

## **Применение многослойных пьезоэлектрических актюаторов в системах впрыска дизельных двигателей. (Обзор по зарубежной и отечественной периодике)**

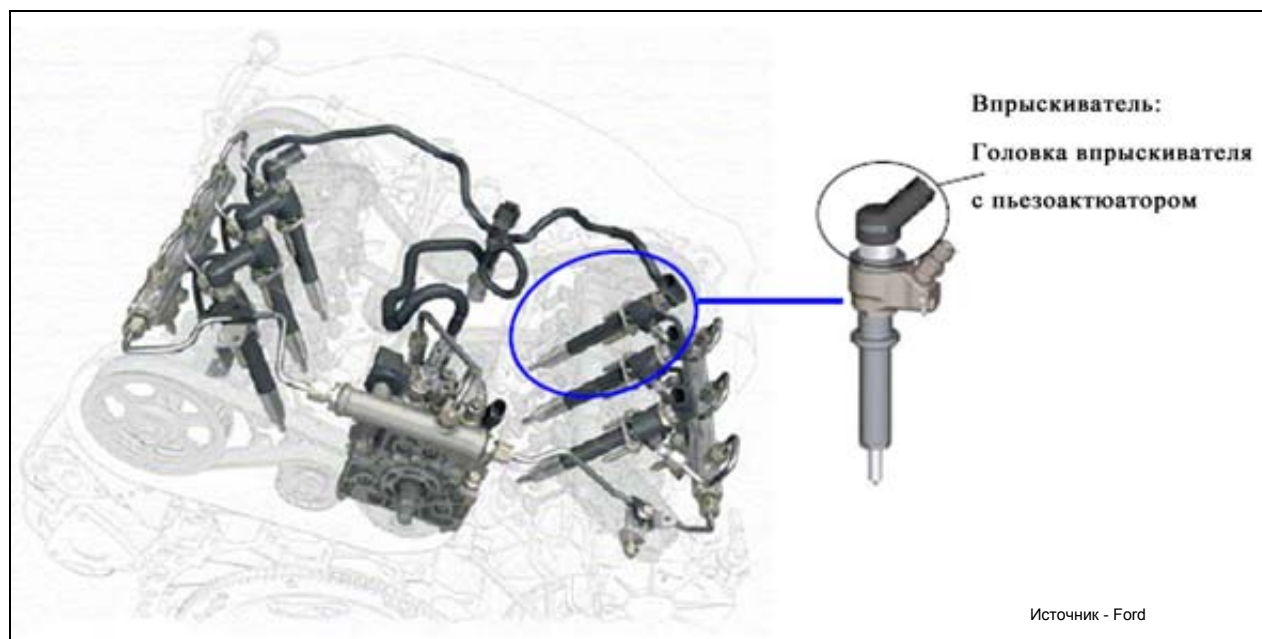
В дизельном двигателе процесс сгорания топлива в цилиндре тесно связан с процессом впрыскивания топлива. Путем управления периодичностью впрыскивания ее длительностью, качеством топлива и скоростью протекания топлива как функции времени становится возможным эффективно управлять рабочими характеристиками двигателя.

К сожалению, параметры единовременного впрыскивания не обеспечивают одновременно минимума выбросов, наилучшей экономии топлива и высокой величины крутящего момента.

Автомобильная промышленность за рубежом, в последнее время, усовершенствовала систему впрыска дизельного топлива с помощью пьезоактюаторов. Система общей топливной магистрали (Common Rail)– это система впрыска, которая подает топливо высокого давления в любой момент. Для снижения шума двигателя и эмиссии необходимо добавить несколько предварительных впрыскиваний в основное впрыскивание в течение рабочего цикла дизельного двигателя.

**Основной компонент общей топливной магистрали - это инжектор, в состав которого входит пьезоэлектрический актюатор, который выполняет роль быстродействующего пьезопривода.**

### **Система впрыска топлива высокого давления (Common Rail)**



Использование пьезоэлектрических актюаторов обеспечивает возможность соответствия стандарту Евро V- VI в будущем, как для дизельных, так и для бензиновых двигателей.

Такая система впрыска топлива уменьшает задержку воспламенения топлива за счет:

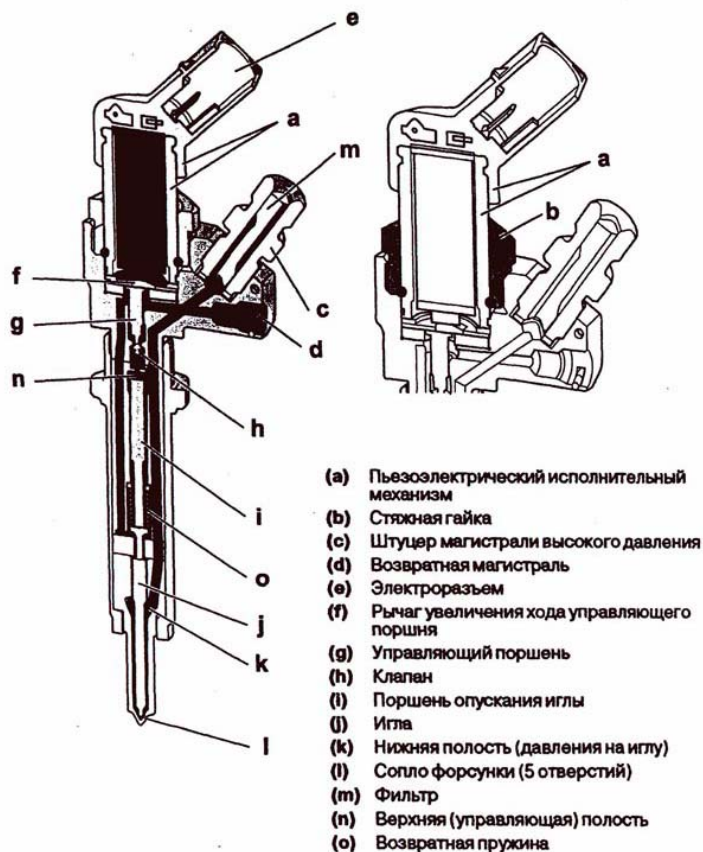
- **очень высокого давления впрыска, что приводит к сверхтонкому распылению топлива;**
- **-быстрого и независимого управления форсунками (длительность одного впрыска 200мкс), что позволяет осуществлять несколько впрысков в один и тот же цилиндр в течение одного цикла;**
- **-дозирования с высокой точностью количества топлива на различных фазах работы двигателя, что увеличивает КПД двигателя, увеличивает срок**

**службы, снижает расходы топлива и улучшает экономичность автотранспорта.**

Пьезоэлектрический актюатор – электронный быстродействующий клапан, позволяющий управлять формой и длительностью импульса впрыска, что приводит к улучшению рабочих характеристик и гибкости системы управления впрыска топлива по заданному алгоритму для различных режимов управления:

- **экономичный режим**, обеспечивающий максимальное КПД и минимальное потребление топлива. Для его реализации, желательно производить сгорание топлива при достижении максимальной температуры в центре зоны (TDC), при этом форма импульса впрыска обеспечивает плавное нарастание и падение скорости протекания топлива;
- **режим экологически чистый**, обеспечивающий минимальный уровень выброса вредных примесей в атмосферу. Для его реализации, желательно создание в цилиндре профиль скорости инжекции с низкой начальной скоростью инжекции в сочетании с резким снижением температуры и последующим резким фронтом спада.
- **режим форсажа**, обеспечивающий максимальную тягу. Профиль скорости инжекции характеризуется плавно нарастающим фронтом, за которым следует относительно длительный цикл и далее резким спадом фронта. При длительном цикле достигается максимальная высокая температура.

## Применение пьезокерамического актюатора для впрыска топлива



При работе пьезоэлектрического актюатора в составе форсунки, под действием электрического напряжения, пьезопакеты, из которых состоит актюатор, расширяются в направлении электрического поля, при этом обеспечивая перемещение, пропорциональное управляющему напряжению и длине актюатора, и развиваемое усилие, пропорциональное площади поперечного сечения элемента. Таким образом, движение пьезопакета передается беспрепятственно прямо к игле форсунки без какого-либо механического элемента. Малая инерционность позволяет работать с частотой до 100 Гц (длительность импульса 100-200 мс), что позволяет точнее дозировать количество впрыскиваемого топлива, и тем самым сократить количество вредных веществ, возникающих при сгорании.

**В последнее время по созданию Систем впрыска дизельного топлива, с применением многослойного пьезоэлектрического актюатора, активно работают такие зарубежные фирмы как: EPCOS; SIEMENS; BOSCH; KYOCERA ; DELPHI и др. с целью обеспечения возможности соответствия стандарту эмиссии Евро VI , введение которого в Европе планируется с 2010 -2012 года, и осуществление которого просто не возможно без пьезокерамики.**

**Многослойные пьезоэлектрические актюаторы** предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Их действие основано на использовании обратного пьезоэлектрического эффекта, т.е. на деформации пьезоэлемента под действием электрического поля.

Если к пьезокерамическому материалу приложить электрическое напряжение, то материал расширяется в направлении электрического поля, при этом обеспечивая перемещение, пропорциональное управляющему напряжению и длине актюатора, а развиваемое усилие, пропорционально площади поперечного сечения элемента.

Многослойные пьезоэлектрические актюаторы используются для получения перемещения от субмикрон до сотен микрон с очень высоким разрешением, очень коротким временем

реакции и небольшим потреблением энергии. Многослойные компоненты имеют преимущества перед пакетными керамическими пластинами, обладая возможностью производить смещение при низковольтных напряжениях, и имеют компактный размер.

Пьезоэлектрические актюаторы изготавливают из многослойных керамических блоков, с толщиной слоя от 25 до 150 мкм, площадью сечения от 2х2 до 10х10 и высотой от 20 до 60 и более мм.

**ОАО «Элпа» обладает технологией изготовления многослойных пьезоактюаторов.**

### **Установка многослойного актюатора.**

Многослойный актюатор требует бережного отношения при установке, т. к. пьезокерамический материал, из которого изготовлен пьезоактюатор, хрупкий.

Для повышения прочности актюатор может быть снабжен изолирующими накладками из поликора или ситалла.

Правильная установка многослойного актюатора в механическую систему должна обеспечивать давление только осевой составляющей силы. Применяемая сила должна быть хорошо центрирована. Наклонная и поперечная силы, которые могут быть вызваны отклонением от параллельности концевой пластины, должны быть аннулированы, иначе это приведет к повреждению актюатора. Актюатор должен быть установлен только на свои концевые стороны. Фиксирование по периметру может повредить пьезокерамические элементы или электроды.

Для обеспечения нормальной работы многослойный актюатор должен быть надежно соединен с твердой поверхностью. Существует три основных метода крепления элементов:

- приклеивание;
- припайвание;
- фиксирование с помощью зажимов.

Основным методом является приклеивание. Эпоксидный или акрилатный клей обеспечивают прочное, эластичное и непроводящее крепление. Эластичная природа клеевого соединения обычно устраняет появление усталости материала, вызываемой колебаниями во время длительной работы. Рекомендуется использовать эпоксидный клей типа К-400.

Пайка считается менее надежным средством крепления актюатора, так как колебания пьезокерамики со временем могут вызвать повреждение соединения. Кроме этого, необходимо также соблюдать температурный режим во время пайки и не допускать превышения допустимой температуры для поляризованного элемента. С другой стороны пайка является электрическим проводником и в некоторых случаях это просто необходимо.

**При тепловом воздействии генерируется заряд из-за направленного пьезоэлектрического эффекта пьезокерамики. Во избежание нежелательных явлений следует проводить пайку в условиях подключения актюатора к коротко замкнутой электрической цепи.**

Метод крепления актюатора с помощью зажимов имеет ряд недостатков, связанных с возможной деформацией и применять не рекомендуется

Многослойные актюаторы поставляются как с проводами так и без них. Припайке проводов к актюатору следует придерживаться следующих рекомендаций:

- пайку осуществлять при закороченном актюаторе
- температура пайки  $240 \pm 10$  °С
- время пайки не более 3 сек.
- припой ПСрОС 2,5 58 ГОСТ 19738-74
- флюс активная канифоль.

Многослойные актюаторы позволяют обеспечить малые перемещения, точность которых определяется только аппаратурой контроля и управления, т.е. для обеспечения высокой точности и стабильности актюатор должен использоваться с датчиками точного позиционирования.

Тензодатчик, соединенный с поверхностью актюатора, является эффективным и недорогим средством определения действительной позиции (перемещения рабочей плоскости) актюатора. Он позволяет определять влияние различных факторов, воздействующих на перемещение актюатора, включая входное напряжение, (переменную) нагрузку, эффекты крипа (времени задержки перемещения для данного приложенного напряжения, вызванного инерцией материала) и гистерезиса в пьезокерамических элементах. Определение позиции может осуществляться с точностью приблизительно 0,1% от максимального перемещения актюатора на микросекундном уровне времени реакции.

### Эксплуатационные параметры.

**Перемещение** (максимальный ход) - номинальное значение величины максимального хода; измеряется, как правило, при нормальной температуре и при небольшой статической нагрузке (не более 10% от максимального значения).

В первом приближении при действии статического напряжения величина перемещения определяется выражением:

$$\Delta L = d_{33} \cdot n \cdot U \text{ [м]},$$

где:

$d_{33}$ -пьезомодуль материала,  $(450 \pm 50) \times 10^{-12}$ ; (Кл/Н)

$n$  - количество слоев в пьезоактюаторе, ( в зависимости от типа актюатора от 50 до 1100 и более)

$U$  - напряжение, (В).

При приложении дополнительной нагрузки - величина перемещения:

$$\Delta L = d_{33} \cdot n \cdot U - F/S,$$

где:

$F$  - приложенная сила; (Н)

$S$  – жесткость, (м/Н)

**Жесткость** - является мерой упругости актюатора и определяется выражением:

$$S = \frac{Q}{S_{33}^E \cdot L}$$

где:

$S_{11}^E$  - модуль упругости пьезоматериала  $(16 \pm 2) \times 10^{-12}$ , (м<sup>2</sup>/Н)

$Q$  - поперечное сечение актюатора, (м<sup>2</sup>)

$L$  - длина актюатора, (м)

Высокие значения жесткости требуется для минимизации нежелательных уменьшений длины актюатора под воздействием нагрузки и повышения эффективного использования актюатора с целью достижения максимального усилия.

Жесткость актюатора существенно влияет на перемещение; с ее уменьшением соответственно изменяется (уменьшается) величина перемещения под воздействием нагрузки, что связано с уменьшением первоначальной длины актюатора при приложении статической нагрузки (создание предварительного механического напряжения).

Жесткость актюатора определяет развиваемое усилие (при нулевом перемещении) актюатора и определяет выражение (с точностью  $\pm 15\%$ ).

$$F = \frac{d_{33} \cdot Q \cdot U}{S_{33}^E \cdot L}$$

где:

F - блокирующая (развиваемая) сила, (Н)

$d_{33}$ - пьезоэлектрический модуль пьезоматериала  $(450 \pm 50) \times 10^{-12}$ ; (Кл/Н)

Q - поперечное сечение актюатора, (м<sup>2</sup>)

$S_{33}^E$  - модуль упругости пьезоматериала  $(16 \pm 2 \times 10^{-12})$ , (м<sup>2</sup>/Н)

U – напряжение, (В)

L - длина актюатора, (м)

### Резонансная частота.

**В технических характеристиках на актюатор указывается максимальная резонансная частота, когда одна из его сторон жестко закреплена, а другая свободно движется без внешней нагрузки. Резонансная частота определяется путем возбуждения актюатора напряжением порядка нескольких вольт. Резонансная частота свободно подвешенного актюатора в два раза больше, чем измеренная у закрепленного.**

На практике резонансная частота не нагруженного актюатора не представляет интереса, так как любое добавление компонента или массы приводит к снижению резонансной частоты, и, более того, резонанс механических элементов конструкции возбуждаемый колебаниями пакета может стать преобладающим.

Резонансная частота нагруженного актюатора всегда ниже резонансной частоты свободного актюатора. Работа на резонансной частоте иногда используется для получения максимальных значений перемещений при малых уровнях сигнала.

Резонансное поведение систем может быть оценено следующими простыми методами:

1. Пьезоактюатор возбуждается генератором синусоидальных напряжений с амплитудой 10 В. Подаваемый входной сигнал контролируется на осциллографе. При настройке частоты генератора на резонансную частоту будет иметь место искажение контролируемого сигнала.

2. Пьезоактюатор с подсоединенным к нему осциллографом работает в режиме датчика усилий. При небольшом ударе механической части будет наблюдаться звон системы на резонансной частоте. Основная резонансная частота может быть найдена из следующего выражения:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{m_{эф}}}$$

где:

$f_0$  – резонансная частота, (Гц)

S - жесткость актюатора, (м/Н)

$m_{эф}$  – эффективная масса (около 1/3 массы пьезоактюатора плюс любые установленные концевые детали), (кг).

### Электрическая емкость.

Номинальное значение емкости актюатора определяется путем измерения тока при динамическом возбуждении на частоте 1 кГц с амплитудой 5В.

Измерения обычно проводятся при комнатной температуре. Погрешность измерений  $\pm 4\%$ . Следует отметить, что емкость не является постоянной величиной и зависит от условий работы (связана с изменением диэлектрической постоянной пьезокерамики).

Ёмкость увеличивается с ростом амплитуды сигнала, при увеличении температуры и росте сжимающего усилия. Изменение ёмкости в диапазоне температур  $-35^{\circ}\text{C} + 85^{\circ}\text{C}$  не более  $\pm 20\%$ .

Значение ёмкости для динамического режима работы определяет требования к мощности источника питания, амплитуды и частоты управляющего напряжения электрические свойства актюатора.

В большинстве случаев, можно считать импеданс актюатора чисто ёмкостным. Поэтому по отношению к источнику питания, актюатор, можно рассматривать как электрическую ёмкостную нагрузку. Только в области резонанса возникает необходимость замены ёмкостного эквивалента эквивалентом LCR - схемой. При работе от мощного усилителя на эквивалентную ёмкостную или LCR нагрузку должны быть приняты меры для предотвращения саморазогрева. Работа актюатора при малых мощностях не связана с опасностью саморазогрева.

Тепловые потери актюатора, работающего в частотном режиме определяются выражением:

$$P_{\text{теп}} = 2\pi \cdot f \cdot C_0 \cdot U^2 \cdot \text{tg}\delta \quad (\text{Вт}),$$

где:

- tg $\delta$  - величина тангенса потерь пьезокерамического материала актюатора ( $\sim 0.01-0.025$ );
- f - частота (Гц);
- C<sub>0</sub> - ёмкость актюатора (Ф);
- U - напряжение (В).

Импеданс актюатора существенно зависит от условий возбуждения (степени деформации актюатора, величины и длительности приложенного напряжения, структуры системы, в которой используется актюатор и механической нагрузки на актюатор). Подмена такой сложной структуры простым ёмкостным эквивалентом может привести к рассогласованию актюатора и выбранного для него источника питания.

### **Динамический режим включения актюатора.**

При расчете актюатор может быть замещен эквивалентной ёмкостной электрической схемой.

В электрической эквивалентной схеме резонанс выражается в том, что при приближении частоты к собственной частоте колебательной системы амплитуда резко возрастает, а амплитуды напряжения на индуктивности и ёмкости порознь больше, чем входное напряжение.

Явление резонанса в динамическом режиме работы актюатора позволяет при тех же значениях входного напряжения, при импульсном или частотном режиме питания, увеличить величину смещения по сравнению со статическим режимом питания. При импульсном питании необходимо согласование импеданса источника питания и импеданса актюатора (на его резонансной частоте), что позволяет обеспечить увеличение величины смещения.

### **Срок службы, надежность.**

В настоящее время срок службы и надежность актюатора определяются двумя режимами:

- статическим режимом при высоком значении возбуждающего напряжения;
- интенсивным динамическим режимом, характеризуемого потенциально большими внутренним напряжением благодаря внешним условиям ( усилие, частота, температура среды), действующих на актюатор.

Данная ситуация может часто возникать в стабилизированных обратной связью механических системах (например, в системах активного гашения вибраций).

Срок службы в статическом режиме обычно определяется как время работы актюатора при потенциальном возбуждении при оговоренном напряжении и окружающих условиях, таких как влажность, температура, давление.

Надежность актюатора, работающего в динамическом режиме, обычно определяется количеством циклов, которое он способен выдержать при установленном предварительном механическом напряжении, рабочей температуре и точно определенных условиях возбуждения, таких как сигнал возбуждения, частота повторения и т.д.

Еще на ранних этапах применения типичным механизмом отказов считалось образование трещин внутри керамики, что являлось причиной возникновения электрического пробоя и образования короткого замыкания. Воздействие внешних факторов на поверхность актюатора может привести к возникновению трещин в конструкции актюатора. Разрыв электродов приводит к потере активности актюатора. Существенным вкладом, в повышение надежности актюатора при динамическом циклировании, является создание значительного механического напряжения, составляющего до 50% указанной максимальной нагрузки. Для повышения надежности могут быть приняты меры по уменьшению величины деформации.

Если требуется перемещение 10 мкм, то использование актюатора с перемещением 20 мкм при работе с вдвое меньшим напряжением имеет двойное преимущество: надежность работы в статическом режиме повышается благодаря снижению напряжения, при динамическом режиме уменьшения потребления мощности.

В настоящее время в нормальных условиях достигнутый срок службы многослойных актюаторов в статическом режиме составляет 5000 и более часов, срок хранения в нерабочем состоянии свыше 10 лет, частота отказов многослойных актюаторов в промышленной аппаратуре составляет менее 1% за 5 лет. В динамических режимах работы время наработки более  $10^9$  циклов переключения.

#### **Эксплуатационные параметры многослойных актюаторов:**

- диапазон рабочих температур от минус 35°C до плюс 85 °C
- механическое воздействие:
  - синусоидальные вибрации 1-200 Гц
  - амплитуда ускорения 50 м/с<sup>2</sup>
  - механический удар многократного действия:
    - пиковое ускорение 150 м/с<sup>2</sup>,
    - длительность 2÷15мс,
    - количество ударов 100
- относительная влажность при t- 25 °C до 98%

При изменении температуры от -20°C емкость и перемещение практически линейно растут с увеличением температуры до 120°C.

Созданные многослойные актюаторы позволяет их использовать в бытовой аппаратуре и изделиях спецтехники.

**Примечание:** по требованиям Заказчика возможно изготовление многослойных пьезоэлектрических актюаторов различной конструкции, включая актюаторы в корпусном варианте исполнения.

Актюатор в квазистатическом режиме электрически представляет собой емкость с низкими потерями и потребляет энергию только на заряд-разряд.

При работе в частотном диапазоне активная потребляемая мощность может быть оценена для синусоидального сигнала из выражения

$$P = 2\pi \cdot f \cdot 0.02 \cdot C_0 \cdot U^2$$

где:

f – частота переменной составляющей возбуждающего сигнала, Гц

U – амплитуда переменной составляющей возбуждающего сигнала, В

C<sub>0</sub> – емкость элемента, Ф

и не должна превышать (0,5 -0,7)Вт на 1 элемент (6х6х3мм) во избежание перегрева актюатора.

Рекомендуемая схема включения актюатора приведена на рис.1.

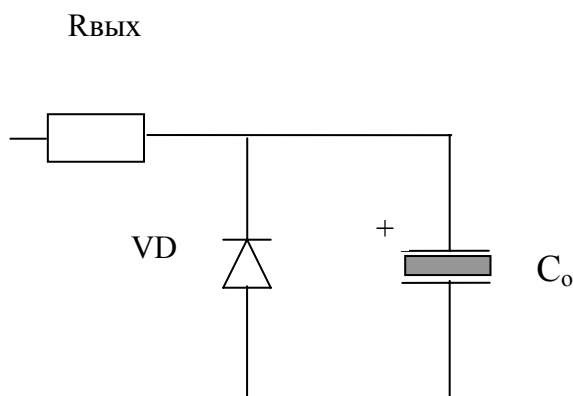


Рис.1

$R_{\text{вых}}$  –выходное сопротивление управляющего источника;

$VD$  –предохранительный диод для отсечки отрицательного напряжения;

$C_0$  –управляемый актюатор.

Актюатор не должен включаться в обратной полярности, т.к. в этом случае он может быть располяризован. Однако, актюатор обладает технологическими запасами по напряжению вплоть до минус 20В. Превышение этой величины на положительном электроде элемента ведет к его располяризации и потере параметров.

Актюатор обладает собственными резонансными частотами, лежащими выше 10 кГц и не представляющими интереса для потребителя. При нагрузке на массу, приклейке к основанию и т.д. эти частоты падают примерно на 20% и остаются в высокочастотной области. При включении актюатора через индуктивность актюатор образует колебательную систему с индуктивностью, резонансная частота которой рассчитывается по известным формулам, причем возбуждающее напряжение на актюаторе при работе на этих частотах может быть выше напряжения источника питания. Включение предохранительного диода в этом случае обязательно.