

Пьезокерамические излучатели звука (звонки, оповещатели)

Гейер А.Ф.

Пьезокерамические излучатели звука получили весьма широкое распространение в самых различных областях техники. Нажимая кнопку калькулятора или мобильного телефона, 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. большей 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.

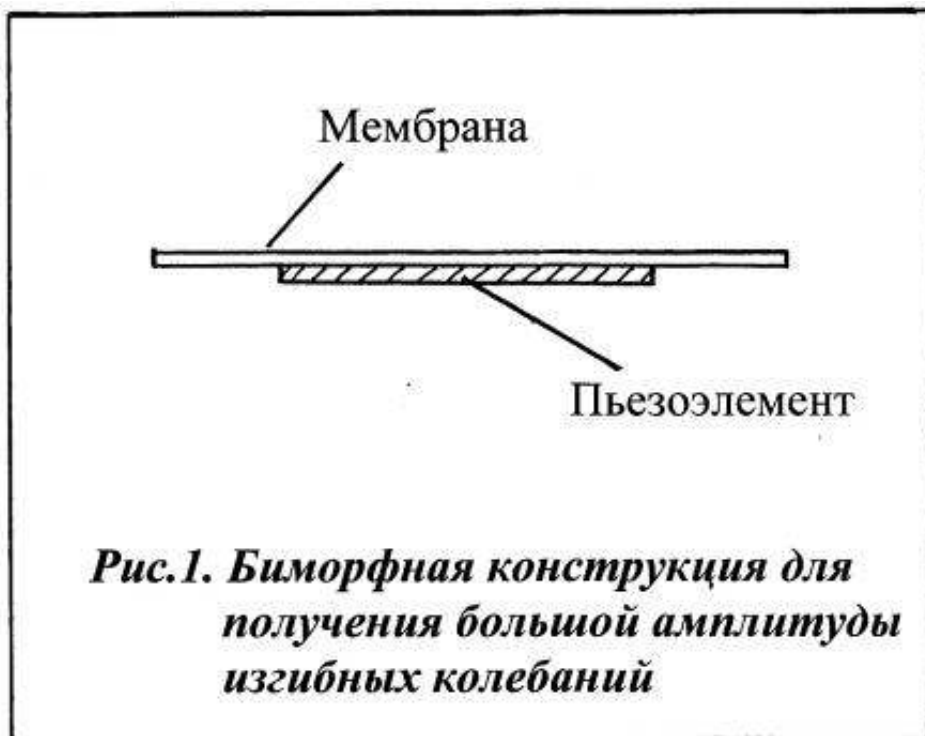
Как с помощью пьезокерамики получить звук

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.

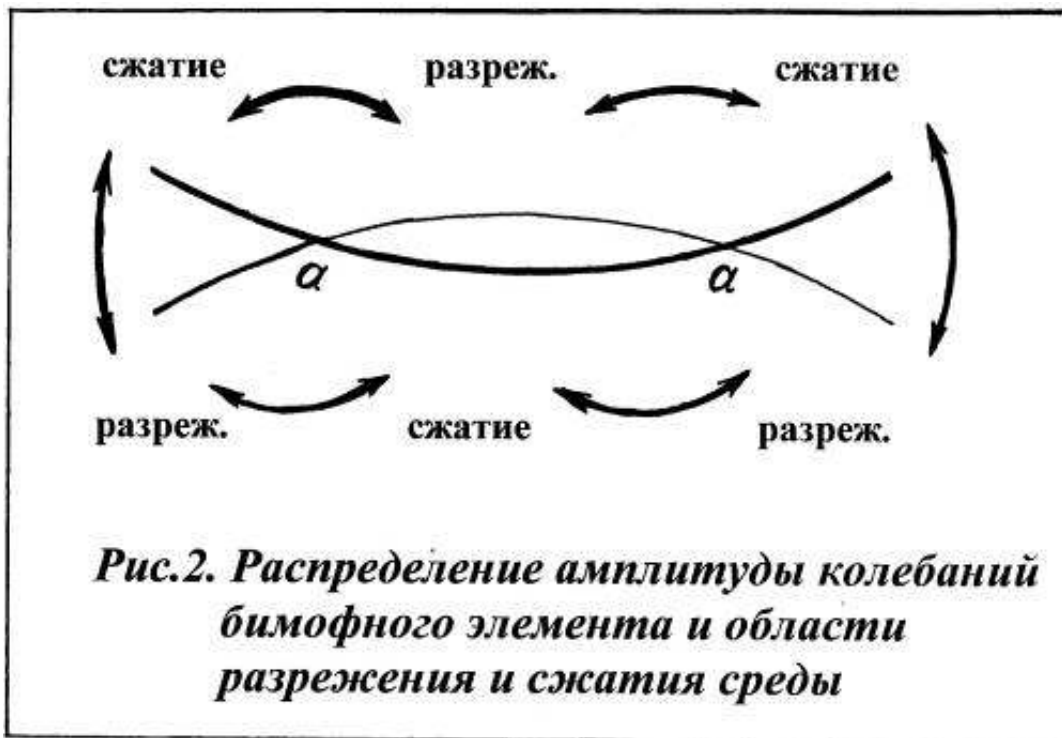
Несмотря на такую пессимистическую предпосылку с помощью пьезокерамики удаётся получать значительные показатели по громкости. Отдельные образцы пьезокерамических преобразователей могут развивать звуковое давление на расстоянии 1 м до 130дБ. Как ощутить эту цифру? Это болевой порог. Абсолютное значение звукового давления, соответствующего 130дБ – это 60 н/м^2 или 6 кг/м^2 . 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 **а** 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.

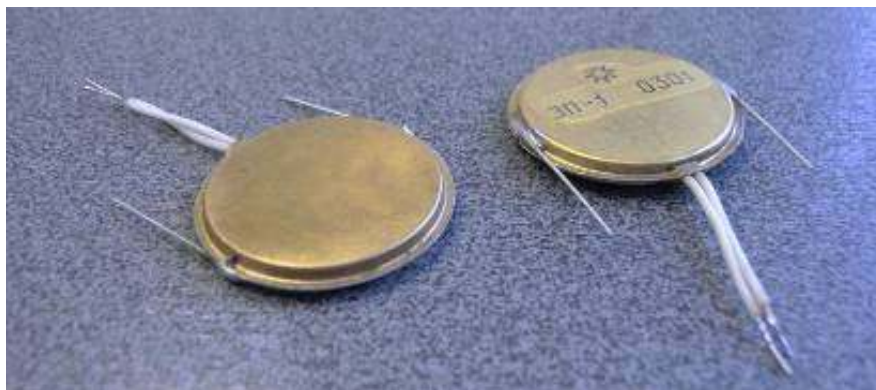


Рис. 3

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

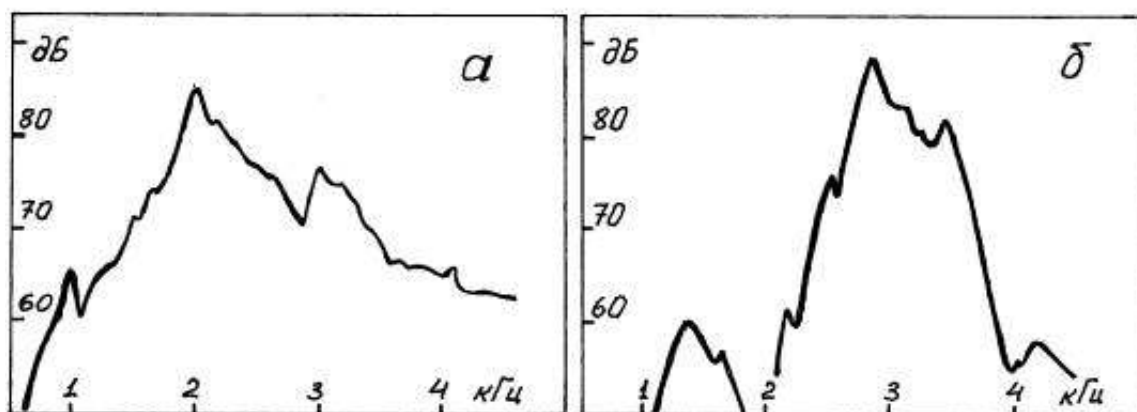


Рис.5. а) Частотная характеристика широкополосного звонка ПВА-1;

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

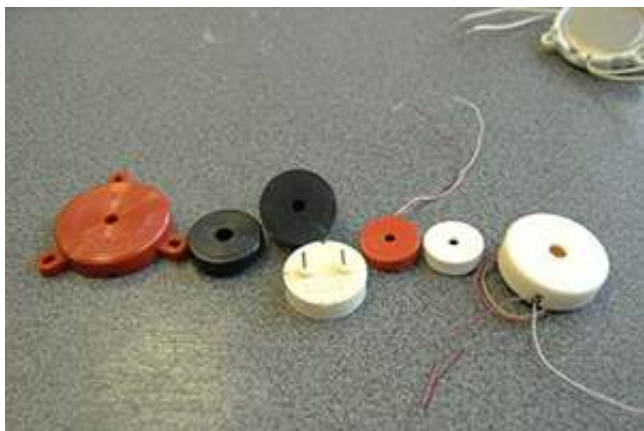
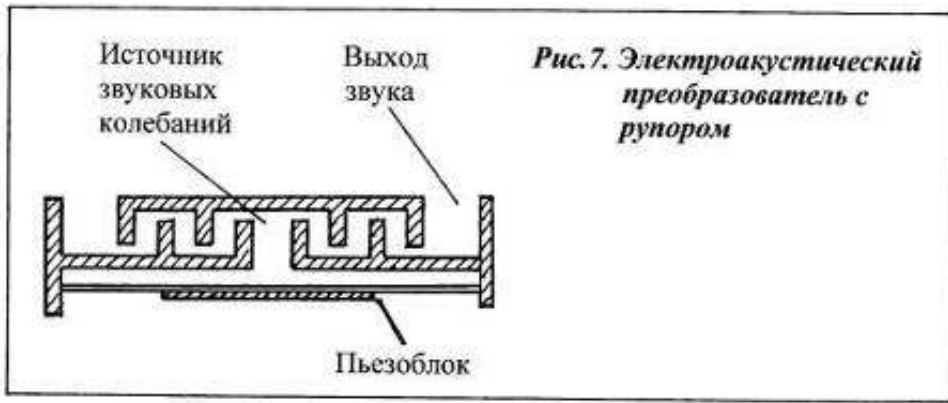


Рис. 6

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. Звонок 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.

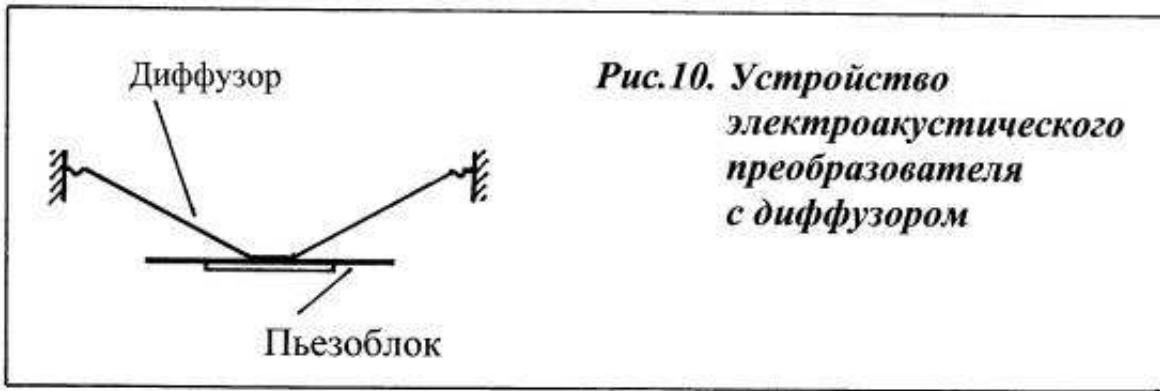


Рис.10. Устройство электроакустического преобразователя с диффузором

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.

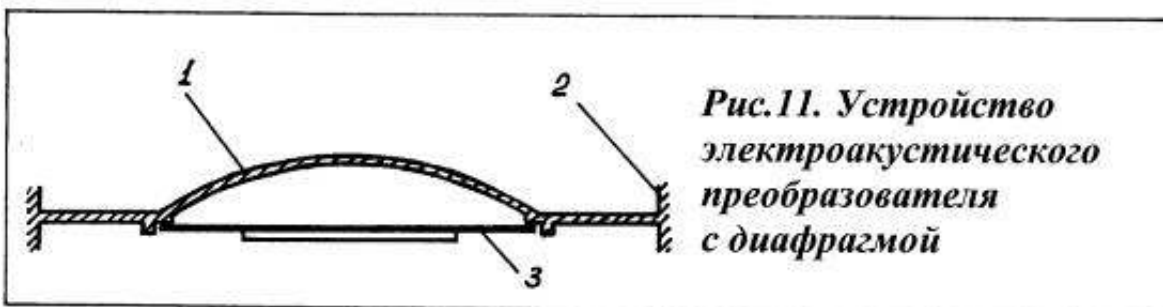


Рис.11. Устройство электроакустического преобразователя с диафрагмой

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

Тип оповещателя	Звуковое давление, дБ	Резонансная частота, кГц	Габаритные размеры, мм
ОСА-100	90	3,2	Ф38 x 26
ОСА-110	95	2,2	70 x 70 x 33
ОСА-110-Б	105	2,8	Ф94 x 32
ОСА-110-К	107	2,8	Ф94 x 32

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.

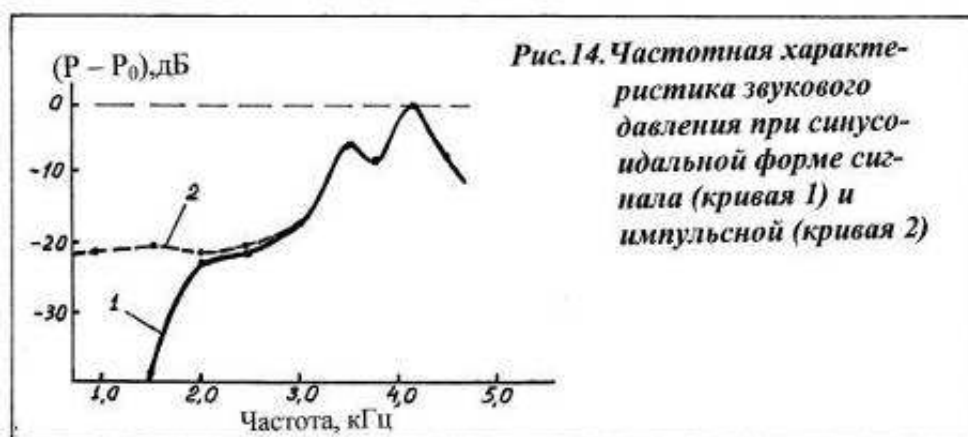


Рис.13

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.

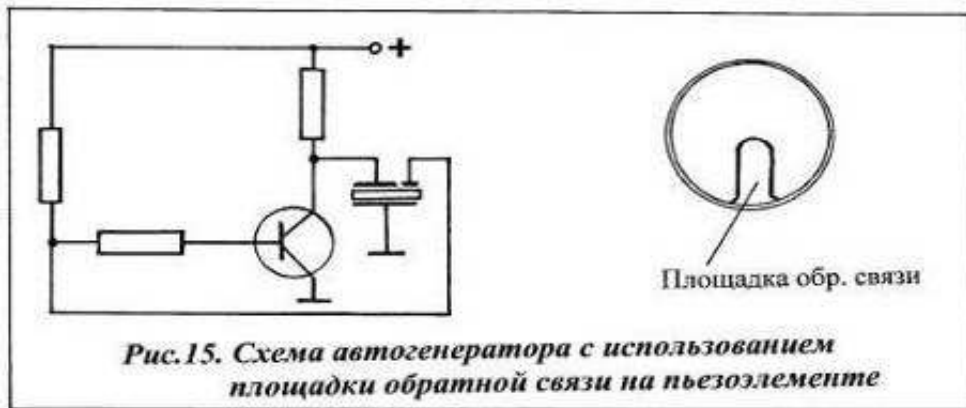
Как его «раскачать»?

Как уже убедился читатель, 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.



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 самым 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 1м 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 подведенной электрической. В таблице 4 представлен результат этого расчёта.

Таблица 4

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 окончного 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 окончного 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 окончного устройства, включающая в себя источник эдс E , дроссель L , диод D , пьезопреобразователь Π 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 второй половины периода ключ разомкнут и эдс самоиндукции действует на преобразователь.

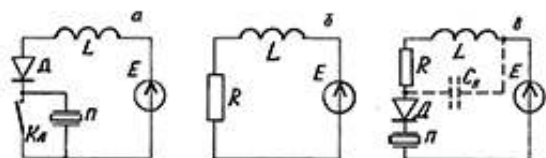


Рис.16. а) Упрощённая схема окончного устройства; б) эквивалентная схема для полупериода с замкнутым ключём; в) эквивалентная схема для полупериода с разомкнутым ключём.

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

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

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.

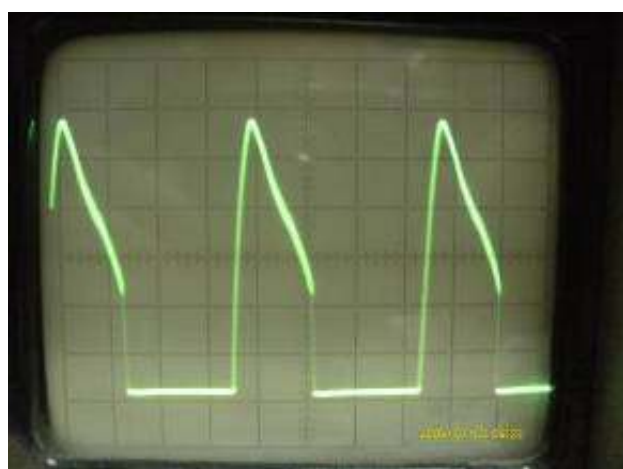


Рис.17

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.

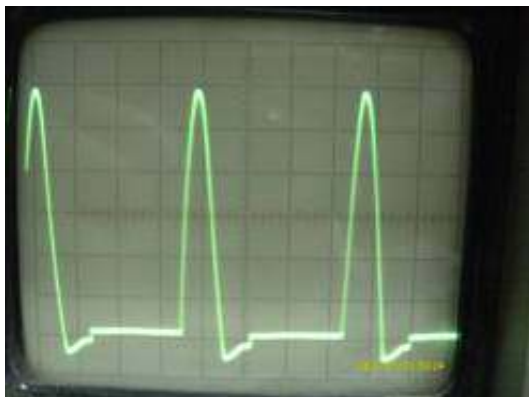


Рис.18

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.

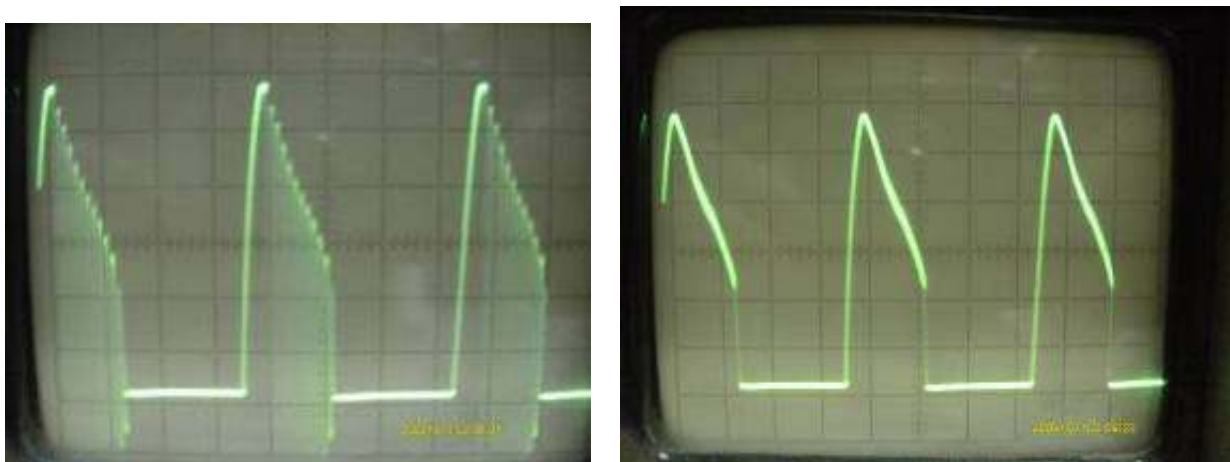


Рис.19

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 Pп 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

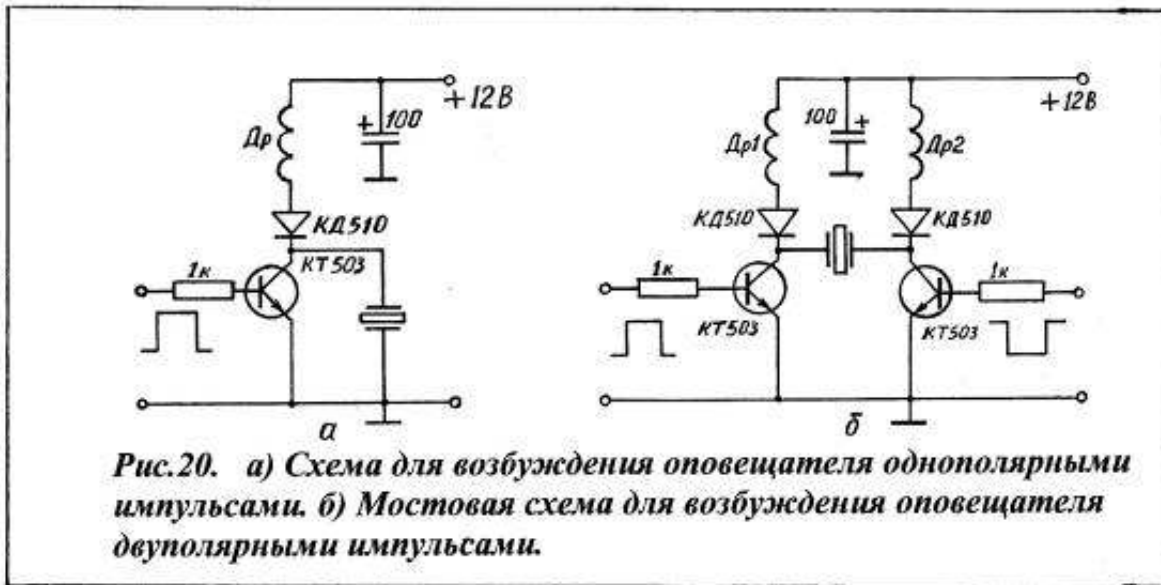
$$W = Pп / f$$

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 = 15мГн, R = 18 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.

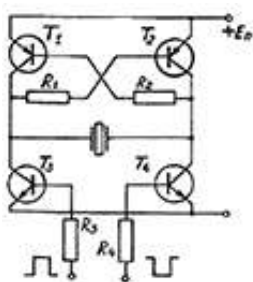


Рис.21. Мостовая схема оконечного устройства питаемая повышенным (десятки вольт) напряжением.
 Транзисторы:
 T1, T2 - КТ-502Г, КТ-973А, КТ-8147А
 T3, T4 - КТ-503Г, КТ-972А, КТ-8116А
 Резисторы R1 – R4 5 – 10 кОм.

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.