разрежения и сжатия не могут гнать волну дальше, а в течение половины периода успевают попарно «схлопнуться» и давление всё время вокруг выравнивается. Пути выравнивания давления показаны двусторонними стрелками. Это явление называют акустическим коротким замыканием.

Чтобы наше устройство зазвучало необходимо устранить акустическое короткое замыкание. Эта задача отнюдь не является сложной и придумано немало способов, которые успешно себя зарекомендовали на практике. От того, какой способ применён, зависит конструктивное исполнение и внешние очертания устройства. Далее познакомимся со способами устранения акустического короткого замыкания на конкретных примерах.

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ЗВОНКИ

Также используется иное название – пьезозуммер. Пьезокерамический звонок ЗП-1 состоит из двух пьезоблоков, причём у каждого из них мембрана выполнена в форме неглубокой тарелки с внешним диаметром 32мм. Тарелки сложены встречно и пропаяны по внешней границе. Не будем приводить чертёж этой конструкции, так как она достаточно понятно иллюстрируется на фотографии, рис.3. Пьезоэлементы в этом звонке скоммутированы таким образом, что при подаче переменного напряжения поверхности тарелок либо сходятся, либо расходятся, а линия спая остаётся неподвижной. С обеих сторон звонка образуются зоны только сжатия или только разрежения. Зона с избыточным давлением противоположного знака надёжно изолирована во внутренней полости. Резонансная частота этого звонка 2кГц. Он создаёт звуковое давление 75дБ на расстоянии 1м при напряжении на резонансной частоте 10В. Этот звонок излучает звуковые волны одинаково в оба полупространства.

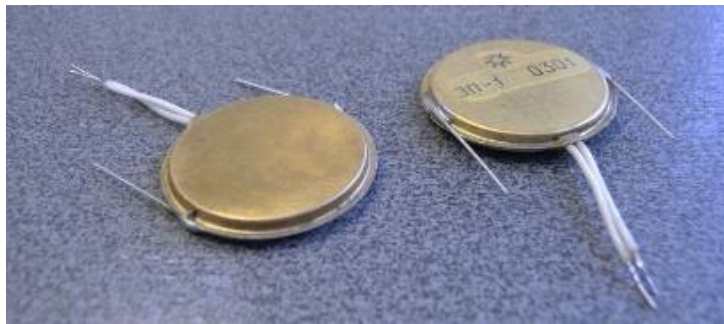


Рис. 3

Здесь необходимо сделать отступление и условиться о терминах, характеризующих описываемые устройства. Технические характеристики, обычно приводимые в нормативных документах на продукцию, не вполне показательны, так как нормы на параметры часто значительно занижены по сравнению с фактическими значениями и не привязаны к единой методике измерения. Здесь и далее будем указывать фактические средние значения резонансной частоты и звукового давления, измеренного на расстоянии 1м и при напряжении 10В на резонансной частоте. При этом величину звукового давления всегда можно привести к другому напряжению, имея ввиду их линейную зависимость. Например, увеличение или уменьшение напряжения в два раза увеличивает или уменьшает звуковое давление также в два раза или, в децибелах, на 6дБ. Для большинства пьезокерамических излучателей линейная зависимость звукового давления от напряжения находится в интервале от 0 до 20-30В. Далее прирост звукового давления уменьшается.

Следующий простой способ избавиться от акустического короткого замыкания – это навесить на периферийную часть мембраны достаточно массивную оправку. Она будет выполнять роль противовеса и, в результате, узловая окружность увеличится в диаметре, приблизившись к внешней границе. Тогда, при колебаниях, вблизи поверхности мембраны будет доминировать или сжатие, или разрежение. Зона с избыточным давлением противоположного знака заглушена задней стенкой. Ниже, в таблице 1, приведены параметры звонков этой группы, а на рис.4 – их фотографии.

Таблица 1

Наименование	Звуковое давл., дБ	Резонансн. частота, кГц	Размеры (диаметр x высота), мм
ЗП-5	85	2,8	40 x 6
ПВА-1	80	2,1	37 x 9
ППА-1	75	1,2	45 x 11

Типовые частотные характеристики звукового давления звонков, отличающихся по полосе частот изображены на рис.5



Рис. 4

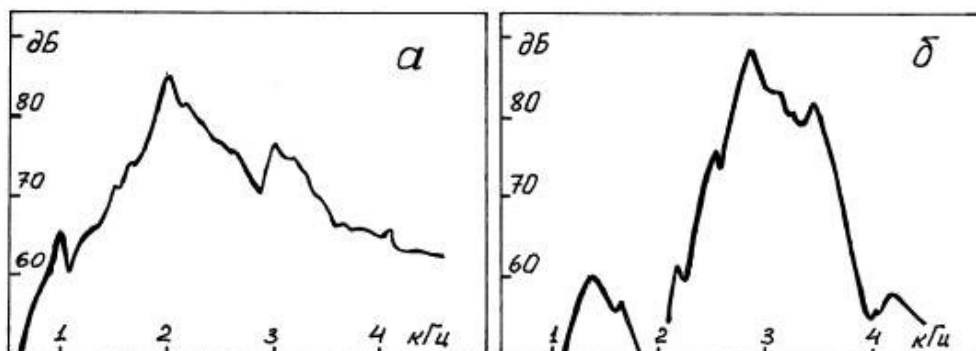


Рис.5. а) Частотная характеристика широкополосного звонка ПВА-1; б) характеристика звонка ЗП-5

Наиболее широкое распространение получили пьезокерамические звонки с акустической камерой. Их основное преимущество – высокая громкость звучания при малых габаритах. Каждый из нас знает, как устроен свисток, но не каждый знает, почему он свистит. Почему гудит бутылка, если у её горлышка создать струю воздуха? Свисток – это акустический резонатор или резонатор Гельмгольца. У него есть два параметра – внутренний объём, неважно какой формы, и размеры отверстия. Если провести аналогию с колебательным контуром, то объём камеры – это ёмкость конденсатора, а размер отверстия – это индуктивность катушки. Во внутреннем объёме сосредоточены колебания давления (как напряжения на конденсаторе), а в отверстии сосредоточены колебания массы столбика воздуха (как тока в катушке). Чтобы свисток засвистел, надо создать какой-то шум, в составе которого присутствовали бы колебания с частотой акустического резонатора.

Тогда эти колебания будут усиливаться, и мы услышим свист. Точно так же осуществляет селекцию и усиливает электрический колебательный контур. Важная особенность акустического резонатора – это то, что его размеры существенно меньше длины волны излучаемого звука.

Конструкция пьезокерамического звонка с акустической камерой очень проста. Это полый цилиндр. Одно основание – пьезоблок, другое – крышка с отверстием. Соотношение объёма внутренней полости и размера отверстия рассчитывают таким, чтобы акустический резонанс камеры и механический резонанс пьезоблока были близки по частоте. С противоположной стороны пьезоблока также может быть крышка, а может и не быть. Такой звонок излучает звук благодаря отверстию, в котором частицы воздуха имеют наибольшую амплитуду колебаний и наибольшую колебательную скорость. Параметры некоторых звонков такого типа даны в таблице 2, а на рис.6 их фотографическое изображение.

Таблица 2

Тип	Звуковое давление, дБ	Резонансная частота, кГц	Габариты, диам. x высота, мм
ЗП-19	85	2,5	35 x 7
ЗП-18	88	4	22 x 8
ЗП-25	88	4	22 x 5
ЗП-31	80	4,5	17 x 5

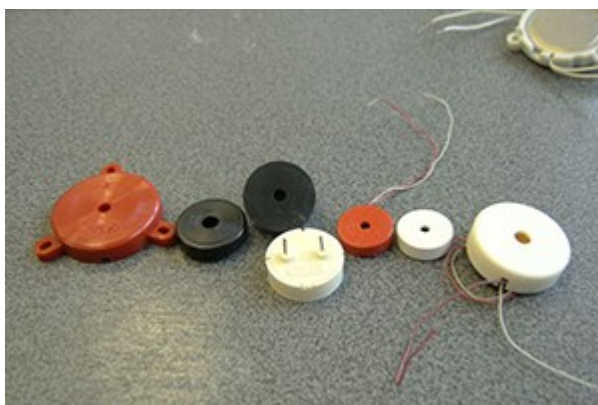
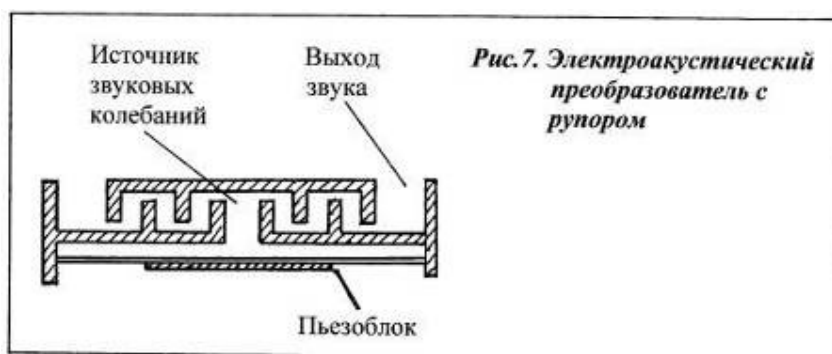


Рис. 6

Если сравнить таблицу 2 с предыдущей, то очевидно, что благодаря акустической камере, звонки имеют меньшие размеры, а звуковая отдача больше. Как ещё увеличить громкость? Об этом пойдёт речь в следующем разделе.

## ОПОВЕЩАТЕЛИ

Пьезокерамический оповещатель (пьезосирена, сигнализатор) – это звукоизлучающее устройство, предназначенное привлечь внимание на сравнительно большом расстоянии или в условиях шумового фона. Они представляют собой либо собственно электроакустический преобразователь, либо снабжены встроенным генератором звуковой частоты с питанием от источника постоянного напряжения. Оповещатели по сравнению со звонками должны развивать более высокое звуковое давление. Это достигается одновременно двумя путями. Во-первых, используется более высокое (десятки вольт) переменное напряжение, воздействующее на пьезоблок, во-вторых, принимаются конструктивные меры для увеличения излучающей поверхности. Звонки с акустической камерой наиболее просто превратить в оповещатель, снабдив его рупором. Рупор – это труба с увеличивающейся площадью поперечного сечения. В узком начале трубы находится источник звука, а широкий конец – излучающий. В пьезокерамических оповещателях, для уменьшения габаритов, используются свёрнутые рупоры. На рисунке 7 схематично изображён разрез по вертикали оповещателя со свёрнутым рупором. Звуковая волна, от отверстия акустической камеры, радиально распространяется по лабиринту, меняя направление (вверх-вниз).



С каждой сменой направления поперечное сечение становится всё больше. В итоге, площадь излучающего кольцевого отверстия многократно больше площади первоначального источника звука. Пример оповещателей с рупором – ОСА-100 и ОСА-110 – представлен на фотоизображении, рис.8.



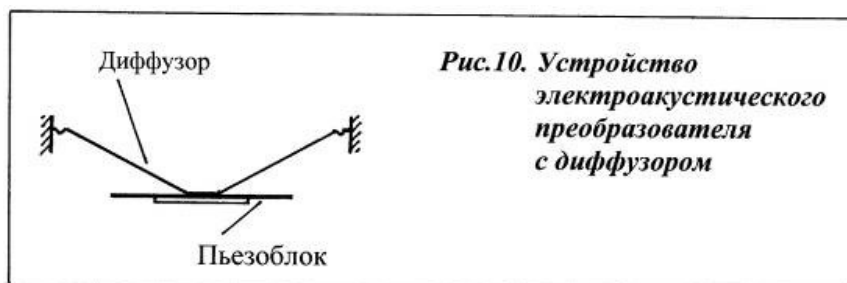
Рис.8

Параметры этих и других оповещателей представлены ниже, в таблице 3. Оповещатели ОСА-100 и ОСА-110, будучи снабжённые встроенным генератором, известны как пьезосирена ПС-4 и охранно-пожарный оповещатель «Свирель» (фото, рис.9)



Рис.9

Иной способ увеличения излучающей поверхности – это использование диффузора или диафрагмы. Например так, как показано на рис.10. Воронкообразный диффузор своим основанием приклеивается к центру пьезоблока, в точке максимальной амплитуды колебаний.

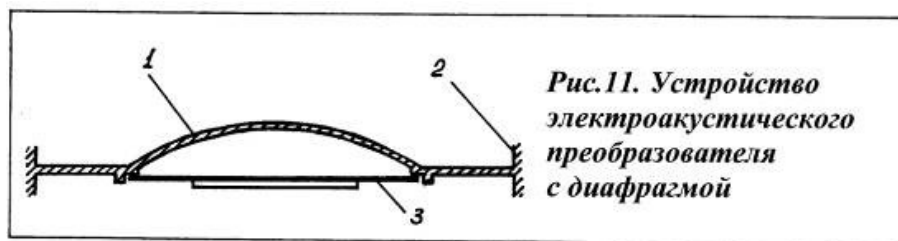


*Рис.10. Устройство электроакустического преобразователя с диффузором*

Периферийная часть пьезоблока служит противовесом. Таким образом, функцию излучающего звук элемента выполняет диффузор, а пьезоблок выполняет функцию привода.

Далее познакомимся с оповещателями ОСА-110-Б и ОСА-110-К. В электроакустическом преобразователе этих оповещателей приводной частью пьезоблока служит периферия, центральная часть служит противовесом, а в качестве излучающего элемента используется диафрагма. Предлагаемые вниманию оповещатели имеют ту особенность, что его электроакустическая часть является неотъемлемым функциональным элементом корпуса, который предназначен для размещения электронной схемы возбуждения звуковых колебаний. Такие «звучащие» корпуса могли бы представлять интерес для разработчиков и изготовителей различных звуковых сигнальных устройств – оповещателей, сирен, сигнализаторов. Звукоизлучающий элемент этих оповещателей не является деталью конструкции, узлом, а представляет собой функциональную, звучащую часть корпуса, и получается в едином цикле литья из пластмассы. Конструкция электроакустического преобразователя является новой, и многим читателям будет небезынтересно познакомиться с его устройством.

На рис.11 схематично изображён разрез преобразователя по вертикали. Звукоизлучающей поверхностью является верхняя поверхность диафрагмы 1, которая, подобно шляпе с полями, имеет центральную, выпуклую часть и плоскую, кольцевую.



*Рис.11. Устройство электроакустического преобразователя с диафрагмой*

Обрез полей шляпы соединён с боковой стенкой 2 корпуса. Таким образом, диафрагма состоит из двух частей, кардинально отличающихся по жёсткости. Это жёсткая сферическая часть и податливые поля. Снизу диафрагмы, в кольцевой бортик, вставлен и проклеен по контуру биморфный элемент 3. Сам по себе биморфный элемент является слабым источником звука. Его предназначение – служить приводом диафрагмы. При подаче переменного напряжения звуковой частоты на биморфный элемент последний совершает изгибные колебания относительно узловой окружности (см. рис.2). При этом наибольшая амплитуда колебаний вблизи центра и на периферии биморфа. Поскольку периферия биморфа связана с основанием жёсткой сферы, то вся поверхность сферы совершает колебания с такой же амплитудой. Амплитуда же колебаний плоской части диафрагмы постепенно уменьшается при приближении к боковой стенке корпуса. В результате вся верхняя поверхность диафрагмы совершает согласованное колебательное движение и эффективно излучает звук. Напротив, нижняя поверхность преобразователя имеет участки с колебаниями в противофазе и излучение с нижней стороны неэффективно.

На фотоизображении, рис.12, представлены образцы оповещателей. Оповещатель ОСА-110-Б изготовлен из белого непрозрачного пластика.



Рис.12

Оповещатель ОСА-110-К выполнен из красного прозрачного пластика. В нём можно выполнить дополнительную, световую сигнализацию.

В таблице 3 сведены данные по параметрам всех рассмотренных ранее оповещателей.

Таблица 3

Звуковое давл., дБ	90	100	110	120	130
Электрическая мощность, Вт	0,008	0,08	0,8	8	80

Оповещатели ОСА-110-Б и ОСА-110-К со встроенной электронной платой выпускаются как звуковой охранно-пожарный оповещатель «Свирель-12Б» и комбинированный (светозвуковой) – «Свирель-12К». Не случайно оповещатели ОСА-110-Б(К) рассмотрены более подробно.

Наряду с высокой эффективностью электроакустического преобразования они имеют и другие достоинства. В частности, заложенное в них техническое решение позволяет легко реализовать пыле и влагозащищённое исполнение, возможность очистки от грязи струёй воды. Это позволяет расширить их применение по условиям эксплуатации. Такие разработки уже ведутся. Указанные в таблице 3 значения звукового давления, это ещё не предел возможностей таких преобразователей. На рис.13 приведена фотография разработанного опытного образца электроакустического преобразователя, который развивает звуковое давление 117дБ на расстоянии 1м, а при напряжении 60-80В до 128-130дБ.



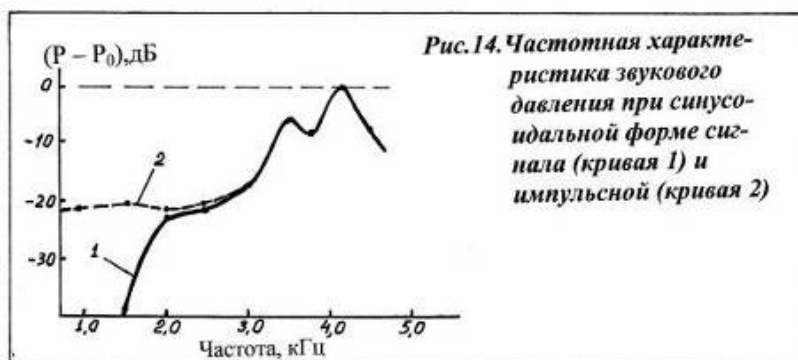
Рис.13

Вообще, пьезокерамические источники звука любят высокое напряжение. Эта и другие особенности определяют соответствующие схемные решения оконечных устройств, нагруженных на звуковой пьезопреобразователь. Некоторые из них рассмотрены ниже.



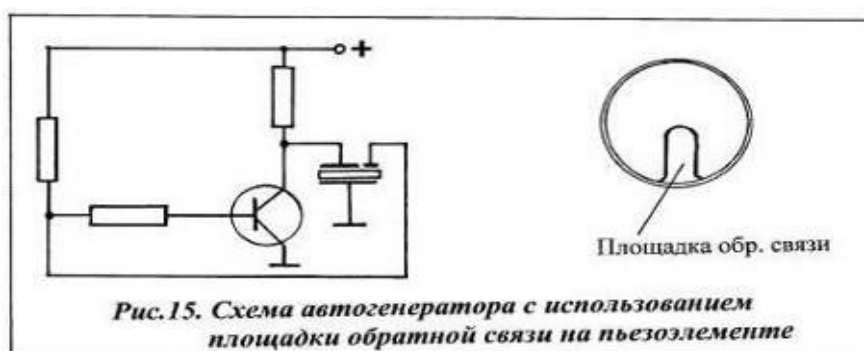
## КАК ЕГО «РАСКАЧАТЬ»?

Пьезокерамические излучатели звука являются сугубо резонансными устройствами. Заставить их звучать в более широкой полосе частот можно лишь смещением основного резонанса ниже 1 кГц. Тогда на более высоких частотах будут работать высшие моды и гармоники колебаний пьезоблока. Но в любом случае надо пожертвовать громкостью и равномерностью характеристики. Их основная профессия – это служить сигнализаторами. Однако нередко, особенно это касается звонков, используется возбуждающее напряжение вдали от резонанса. Это возможно, если напряжение имеет форму прямоугольных импульсов, в составе которых всегда найдутся гармоники с частотой какого-либо резонанса звонка, и громкость звучания может быть вполне приемлемой.



1.

Вот пример, (рис.14), характеристики звонка ЗП-18 с разными формами подаваемого напряжения. На графике за нулевую отметку взят максимум звукового давления. Чем ниже частота, тем больше отличие в громкости, а вблизи резонанса звуковое давление не зависит от формы напряжения. Пьезозвонок удобно возбудить на резонансной частоте, применив пьезоэлемент, у которого на одном электроде выделена небольшая площадка, изолированная от основного электрода. Электрические колебания, снятые с этой площадки, поступают в цепь обратной связи. Простейшая схема такого генератора и форма электрода пьезоэлемента с площадкой для обратной связи изображены на рис.15.



Эту схему можно разместить внутри самого звонка, в отсеке с противоположной стороны акустической камеры. В этом случае звонок звучит при подаче на его выводы постоянного напряжения.

Пьезокерамический звонок является маломощным источником звука. Поэтому вопросы согласования с электронной схемой, токопотребления являются второстепенными. Если вести речь об оповещателях, то интересно оценить, какую мощность надо подать на

преобразователь, чтобы получить ту или иную величину звукового давления. Не будем утомлять читателя самим расчётом, а приведём лишь результат. Единственно укажем, какие при этом принимались во внимание условия и делались допущения. Считаем, что излучённая акустическая мощность сосредоточена в телесном угле  $\pm 30^\circ$ . Микрофон шумомера находится на расстоянии 1 м от электроакустического преобразователя, а сам преобразователь способен потребить (что не всегда возможно) те величины электрической мощности, которые приведены в таблице. Наконец считаем, что эффективность преобразователя такова, что излучённая им акустическая мощность составляет 10% от подведённой электрической. В таблице 3 представлен результат этого расчёта.

Таблица 3

Звуковое давл., дБ	90	100	110	120	130
Электрическая мощность, Вт	0,008	0,08	0,8	8	80

Хоть это и очевидно, но нелишне отметить, что прирост звукового давления на 10дБ это удесятерение подводимой мощности. Свыше 100дБ мощность становится настолько ощутимой, что становится безразличным, какое выбрать схемное решение и какие использовать компоненты оконечного устройства. При этом надо учитывать особенности пьезокерамических преобразователей, как потребителей электрической мощности. Постараемся эти особенности сформулировать.

## КАКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ МОЖНО ПОДАТЬ НА ЗВУКОВОЙ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ?

Подобно тому, как железо можно намагнитить и размагнитить сильным током, так и пьезокерамике можно придать пьезоактивность и лишить её высоким напряжением. Поэтому рабочее напряжение не должно превышать 30-40% от технологического, которым керамике придаются пьезосвойства. Допустимо, примерно, 350В на 1мм толщины пьезоэлемента. Толщина пьезоэлемента в оповещателе обычно 0,2 - 0,3мм. Стало быть максимальное напряжение составит 70 – 100В.

*Каково сопротивление звукового пьезопреобразователя?* Если частота тока находится в стороне от резонансной частоты преобразователя, то его сопротивление определяется статической ёмкостью. Эта ёмкость обычно лежит в пределах от 20 до 50 нанофарад. Если в пьезоблоке преобразователя использованы два пьезоэлемента по разные стороны от мембраны, то этот интервал удвоится. На резонансной частоте сопротивление уменьшается в число раз, равное добротности, но всё же остаётся довольно значительным. Практически, сопротивление на резонансе, как правило лежит в интервале от 0,5 до 2,0 кОм. Особо мощный преобразователь, тот, что изображён на рис.13, имеет сопротивление на резонансе около 100 Ом.

*На какую резонансную частоту проектируются оповещатели?* Фактическая частота большинства пьезокерамических оповещателей лежит в интервале от 2,5 до 3,5кГц. Этот интервал соответствует максимальной чувствительности нашего слухового анализатора и, «к счастью», наиболее естественен для пьезокерамических звуковых преобразователей.

Заметим общую особенность пьезокерамических источников звука. Это небольшие интервалы возможных значений упомянутых параметров. Не сравнить конденсаторами и резисторами, где интервалы значений ёмкости и сопротивления ничем не ограничены. Естественно возникает вопрос. А что, если..? Если в несколько раз увеличить размеры мембраны и пьезоэлемента, то может быть можно существенно увеличить потребляемую и излучаемую мощность? Оказывается нельзя. Препятствие этому – масштабный фактор. Если муравей способен поднять спичку, то это не значит, что, имея вес человека, он поднимет железобетонную плиту. Кузнечик с нашим весом не прыгнет на двести метров. Кузнечик, человек и слон изготовлены из одного биологического материала, и изменение размеров тела не приводит к пропорциональному изменению способностей. Мы можем пропорционально увеличить размеры пьезоблока, но не можем при этом соответственно, сколь-нибудь заметно, изменить параметры материала, из которого он изготовлен.

Мы выяснили, чтобы получить достаточную громкость звука, нужно подействовать на оповещатель переменным напряжением в десятки вольт. Но если используется источник питания на более низкое напряжение, 6, 9, 12 вольт? Пожалуй, наиболее простой способ повысить напряжение на оповещателе – это использовать эдс самоиндукции катушки индуктивности. Схема оконечного устройства с дросселем проста, однако принцип работы требует пояснения, так как это поможет правильно выбрать параметры компонентов схемы. Обратимся к рисунку. На рис.16а показана упрощённая схема оконечного устройства, включающая в себя источник эдс  $E$ , дроссель  $L$ , диод  $D$ , пьезопреобразователь  $P$  и ключ  $Кл$ . Частоту переключения ключа устанавливают равной резонансной частоте преобразователя. На протяжении половины периода колебаний преобразователя ключ замкнут и, за это время, происходит накопление энергии в катушке. В течение вто-

рой половины периода ключ разомкнут и ЭДС самоиндукции действует на преобразователь.

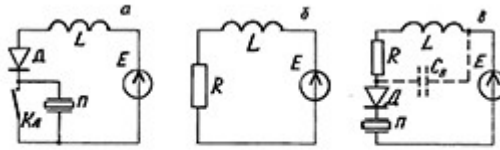


Рис.16. а) Упрощённая схема оконечного устройства; б) эквивалентная схема для полупериода с замкнутым ключом; в) эквивалентная схема для полупериода с разомкнутым ключом.

Рассмотрим подробнее процессы в этой схеме отдельно для фаз, которые соответствуют замкнутому и разомкнутому состояниям ключа. Эквивалентная схема для полупериода с замкнутым ключом показана на рис.16б. Как только замкнули ключ, через индуктивность  $L$  и сопротивление  $R$ , являющееся эквивалентом сопротивления обмотки, нарастает ток по закону

$$i = \frac{E}{R} (1 - \exp(-\frac{t}{\tau}))$$

где  $\tau = L/R$  - постоянная времени  $RL$  - цепочки. Согласно этой формуле ток достигнет своего максимального значения ( $E/R$ ) через бесконечное время. Нам вполне удовлетворит величина тока, когда  $t = \tau$ , при условии, если постоянная времени равна половине периода,  $T/2$  или, что то же самое, времени замкнутого состояния ключа. Нетрудно убедиться, что к моменту размыкания ключа, ток через индуктивность достигнет величины

$$I = \frac{E}{R} (1 - \frac{1}{2.72}) = 0,63 \frac{E}{R},$$

а энергия, запасённая в индуктивности, значения

$$W = \frac{1}{2} L (0.63 E/R)^2.$$

Теперь рассмотрим процесс, происходящий в течение второго полупериода, рис.16в. В момент размыкания ключа ток  $I$  будет протекать через пьезопреобразователь, создав на нём напряжение, определяемое его сопротивлением на резонансе. Это напряжение, при правильном выборе индуктивности и активного сопротивления катушки, может составлять десятки и более вольт. К концу второго полупериода напряжение уменьшается, стремясь к значению источника питания. Далее ключ вновь замыкается (обратимся опять к рис.16а), и через замкнутый ключ будут протекать два тока: ток обратного колебательного хода преобразователя и «зарядный» ток катушки. Таким образом мы раскачиваем преобразователь однополярными импульсами напряжения, многократно превосходящими напряжение источника питания. На рис.17 показана осциллограмма этого напряжения.

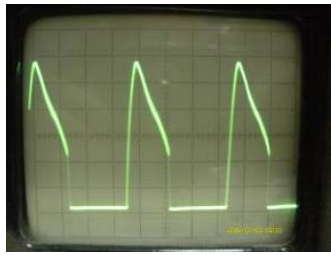


Рис.17

Для чего в схеме присутствует диод? Он предотвращает нежелательные колебания. В отсутствие диода индуктивность катушки и статическая ёмкость пьезоэлемента образуют последовательный колебательный контур. В момент размыкания ключа ток самоиндукции быстро заряжает ёмкость и до окончания текущего полупериода меняет своё направление. Так, раскачивая качели, мы даём им толчок и, не дожидаясь верхней мёртвой точки, делаем на короткое время торможение. В результате амплитуда колебаний будет меньше. Осциллограмма «раскачивающего» напряжения в отсутствие диода показана на рис.18.

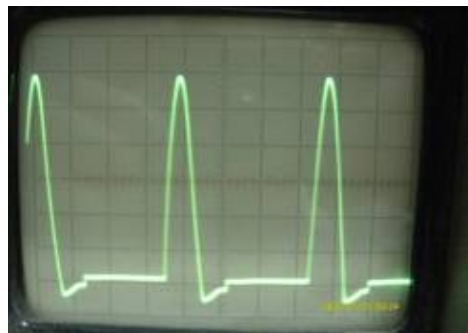


Рис.18

Интересно отметить, что при размыкании ключа и при наличии диода в катушке всё равно возбуждаются колебания, причём частотой сотни кГц, за счёт межвитковой ёмкости  $C_v$ , которая, образуя, в паре с индуктивностью, параллельный колебательный контур. Однако этот эффект вреда не приносит, так как вся энергия этих колебаний поступает порционно через диод, образуя однополярный «толкающий» импульс. На рис.19 показана осциллограмма этих высокочастотных колебаний на катушке. Фото справа – изображение в развёрнутом масштабе.

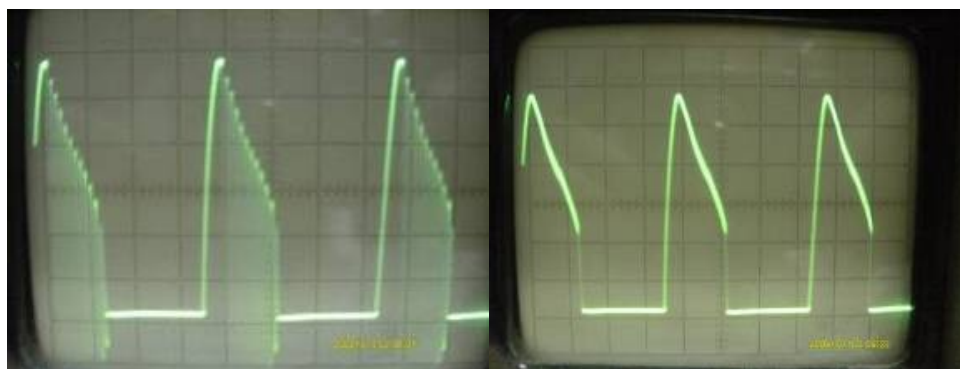


Рис.19

Теперь мы подходим к наиболее интересному моменту. Какие должны быть параметры катушки индуктивности, чтобы оповещатель громко звучал? Как рассчитать эти параметры? Вернёмся к уравнению 1 и поработаем с показателем экспоненты. Нам известно время  $t$ . Оно равно  $T/2$  - половине периода. Тогда

$$\tau = L/R = T/2 = 1/2 f. \text{ Отсюда } R = 2 fL.$$

Это максимальное значение активного сопротивления. Если взять большее значение, то стабилизация тока наступит раньше, чем кончится полупериод, и схема, отчасти, будет работать вхолостую, не увеличивая энергию магнитного поля катушки. Уменьшать же сопротивление можно, в принципе, без ограничений. Но мы ограничимся уменьшением в 5 раз, положив

$$R = \frac{2}{5} fL.$$

2.

Попутно заметим, что если частота, в килогерцах, будет равна 2 – 3, то активное сопротивление катушки в омах будет приблизительно численно равно индуктивности в миллигенри. Такая поправка имеет то основание, что предлагаемые к продаже дроссели обычно как раз имеют такую величину активного сопротивления. То есть, весь расчёт свёлся к простому правилу, которое надо просто запомнить.

Теперь займёмся расчётом индуктивности. Подставим в формулу 1 новый показатель экспоненты из выражения 2 и, проведя вычисления, получим величину тока  $I$ , соответствующую концу фазы накопления энергии в катушке.

$$I = \frac{0,45E}{fL}, \text{ а величина этой энергии } W = \frac{0,1E^2}{Lf^2}.$$

Эта энергия, очевидно, должна быть равна (не меньше) потребляемой мощности оповещателя, приведенной к одному циклу колебания, то есть мощность надо разделить на частоту. Величину потребляемой мощности  $P_n$  легко вычислить, измерив ток в цепи преобразователя, подключённого к стандартному генератору и подав на него напряжение в соответствии с желаемой громкостью. Теперь, приняв во внимание, что

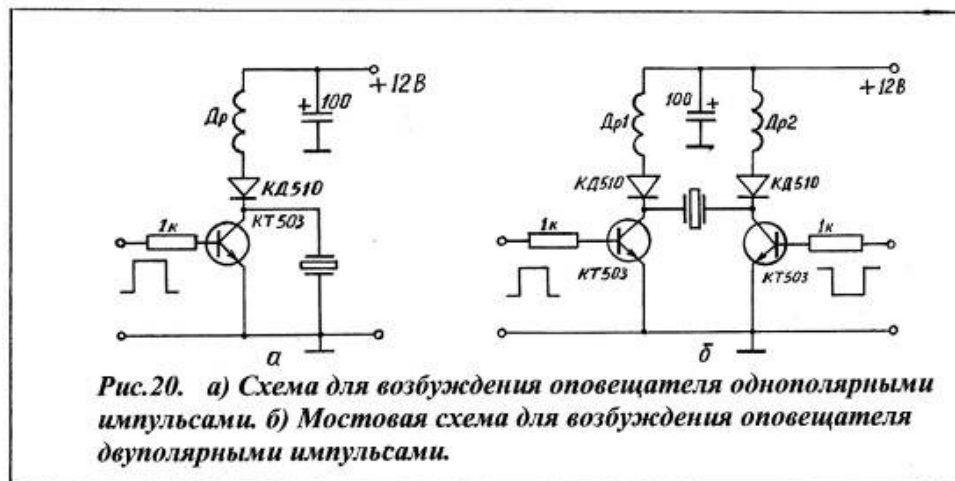
$$W = P_n / f$$

и разрешив уравнение относительно  $L$ , получим формулу для расчёта индуктивности катушки:

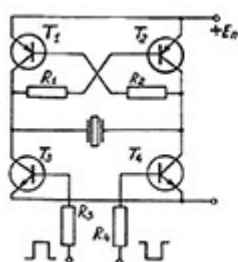
$$L = 0,1 \frac{E^2}{fP_n}.$$

Одно замечание. Чем больше потребляемая мощность, тем меньше расчётное значение индуктивности, так как энергия в большей степени зависит от тока, он в квадрате.

Теперь продемонстрируем две практические схемы, предназначенные для «раскачки» описанного выше оповещателя ОСА-110-Б. На рис.20а показана схема для питания оповещателя однополярными импульсами. В схемах использованы дроссели с параметрами, близкими к расчётным:  $L = 15\text{мГн}$ ,  $R = 18\text{ Ом}$ . Эти параметры рассчитаны исходя из «желаемого» звукового давления 107дБ. На рис.20б показана мостовая схема для питания разнополярными импульсами («толчки» в каждый полупериод, но со сменой знака). Последняя схема даёт дополнительное увеличение громкости на 5-6дБ.



Приведенные схемы, по-видимому, нельзя использовать для питания оповещателей особой мощности. Оповещатель на рис.13 без труда может обеспечить звуковое давление 120дБ. Однако при его возбуждении схемой с дросселем требуется индуктивность менее 1мГн. При этом ток в импульсе достигает 15А. При питании от 24В расчётная индуктивность 2.5мГн и ток в импульсе 7 – 8А. Это немного получше, но 24 вольта и без того уже хорошо. Поэтому для работы с такими оповещателями лучше использовать схемы без катушки, но с повышенным напряжением питания. Практическая схема подобного типа приведена на рис.21.



**Рис.21. Мостовая схема окончного устройства питаемая повышенным (десятки вольт) напряжением.**

Транзисторы:  
 Т1,Т2 - КТ-502Г, КТ-973А, КТ-8147А  
 Т3,Т4 - КТ-503Г, КТ-972А, КТ-8116А  
 Резисторы R1 – R4 5 – 10 кОм.

Здесь применены мощные транзисторы на повышенное напряжение. Переключение моста осуществляется взаимно инвертированными прямоугольными импульсами. На это устройство можно подавать напряжение в широком интервале, полностью покрывая интервал допустимых для оповещателей значений. По существу, в этой схеме оповещатель всегда замкнут на полюса источника питания с частотой смены полярности, равной его резонансной частоте.

## ПЬЕЗОКНОПКИ

### КОНСТРУКЦИЯ ПЬЕЗОКНОПКИ

Принцип работы основан на прямом физическом пьезоэффекте, т.е. при давлении на пьезоэлемент происходит его деформация. И на его обкладках (электродах) возникает напряжение, достаточное для надежного управления бесконтактными транзисторными ключами.

На обратной стороне корпуса кнопки, который может выполняться из металла или пластмассы, установлен пьезоэлемент. Напряжение с его электродов, снимаемое токо-съемником, подается на печатную плату, на которой смонтирована электронная схема бесконтактных транзисторных ключей, коммутирующих внешнее напряжение (ток) в нагрузке. Вся конструкция залита герметиком, а выводы могут быть выполнены разъемом, проводами или кабелем.

#### *Пьезокнопки функционально подразделяются на:*

- 1) импульсные Н.О. или Н.З. контактом — замыкание или размыкание контакта 120-500 миллисек.;
- 2) продолжительные Н.О. или Н.З. — замыкание или размыкание контакта до 10 сек.

Эти кнопки выпускаются с указанными выше электрическими параметрами в исполнении с индикацией со светодиодом и светодиодным кольцом. Корпуса пьезокнопок выполняются из нержавеющей стали, анодированного алюминия красного, зеленого, голубого, черного, желтого и натурального цветов, а также из пластмасс и других материалов. Надписи выполняются фотохимическим способом, лазерной или механической гравировкой.

Установочные размеры: диаметр от 16 мм до 40 мм с резьбой М16, длиной от 8 до 20 мм, в исполнении для наружной и внутренней установок на панель. Выводы выполняются стандартным кабелем, проводом или разъемом. Кнопки могут выполняться с тактильным эффектом.



## ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПЬЕЗОКНОПКИ

Интегрированные пьезокнопки требуют дополнительного питания, но, вместе с тем, значительно расширены их функциональные возможности. Путем добавления дополнительной электроники можно получить многоканальную пьезокнопку со встроенными таймерами на включение или отключение и сложные циклически повторяемые программы, а с появлением дешевых программируемых микроконтроллеров появилась возможность создания программируемых и перепрограммируемых пьезокнопок. Стало возможным создание кнопок повышенной секретности с защитой от случайных срабатываний, специальных слайдкнопок, которые срабатывают при нажатии и движении пальца в определенном направлении, скорости и т. д.

### *Функционально интегрированные пьезокнопки подразделяются на:*

- 1) продолжительные Н.О. или Н.З. — замыкание или размыкание контакта до 30 и более секунд;
- 2) включено\выключено Н.О. или Н.З.: при нажатии — включение и повторном нажатии — отключение;
- 3) с таймером времени — на включение или отключение выдержки времени;
- 4) с таймером времени\стоп — на включение или отключение выдержки времени с возможностью прервать выдержку;
- 5) однократно программируемые — в данных кнопках может быть реализована любая сложная программа на однократное или циклическое включение или отключение нагрузки с выдержками на включение и отключение. Например: после нажатия на кнопку включить нагрузку 1 на 5 мин., запретить возможность прерывать программу в течение 6 мин. после отработки 5-минутной выдержки и через 24 часа включить нагрузку 2 на время 3 мин. и далее повторять программу через каждые 48 часов. Программа записывается с помощью программатора;
- 6) многократно программируемые — то же, но с возможностью записи новой версии или другой программы;
- 7) мультипрограммные — в память микроконтроллера одновременно с помощью программатора записывается пять и более сложных программ, а пользователь может выбрать и активизировать нужную с помощью несложных манипуляций. Например: для активизации программы 3 снять напряжение питания с кнопки и подать вновь. В это время в течение трех секунд загорается дополнительный светодиод с обратной стороны кнопки, показывающий, что пользователь может активизировать любую программу путем нажатия на кнопку, чтобы активизировать программу 3, нажать три раза и подождать две секунды. Через две секунды кнопка выходит из режима активизации светодиод гаснет и кнопка остается в режиме программы 3. Т.е. если теперь нажать на кнопку, запустится программа 3, и при каждом дальнейшем нажатии будет запускаться эта программа. Для активизации другой программы выполнить все операции еще раз. При случайном пропадании напряжения питания сохраняется последняя настройка;
- 8) перепрограммируемые — данные кнопки позволяют пользователю записать и перезаписать программу в память микроконтроллера кнопки без программатора с помощью

несложных манипуляций, перечисленных выше, что очень важно для полевых условий эксплуатации;

9) специальные — в память микроконтроллера записываются специальные программы, позволяющие преобразовать функцию времени нажатия в последовательный стандартный сигнал больше или меньше. Включение нагрузки произойдет после определенной комбинации нажатий и пауз.

К специальным относятся так называемые слайдкнопки — группа кнопок с общей мембраной позволяет создавать кнопки, которые включают нагрузку только при нажатии и перемещении пальца, в строго определенном направлении и, если нужно, и скорости (экстренное открытие дверей в самолете, электропоезде и других объектах, где нужно исключить ошибочное срабатывание).

Напряжение питания кнопок — универсальное, от 9 до 24 В переменного или постоянного тока. Кнопка потребляет 1-2 миллиампера в режиме ожидания и до 10 миллиампер в режиме отработки программы.

Выпускаются кнопки, не потребляющие энергию в режиме ожидания, что очень важно при батарейном питании. Также кнопки защищены от воздействия статического электричества. Имеется гальваническая развязка выходов с источником питания.

При необходимости изготавливаются кнопки с защитой от перегрузки и короткого замыкания.

Хранение программы при отсутствии напряжения гарантируется в течение 10 лет.

Коммутационные параметры перечислены выше в основных технических характеристиках.

Установочные размеры: диаметр от 16 мм до 40 мм с резьбой М16, длиной от 30 до 35 мм, в исполнении для наружной и внутренней установок на панель.

## **ПЬЕЗОКЛАВИАТУРЫ И ПАНЕЛИ**

### **КОНСТРУКЦИЯ ПЬЕЗОКЛАВИАТУРЫ**

Пьезотехнология позволяет объединять пьезокнопки в клавиатуры. В отличие от существующих сенсоров (емкостных, индуктивных), пьезосенсоры клавиатур не нужно изолировать друг от друга. Это позволяет размещать на одном металлическом листе неограниченное количество кнопок, объединять их в клавиатуры с различными схемами соединений.

На листе металла химическим способом (анодированная фотопечать или металлофото), лазерной или механической гравировкой наносится рисунок клавиатуры или мнемосхема технологического процесса, а с обратной стороны расположены пьезоэлементы и электронные ключи, залитые герметиком. Выводы выполняются стандартным кабелем или разъемом. Конструктивно клавиатуры подразделяются: для внутренней и наружной установки, а также настольные или переносные, примером которых может быть компьютерная клавиатура с встроенным интерфейсом PS.2, USB и др.

Принцип работы основан на прямом физическом пьезоэффекте. При прикосновении пальцем к рисунку на клавиатуре происходит деформация пьезоэлемента, и на его обкладках возникает напряжение, достаточное для надежного управления бесконтактными транзисторными ключами. Клавиатура не требует дополнительного источника питания. Высокая надежность достигнута за счет полного отсутствия движущихся частей и полной герметизации. В зависимости от схемы соединения клавиатуры могут быть матричными, с общим проводом и смешанной схемой соединения.

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ БЕСКОНТАКТНЫЕ ПЬЕЗОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ (КОМАНДОАППАРАТЫ)

В корпус пьезоклавиатуры добавлен микроконтроллер с программой. При наборе кода доступа, который в дальнейшем можно изменять, потребитель может самостоятельно:

- перепрограммировать переключатель с клавиатуры изделия с помощью несложных манипуляций;
- задать любой клавише любую комбинацию выходов;
- если при переключении требуются дополнительные выдержки времени на включение или отключение, их можно ввести программно;

В случае аварийного отключения напряжения, система может запоминать последнее состояние или переходить в состояние «сброс». Каждое нажатие сопровождается звуковой и световой индикацией. Если изменить базовую программу, можно получить новое изделие — универсальный программируемый 12-программный, 12-канальный командоаппарат. Такое решение позволяет быстро перенастраивать и модернизировать любое оборудование.

Современный дизайн, небольшие габариты пьезокоммутационных изделий позволяют их внедрение как в офисе банка, так и на прокатном стане. Они пригодны для управления технологическими процессами с тяжелыми и особо тяжелыми условиями эксплуатации: наличие высокой влажности или воды, пыли, песка, металлической стружки, химически агрессивной среды, больших перепадов температуры, пожаровзрывоопасной среды. Возможно применение на предприятиях:

- нефтяной, газовой и химической промышленности;
- энергетики, приборостроения, атомной промышленности;
- морского и железнодорожного транспорта, метро;
- авиационного и космического оборудования;
- автомобильной промышленности и оборудования автозаправочных комплексов;
- лифтового, шахтного оборудования;
- связи;
- пищевой, зерноперерабатывающей, и мукомольной промышленности;
- оборонного комплекса.

## ПЬЕЗОЗАЖИГАЛКИ

Пьезозажигалки (оснащены, пьезоэлементом, при срабатывании которого образуется искра между рассекателем и проводом пьезоэлемента). В пьезозажигалках поджиг осуществляется с помощью пьезоэлемента. При его срабатывании образуется искра между рассекателем на конце верхнего клапана и проводом пьезоэлемента. Рассекатель служит для образования газозвоздушной смеси, необходимой для надежного зажигания. Самостоятельно трогать пьезоэлемент или чистить категорически запрещается, так как это может вывести зажигалку из строя. Достоинство таких зажигалок в длительной работе (практически на весь срок службы) пьезоэлемента.

Пьезозажигалки существуют с турбонаддувом в них газ проходит через диафрагму в турбине и резко увеличивает скорость. Затем затягивает воздух через боковые отверстия турбины и под высоким напором поступает в формирователь пламени, расположенный в верхней части турбины. В целях ветроустойчивости, в некоторых марках пьезозажигалок с турбонадувом турбину оборудуют спиралью из тугоплавкого металла. Под воздействием пламени спираль накаляется и в результате тепловой инерции не дает огню погаснуть даже при сильных порывах ветра, что очень удобно при разжигании кальянного угля на улице в ветреную погоду.

В пьезозажигалках с электронной схемой воспламенение происходит почти так же, как и у зажигалок с пьезоэлементом. Эти электрические зажигалки работают от батарейки при нажатии кнопки, напряжение электронной схемой преобразовывается до нужной величины. Эти зажигалки самые удобные в использовании.

Пьезозажигалки для кальяна используются для разжигания кальянного угля лучше всего использовать специальную турбозажигалку для кальяна. Особенно, если используется не самовозгорающийся уголь для кальяна, а обычный, требующий продолжительного розжига на сильном пламени.

Пьезозажигалки для сигар. Раскурить сигару сложнее, чем сигарету. Лучше использовать для этого пьезозажигалку с турбонаддувом, производящую необходимый результат даже при сильном ветре, или зажигалку с двумя форсунками, дающую два пламени. Сигарная пьезо зажигалка может быть оборудована сигарной гильотиной, для обрезания кончика запечатанной сигары.

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

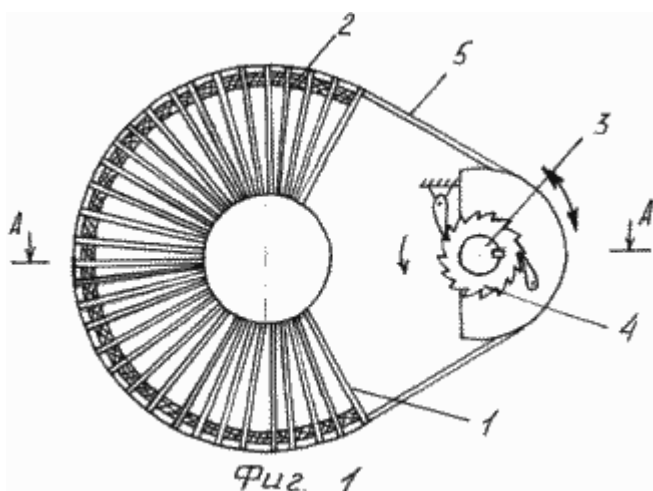
Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в устройствах привода самописцев и ленточных механизмов магнитных носителей информации.

Наиболее близким к изобретению является синхронный пьезоэлектрический двигатель, содержащий пьезоэлементы в виде биморфных пластин и подвижный узел (SU 430459 А, кл. Н 01 L 41/08, опубл. 30.05.1974).

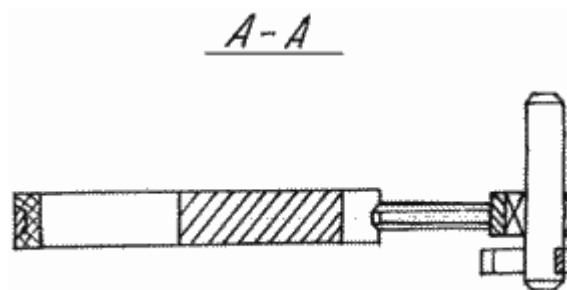
Недостатком указанного двигателя является невысокий момент вращения, обеспечиваемый двигателем.

Задача изобретения - увеличение момента вращения двигателя.

Поставленная задача решается за счет того, что в пьезоэлектрическом двигателе, содержащем пьезоэлементы в виде биморфных пластин и подвижный узел, последний выполнен в виде храпового механизма, а биморфные пластины одним концом закреплены неподвижно на основании и расположены радиально в одной плоскости, свободные концы биморфных пластин охвачены пасиком, связывающим их с храповым механизмом, причем плоскость расположения пластин перпендикулярна оси вращения храпового механизма.



Фиг. 1 схематично изображен пьезоэлектрический двигатель



Фиг. 2 - его разрез по А-А

Двигатель содержит биморфные пьезоэлементы 1, склеенные резиной 2, выходной вал 3, храповый механизм 4, пасик 5.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ

При подаче переменного напряжения на биморфные пьезоэлементы 1 последние изгибаются и их подвижные концы совершают колебательные движения с частотой подаваемого напряжения. Пасик, охватывающий эти подвижные концы, начинает также совершать колебательные движения, которые передаются храповому механизму, преобразующему колебательные движения во вращательное движение выходного вала 3.

Для повышения момента вращения двигателя множество биморфных пьезоэлементов электрически соединены параллельно, радиально установлены и охвачены пасиком, образуя шкив. Движение через пасик передается на храповый механизм.

В результате этого изгибный момент каждой пластины суммируется друг с другом и получается значительный по величине момент вращения.

По сравнению с известными пьезоэлектрическими двигателями в заявляемом устройстве выше ресурс работы из-за отсутствия износостойких прокладок, так как момент вращения передается через резиновый пасик. Ресурс работы пасика из силиконовой резины стабилен и очень продолжителен. Кроме того, существующие пьезоэлектрические двигатели с большим моментом вращения требуют для своего питания использования специальных преобразователей постоянного напряжения в напряжение ультразвуковой частоты (В.В.Лавриненко, И.А.Карташов, В.С.Вишневский. "Пьезоэлектрические двигатели", Москва. "Энергия". 1980, с.32-33, 83-89).

Для описываемого пьезоэлектрического двигателя источником питания может быть обычная сеть с частотой 50 Гц.

Пьезоэлектрический двигатель, содержащий пьезоэлементы в виде биморфных пластин и подвижный узел, отличающийся тем, что подвижный узел выполнен в виде храпового механизма, а биморфные пластины одним концом закреплены неподвижно на основании и расположены радиально в одной плоскости, свободные концы биморфных пластин охвачены пасиком, связывающим их с храповым механизмом, причем плоскость расположения пластин перпендикулярна оси вращения храпового механизма.

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ

На современных двигателях в системах питания используют пьезоэлектрические форсунки. Рассмотрим, как они работают и в чем их преимущество.



Пьезоэлектрические форсунки функционируют на основе пьезоэлектричества (piezo — от греческого “давить”). Ряд веществ, например, кварц, может вырабатывать электрические заряды при деформации кристалла (прямой пьезоэлектрический эффект) или деформироваться при подаче на них электрического заряда (обратный пьезоэлектрический эффект). Пример использования прямого эффекта — пьезоэлектрическая зажигалка. Вы нажимаете на кнопку, которая колеблет кварцевый кристалл, и получаете электрическую искру, поджигающую газ.

В форсунках используется обратный эффект. К пакету кристаллов подается электрическое напряжение, они изменяют свой размер и перемещают связанную с ними запорную иглу. В результате открывается отверстие, через которое подается горючее. Подобрав необходимое количество кристаллов, можно получить заданную величину перемещения запорной иглы. Основное преимущество пьезоэлектрической форсунки — очень высокое быстродействие и электрическое управление режимами работы.

Подобная схема позволяет очень точно дозировать подачу горючего и реализовать так называемый многоступенчатый впрыск, когда за один такт сжатия (или впуска) подается несколько порций горючего в зависимости от режима работы мотора. В дизельных двигателях это позволяет получить постепенное нарастание давления в цилиндре, снизить шумность двигателя, обеспечить более полное сгорание топлива.



## ТЕХНОЛОГИЯ ПЬЕЗОПЕЧАТИ

Micro Piezo(Микро Пьезо) технология - это запатентованная фирмой Epson технология, описывающая использование и работу эффекта пьезоэлектричества в печатающих устройствах.

Из истории струйных принтеров фирмы Epson

В июне 1984 года фирмой Epson был коммерциализирован свой первый струйный принтер IP-130K. Уже в октябре 1984 года он был представлен в Японии как модель SQ-2000.

SQ-2000 можно справедливо назвать родоначальником современных струйных принтеров Epson. Он был основан на струйной системе печати, которая стреляла каплями чернил в точно определённые места на бумаге, используя для этого пьезо элементы находящиеся в печатающей головке принтера. Модель SQ-2000 привлекла к себе значительное внимание за счёт сравнительно низкой цены и своих технических характеристик. Как бизнес устройство принтер отличали три основные особенности -это низкий шум, высокая скорость и чёткость печати.

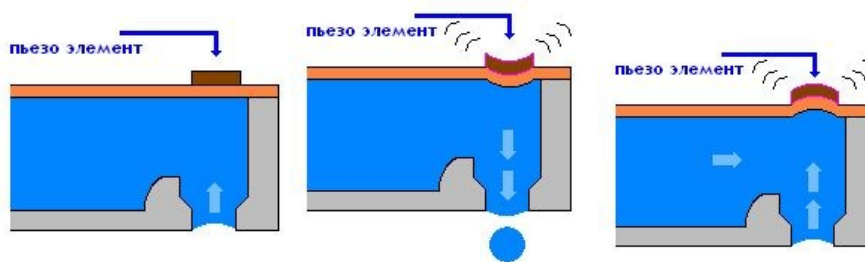
SQ-2000 был монохромным принтером. Его печатающая головка была сделана из стекла с пьезоэлементами, толщина которых не превышала 120 микрон, и имела 24 форсунок. Представленная компактная, монохромная модель SQ-2000 с большим количеством форсунок была революционным, новаторским изделием по тем временам.

Кроме того, SQ-2000 оставил в наследство технологии, которые продолжают использовать и по сей день: современные струйные принтеры используют сходную механическую базу и многие технические принципы, которые использовались в модели SQ-2000.



Первый струйный принтер Epson с пьезоэлементами - SQ-2000.

## УПРОЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ МИКРО ПЬЕЗО ТЕХНОЛОГИИ



Фирма Epson использует микро пьезо технологию в печатающих головках чернильных принтеров. Печатающие головки основанные на этой технологии состоят из мельчайших пьезо-элементов, ими называют кристаллы, которые способны значительно изменять форму под воздействием электричества. Подавая положительное электрическое напряжение пьезо элементы расширяются (работают как миниатюрные помпы), чтобы выбросить точно определённое количество чернил из форсунки печатающей головки. Если подать отрицательное электрическое напряжение на пьезоэлементы то произойдёт их усадка, вовлекая свежую партию чернил в камеру для чернил.

Печатающая головка это "сердце" струйного принтера. Именно от неё зависит какими основными характеристиками будет наделён принтер печатающий чернилами. Epson является единственным среди основных изготовителей принтеров кто использует печатающие головки с пьезоэлементами для печати чернилами. Эта уникальная технология Epson непохожа на печатающие головки термо- типа конкурентов, которые нагревают чернила, чтобы генерировать пузырьки и выстреливать чернилами на бумагу. В Epson принтерах, электрический сигнал посылается на пьезо элементы, размещенные над каждой форсункой печатающей головки, и капли чернил выпрыскиваются согласно силе, сгенерированной изменением формы этих элементов. Эта технология позволяет точно управлять пьезоэлементами, которые в свою очередь точно управляют размером капли чернил, получая изумительное качество печати. В то время как использование тепловой энергии разрушает печатающую головку, технология пьезопечати позволяет гарантировать долговечность печатающего узла принтера.

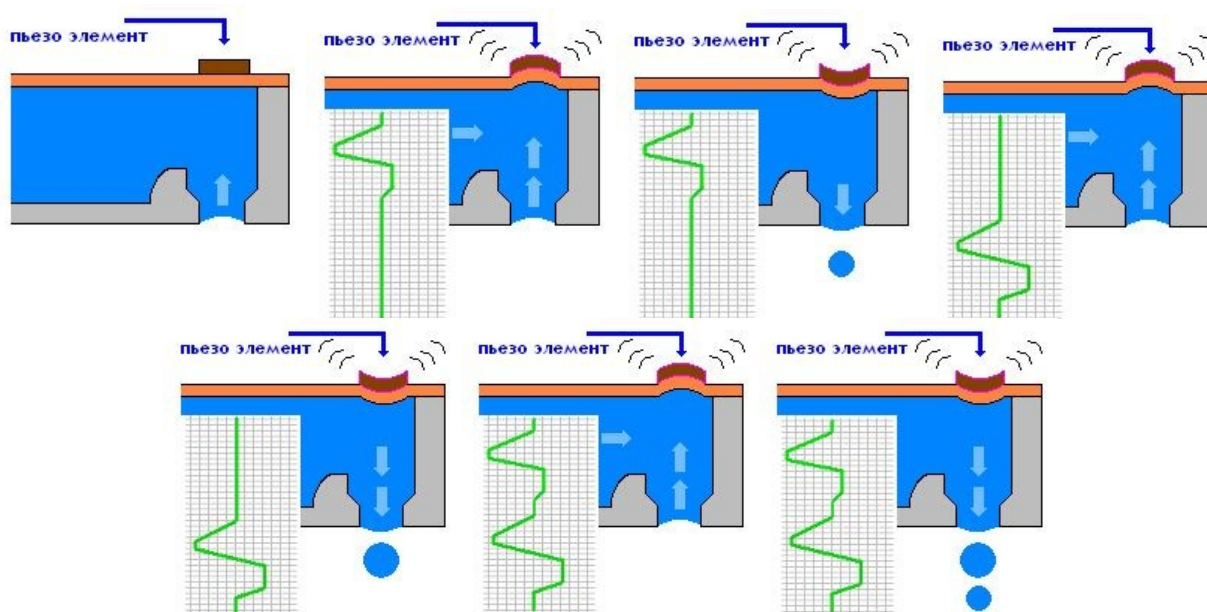
Когда чернила выпрыскиваются из форсунок Микро Пьезо печатающей головки, новые чернила поступают в головку из чернильной кассеты. Поступление чернил в печатающую головку основано на принципе работы принтера и препятствует завоздушиванию печатающей головки(проникновению воздушных пузырьков). Если воздушные пузырьки попадают в печатающую головку, то импульсы от пьезо элементов гасятся ими и это препятствует выпрыскиванию чернил из форсунок. Воздушные пузырьки могут попасть в печатающую головку, если чернильные кассеты опустошаются, таким образом необходимо постоянно поддерживать в печатающей головке уровень чернил не оставляя её без чернильных кассет или не позволять кассетам опустошаться. Если в чернилах, которые будет выпрыскивать печатающая головка, будут воздушные пузырьки это может значительно снизить качество печати принтера.

Чтобы гарантировать качество печати, программное обеспечение записывает в принтер информацию об уровне чернил в чернильных кассетах. Когда уровень чернил в кассетах приближается к минимально установленному программное обеспечение принтера уведомляет об этом пользователя. Поскольку при печати тип изображения и внешняя среда(например, температура и влажность) варьируется, фактический расход чернил может быть различным. Чтобы учитывать эти различные условия использования, Epson использует повышенное количество чернил в чернильных кассетах, чтобы гарантировать антизавоздушиваемость печатающей головки. Количество остающихся чернил вычислено с коэффициентом безопасности, чтобы гарантировать для потребителя максимальное качество при любом типе печати.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ

Зелёная линия на рисунке показывает переменный положительный (показанный как скачок вверх/вправо) и отрицательный (показанный как падение вниз/влево) электрический ток. При отрицательном заряде пьезокристалл сжимается перемещая чернила в канале к камере для чернил. Тогда как при положительном заряде заставляет пьезокристалл развернуться выталкивая чернила из камеры через форсунку.

Чем больший положительный электрический заряд подан на пьезоэлемент, тем больший размер выстреливаемой капли. Хотя очень большие капли обычно состоят из меньшей капли, выстреленной сначала, и быстро сопровождаемой большой каплей. Это начинается с малого отрицательного заряда, сопровождаемого малым положительным зарядом (малая капля), а затем следует другой отрицательный заряд и заключительный положительный заряд (2-ая большая капля).



На рисунке показано как различный электрический заряд определяет размер капли чернил.

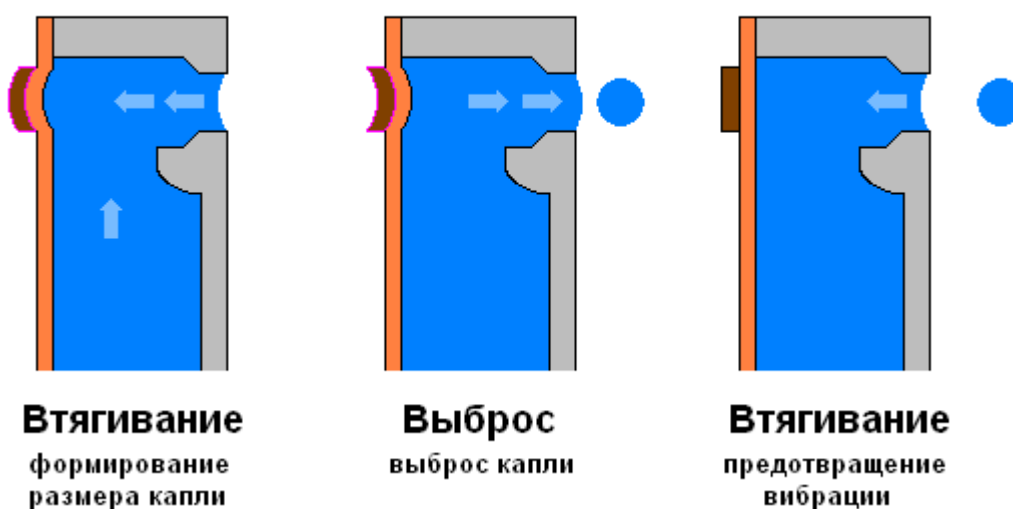
## МЕНИСК

Мениск - это термин, используемый для обозначения поверхностного натяжения расширяющейся области жидкости. Ниже представлен пример Мениска относительно форсунки принтера.



Через развитие Микро Пьезо технологии, инженеры Epson стали в состоянии предотвратить вероятность появления при печати капель "саталитов" или всплесков чернил, которые могли бы понизить качество печати. АМС(Active Meniscus Control) работает, используя процесс Втягивание-Выброс-Втягивание(Pull-Push-Pull), который стабилизирует мениск(поверхностное натяжение капли чернил). Кристалл усаживается(втягивается), подавая чернила из канала, формируя размер капли чернил, затем расширяется выбрасывая чернила, и снова усаживается, чтобы предотвратить колебания мениска.

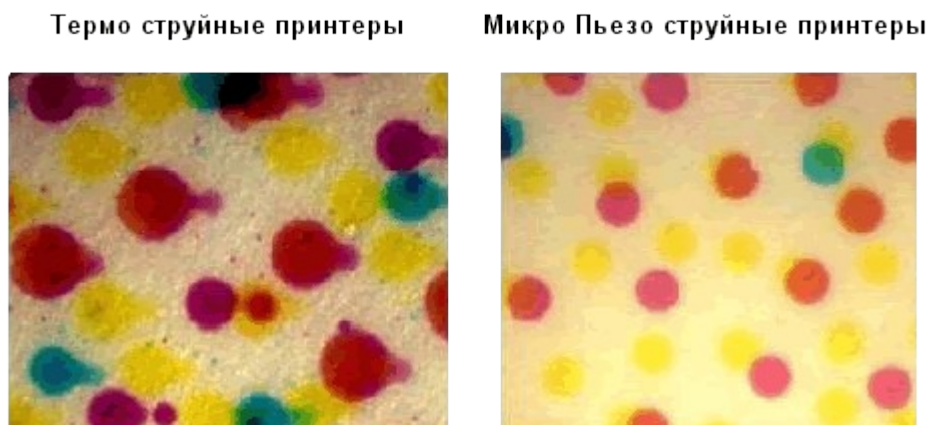
### Активное Управление Мениска (АМС)



Пояснение:

Управления Мениском позволяет получать при печати неизменно чёткую форму точки. Ниже приведены примеры печати струйного Термо принтера и Микро Пьезо принтера. На рисунке можно видеть точки полученные термопринтером(см. ниже слева), которые не имеют постоянного размера или формы, это связано с тем что принтеры с термопечатью не предлагают управление мениском. Результат этого - то, что после того, как капля чернил выстрелена, чернила создают вибрацию поверхностного натяжения(таким же образом, как камень, бросаемый в водоем вызывает волны). Это в свою очередь заставляет

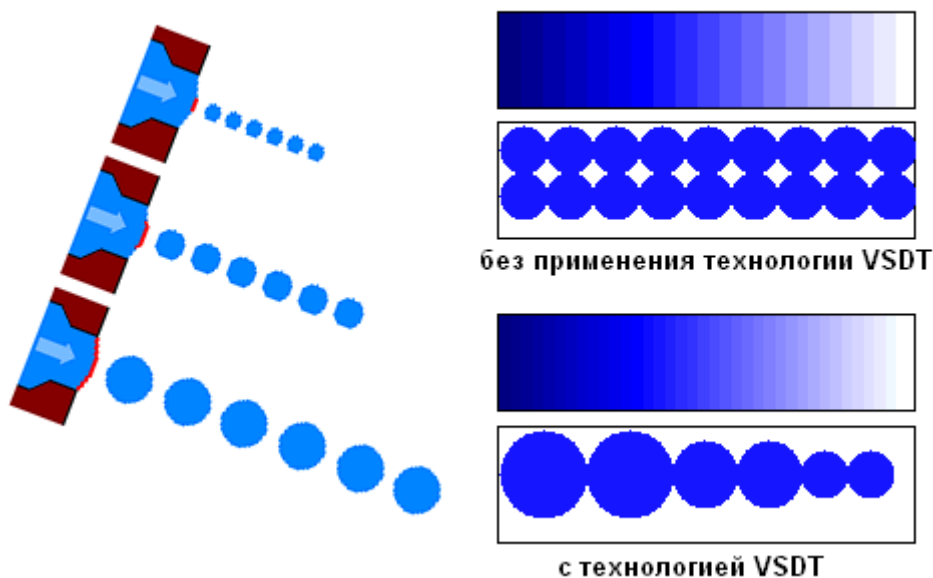
следующие капли неумышленно вызывают всплески, иначе названные, сателлитами. Естественно это может понизить качество печати.



**VSDT(Variable Size Droplet Technology)** = Технология переменного размера капли

Как рассказывалось ранее Epson имеет возможность в своих принтерах регулировать размер выдаваемой капли., т.е. имеет возможность использовать VSDT получая различные по размеру точки. Самые маленькие точки ещё называют Ультра-Микроточками(Ultra-microdots).

### Технология переменного размера капли (VSDT)



Ультра-микроточки - невероятно малые капельки чернил, между 1,5 и 5-ю пиколитрами в размере. Их диаметр является до десяти раз меньшим, чем диаметр человеческого волоса и близок к пределу разрешающей способности для человеческого глаза, т.е. практически не различим не вооружённым глазом. Ультра-микроточки позволяют печатать с намного более лучшей детализацией, меньшей зернистостью и более плавными градициями полу-

тонов. Качество печати с VSDT значительно совершеннее по сравнению с принтерами использующими фиксированный размер точки.

\*1 пиколитр (pl) = 0,000 000 000 001 литра.

Увеличение количества печатаемых точек может привести к более медленной скорости печати. Чтобы противостоять этому (применительно к использованию Ультра-микро-чек), Epson создали VSDT для использования в своих принтерах. Под управлением драйвера Epson принтера, создаются капли различных размеров для печати выбранного изображения. Это немного походит на то, как если бы вы использовали большой размер кисти для быстрого покрытия больших зон рисунка и меньший размер кисти для покрытия зон с тонкой детализацией. До шести различных размеров капли могут быть созданы печатающей головкой и до 3 размеров капли могут появиться на печатаемой странице. Точная комбинация используемых размеров капли изменяется, в зависимости от качества и впитывающей способности бумаги, выбранной в драйвере принтера.

Управление качеством разрешающей способности (RPM)

**RPM(Resolution Performance Management)** = Управление качеством разрешающей способности



Этот логотип информирует что принтер использует RPM

Оптимизированный DPI, на поддерживаемых моделях, позволяет на аппаратном уровне задействовать при печати все 6 возможных размера капли при печати на бумагу, а не максимально возможные 3 размера доступные принтерам без RPM.

## ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Пьезоэлектричество – физическое явление, которое известно человечеству достаточно давно и довольно неплохо исследовано учеными. Однако его невероятный потенциал еще не используется в полной мере. Пьезорезонаторы и генераторы оказались полезными во многих видах электрических измерений. Недавно ими стали пользоваться как электрическими фильтрами для линий связи и радиоприемных установок.

В то же время, когда исследовались кристаллический резонатор и его приложения, едва ли меньше усилий было положено на нерезонансные применения кварца, сегнетовой соли и в меньшей степени турмалина. Было изобретено много приборов, особенно в Германии и Японии, для измерений взрывных давлений и скоростей, ускорений, сил, вибраций в машинах и пр. В Соединенных Штатах прогресс шел главным образом в области акустики, путем использования чрезвычайно большого пьезоэлектрического эффекта в сегнетовой соли. Путем остроумных применений пластинок из кристаллов сегнетовой соли были разработаны микрофоны, телефоны, патефонные адаптеры, приборы для звукозаписи и другие устройства, во многих отношениях превосходящие своих электромагнитных предшественников.

Возрождение интереса к пьезоэлектричеству привело к обширным исследованиям свойств сегнетовой соли. Это вещество оказалось самым замечательным из всех известных диэлектриков и прототипов группы кристаллов, известных под названием «сегнетоэлектриков». Их пьезоэлектрические свойства во многом аналогичны со свойствами ферромагнитных материалов и тесно связаны между собой.

Что касается атомной теории пьезоэлектричества, то достигнутые до сих пор успехи весьма невелики. Ранние попытки предпринимались братьями Кюри, Рике и Фогтом, а особенно Кельвином. Наиболее строгая трактовка принадлежит М. Борну, который в свою общую теорию динамики кубической решетки включил рассмотрение и пьезоэлектрических эффектов.

Несмотря на то, что пьезоэффект был открыт еще в XIX веке, а со второй половины XX активно развивалась теория и технология создания пьезокерамических материалов, считается, что пьезокерамика — один из перспективных материалов века XXI. Причиной такого взгляда является то, что замечательные свойства, присущие пьезокерамике, до сих пор не в полной мере востребованы наукой, техникой и технологиями.

Активное использование пьезокерамики в различных областях началось в 60–70 годах XX века. Достаточно хорошо были изучены и использованы свойства пьезокерамических датчиков и пьезокерамических преобразователей. В настоящее время пьезокерамика широко используется для ультразвуковой диагностики в медицине, авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефте- газовом комплексе; силовая пьезокерамика — в ультразвуковой сварке, чистке поверхностей, нанесении покрытий, сверлении и т. д.

В то же время пьезокерамика еще недостаточно используется для создания генераторов, актюаторов и в комбинированных системах. Однако современные требования по энергосбережению, миниатюризации, адаптивности к компьютерным системам управле-

ния и контроля все чаще заставляют производителей техники и оборудования обращаться к производителям пьезокерамики с целью совместного поиска тех или иных технологических решений с помощью пьезокерамики. В результате появляются новые типы пьезокерамики, создаются новые и совершенствуются известные пьезокерамические элементы и компоненты. Особое внимание в настоящее время уделяется пьезокерамическим трансформаторам и актюаторам.

- высокой надежности, 50 миллионов коммутационных циклов
- возможность работы в химически агрессивных средах, в воде, песке, металлической стружке
- искробезопасная, бесконтактная коммутация
- небольшие габариты
- современный дизайн
- широкий диапазон рабочих температур -40 до +125 градусов
- большой диапазон токов и напряжений
- возможность антивандального исполнения
- низкая стоимость

В отличие от существующих сенсоров, емкостных, индуктивных и др., пьезокнопки не требуют дополнительного источника питания.

В современной линейке струйных принтеров Epson применяется печатающая головка нового поколения (рис. 2). В ней для реализации пьезоэлектрического метода печати используется многослойный пьезоэлемент, толщина которого составляет 20 микрон.

Многослойный пьезоэлемент обладает следующими преимуществами:

- высокое формируемое давление;
- быстрое и стабильное срабатывание;
- высокая частота колебаний пьезоэлемента и пластины;
- долговечность;
- экономичность;
- высокая скорость печати;
- печать с разрешением 1440 и 2880 dpi.

Пьезокерамика, благодаря своим уникальным свойствам находит все большее применение в различных областях техники и технологии. Иностранные производители пьезо-



керамики, элементов и компонентов на ее базе, пытаясь более полно удовлетворить современные требования рынка, проводят исследования и конструкторские работы с целью улучшения параметров керамики, разрабатывают ее новые типы, на что выделяются значительные финансовые средства. С целью удешевления продукции разрабатываются новые технологии, более энергосберегающие и позволяющие автоматизировать процессы производства. Считается, что только крупные компании-производители пьезокерамики, оснащенные передовыми технологиями и современным оборудованием, смогут в полной мере удовлетворить требования мирового рынка.

Пьезоэлектрические материалы могут быть разбиты на: монокристаллы, встречающиеся в виде природных минералов или искусственно выращиваемые (кварц, дигидрофосфаты и аммония, сегнетова соль, ниобат лития, силикоселенит и германоселенит и др.), и поликристаллические сегнетоэлектрические твердые растворы, подвергнутые после синтеза поляризации в электрическом поле (пьезокерамика). Из Пьезоэлектрические материалы первой группы применяются лишь некоторые например кварц, обладающий большой температурной стабильностью свойств, механической прочностью, малыми диэлектрическими потерями и влагостойкостью. Недостатки — сравнительно слабый пьезоэффект, малые размеры трудность обработки. Используется главным образом в пьезоэлектрических фильтрах и стабилизаторах частоты; в лабораторной технике применяются кварцевые излучатели и приемники ультразвука. Дигидрофосфат аммония — искусственно выращиваемый сегнетоэлектрический стоек, до точки плавления ( $T_{пл} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) обладает сравнительно сильно выраженным пьезоэффектом и малой плотностью, однако недостаточно механически прочен. сегнетовой соли (выращиваемые до больших размеров) имеют высокие значения характеристик, определяющих чувствительность приемника звука. Малая влагостойкость, низкая механическая прочность, а также сильная зависимость свойств от температуры (из-за низких значений температуры и  $T_{пл} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и напряженности электрического поля ограничивают применение сегнетовой соли. Ниобат лития, силикоселенит и германоселенит наряду с сильно выраженным пьезоэффектом и высокой механической прочностью обладают высокой акустической добротностью и используются в области гиперзвуковых частот. Турмалин, гидрофосфат сульфат лития и др. практически не используются. Наиболее распространенным промышленным Пьезоэлектрические материалы является пьезоэлектрическая керамика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За время существования нашей цивилизации много раз происходила смена традиционных источников энергии на новые, более совершенные. И не потому, что старый источник был исчерпан.

Сейчас, в начале 21-го века, начинается новый значительный этап земной энергетики. Появилась энергетика «щадящая», построенная так, чтобы человек не губил планету, на которой он живет, заботился об охране уже сильно поврежденной биосферы.

На пути широкого внедрения альтернативных источников энергии стоят трудно разрешимые экономические и социальные проблемы. Прежде всего, это высокая капиталоемкость, вызванная необходимостью создания новой техники и технологий. Во-вторых, высокая материалоемкость : создание мощных электростанций требует, к примеру, огромных количеств металла, бетона и т.д. В-третьих, под некоторые станции требуется значительное отчуждение земли или морской акватории. Кроме того, развитие использования альтернативных источников энергии сдерживается также нехваткой специалистов. Решение этих проблем требует комплексного подхода на национальном и международном уровне, что позволит ускорить их реализацию.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Основы электроники и микроэлектроники» – Б.С. Гершунский. К.: Вища школа, 1989 г.
2. «Пьезоэлектричество и его практические применения» У. Кэди
3. «Пьер Кюри». Иоффе АФ (1956). УФН 58 (4): 572-9.
4. «Радиопередающие устройства» Г.А. Зейтленка, Москва, 1969г.
5. «Электричество» С.Г. Калашников, Москва, 1977г.
6. «Электротехнические материалы» Ю.В. Корицкий, Москва, 1968г.
7. <http://antiretona.narod.ru/>
8. [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_medicine/25722/Пьезоэлектрические](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_medicine/25722/Пьезоэлектрические)
9. <http://electrik.info/>
10. [http://libertas.pp.ua/publ/orgtehnika/tehnologii/tehnologii\\_strujnoj\\_pechati\\_printerov\\_epson/10-1-0-4](http://libertas.pp.ua/publ/orgtehnika/tehnologii/tehnologii_strujnoj_pechati_printerov_epson/10-1-0-4)
11. <http://mini-soft.net.ru/>
12. <http://oval.ru/enc/58898.html>
13. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Пьезоэлектрический\\_эффект](http://ru.wikipedia.org/wiki/Пьезоэлектрический_эффект)
14. [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01\\_01/stat-48.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_01/stat-48.htm)
15. <http://www.mobiledevice.ru/pezoelement-prototip-Technology-energiia-datchik-temperatura.aspx>
16. [http://www.portalnano.ru/read/tezaurus/definitions/s\\_t\\_microscope](http://www.portalnano.ru/read/tezaurus/definitions/s_t_microscope)
17. <http://www.quartz1.com/assortiment/detail.php?ID=30764>
18. <http://www.quartz1.com/assortiment/list.php?ID=13&section=4442>
19. <http://www.quartz1.com/price/price.php?group=220>
20. <http://www.ref.by/refs/88/19808/1>
21. <http://www.vniir.ru/p/piezo/switchers/>