

# Радиооптика

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Электрон. журн. 2016. № 04. С. 25–40.

DOI: **10.7463/rdopt.0416.0847731**

Представлена в редакцию: 16.06.2016

Исправлена: 30.06.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.313

## Расчет характеристик пьезоэлемента ультразвукового двигателя

Масленникова С. И.<sup>1</sup>, Ситников А. В.<sup>1,\*</sup>,

[\\*sit\\_inna@mail.ru](mailto:sit_inna@mail.ru)

Миронова И. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>"НИИ Прикладной Механики" им. В.И. Кузнецова,  
Москва, Россия

---

Ультразвуковые (пьезоэлектрические) двигатели являются на сегодняшний день наиболее перспективными электромеханическими преобразователями для использования в миниатюрных электронных устройствах. Однако расчет пьезоэлемента для ультразвукового двигателя вызывает определенные из-за многомерности и нелинейности решаемых задач. В данной статье даны описания принципов действия пьезоэлектрических двигателей, проанализированы их достоинства и недостатки, приведены характеристики пьезоэлементов, кроме того, предложен алгоритм расчета частотных характеристик пьезоэлемента на базе электрической модели электромеханической системы пьезоэлемента, приведен пример расчета для двух вариантов габаритов пластины из пьезокерамики цирконата титаната свинца.

**Ключевые слова:** пьезодвигатель, пьезоэлемент, цирконат титанат свинца, пьезомодуль, коэффициент электромеханической связи, резонансная частота, антирезонанс

---

### Введение

Современная тенденция миниатюризации в технике выдвинула новые требования к исполнительным элементам различных систем автоматики по габаритно-весовым характеристикам. Требования к габаритам становятся настолько жесткими, что использование преобразователей электрической энергии в механическую, основанных на электромагнетизме, стало невозможным. Поиск новых физических эффектов, на основе которых можно создавать миниатюрные электродвигатели сфокусировался на пьезоэффекте, который был открыт еще в начале 80-х годов 19-го столетия Жаком и Пьером Кюри. Несмотря на то, что история изучения пьезоэффекта насчитывает полтора столетия, использовать его стали только после получения первых образцов пьезокерамики в середине 20-го века.

В настоящее время область применения пьезоэлементов (ПЭ) достаточно широка – от силовых элементов реле до виброподставки лазерных гироскопов. Однако именно в по-

следнее время ощущается всплеск интереса к пьезодвигателям. Происходит это в связи с появлением огромного количества миниатюрных (носимых) электронных устройств, в состав которых есть необходимость включить преобразователи электрической энергии в механическую. Виброэлементы сотовых телефонов, устройства фокусировки цифровых фото- и видеокамер создаются на основе пьезоэффекта.

Еще одной областью применения пьезоэлементов является медицина. Ультразвуковые медицинские инструменты, микродвигатели для проведения операций микрохирургии, миниатюрные дозаторы – все эти устройства изготавливаются с использованием современной пьезокерамики.

Основными достоинствами пьезодвигателей являются:

- высокий КПД;
- высокий момент удержания при отсутствии питающего напряжения;
- возможность создания миниатюрных и даже микродвигателей;
- возможность получения низких скоростей и микроперемещений без применения механических редукторов;
- высокая удельная мощность.

Однако теоретический расчет характеристик пьезодвигателей вызывает большие трудности из-за сложности при решении нелинейной пространственной задачи, а также из-за взаимовлияния электрических и механических параметров пьезоэлементов [1]. Все это приводит к низкой воспроизводимости расчетных характеристик на практике. На сегодняшний день качество пьезоэлемента определяют, как правило, путем измерения его параметров при испытании, что приводит к высокому проценту выбраковки ПЭ [2].

Вопросам анализа конструктивных решений различных типов пьезоэлектрических двигателей и расчету характеристик пьезоэлемента посвящена данная статья.

## 1. Принцип действия и классификация пьезодвигателей

В настоящее время модель возникновения пьезоэффекта базируется на представлении структуры материала, как совокупности микрокристаллов (элементарных ячеек) симметричной и асимметричной конфигурации [3]. Например, форма ячейки цирконат-титаната свинца (ЦТС) представляет собой симметричную структуру при температуре выше точки Кюри (для ЦТС-19  $T_c = 325^\circ\text{C}$ ), но при охлаждении материала и при воздействии на него внешнего электрического поля плотностью порядка 1 кВ/мм происходит поляризация элементарной ячейки, т.е. смещение электрического центра симметрии. При дальнейшем снижении температуры до рабочей ( $T_{\text{раб макс}} = \frac{T_c}{2}$ ) поляризация сохраняется.

Если такой поляризованный материал подвергнуть механическому сжатию, то элементарные ячейки переориентируются и на поверхности материала возникает электрический потенциал. Это явление называют прямым пьезоэффектом. Если к поверхности пьезоэлемента приложить разность потенциалов, то за счет переориентации элементарных ячеек (доменов) образец изменит форму. Это явление называют обратным пьезоэффектом.

Прямой пьезоэффект применяется для создания датчиков давления (тензодатчиков), а обратный – для преобразования электрической энергии в механическую, т.е. для создания пьезодвигателей, виброэлементов. Широко применяется также сочетание прямого и обратного пьезоэффектов для стабилизации частоты переменного напряжения. Это происходит следующим образом: при подаче переменного периодического напряжения на обкладки пьезоэлемента он начинает вибрировать. Если частота колебаний пьезоэлемента близка к его механической резонансной частоте, то механические колебания затягиваются на эту резонансную частоту. При этом из-за прямого пьезоэффекта на обкладках ПЭ будет возникать переменное напряжение, с частотой, обусловленной механическим резонансом и к этой частоте будет затягиваться напряжение, подаваемое на обкладки. Т.к. механические параметры ПЭ очень стабильны, то и частота переменного напряжения становится очень стабильной (отклонения от резонансной частоты пьезорезонатора имеет порядок  $10^{-7}$ ).

По виду механического движения пьезоэлектрические двигатели можно разделить на двигатели поступательного движения (линейные двигатели) и двигатели вращательного движения (роторные) [4]. По принципу преобразования колебательного движения пьезоэлемента – на двигатели волнового типа и двигатели ударного типа.

В отличие от электромагнитных двигателей, в которых передача энергии ротору происходит за счет электромагнитных взаимодействий, т.е. при отсутствии механического контакта между ротором и статором, создание вращающего момента в пьезодвигателях происходит за счет механической передачи, чаще всего, за счет сил трения.

Схем преобразования изменения габаритов пьезоэлемента в поступательное (вращательное) движение каретки (ротора) может быть множество, начиная с кривошипно-шатунного механизма и заканчивая принципом движения инерцоидов, вызвавших бурю обсуждений в середине 70-х годов прошлого столетия. Принцип действия последних построен на разности коэффициентов трения покоя и скольжения при движении по твердой поверхности или демпфирующих свойств жидкостей при движении в вязкой среде.

Рассмотрим принцип действия наиболее распространенных на сегодняшний день пьезодвигателей (ПД).

Чтобы преобразовать цикл расширение-сжатие в поступательное (вращательное) движение необходимо создать несимметричное распределение механических сил. Такая картина наблюдается, например при использовании упруго деформированных пластин (рис. 1).

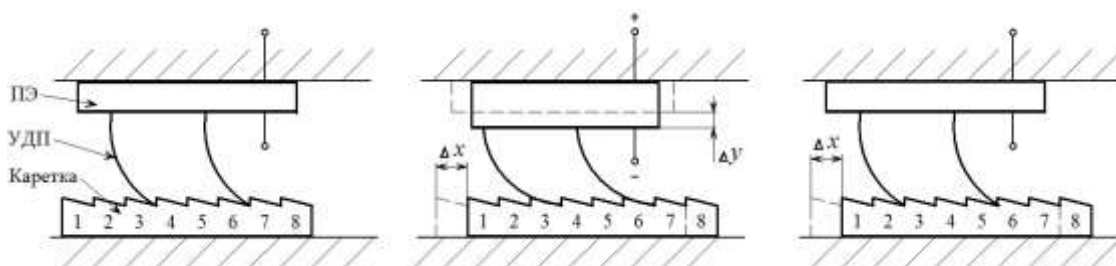


Рис. 1. Принцип действия линейного пьезодвигателя

При подаче напряжения на обкладки ПЭ происходит увеличение его габаритов по вертикали (рис. 1) на величину  $\Delta u$ . При этом упруго деформированные пластины (УДП) воздействуют на подвижный элемент (каретку) как в направлении перемещения грани ПЭ, так и в перпендикулярном направлении. Каретка переместится на расстояние  $\Delta x$ . При снятии напряжения с ПЭ происходит обратное перемещение грани ПЭ, УДП распрямляются, переходя в зацепление со следующим зубом каретки.

Подвижный элемент (каретку) зубчатым делать необязательно, каретка будет перемещаться за счет наклона упругих элементов и сил трения.

Похожая картина происходит при формировании бегущей волны в статорном элементе, который за счет упругого взаимодействия приводит в движение каретку (ротор). Однако возбуждение бегущей волны требует использования не одного, а нескольких пьезоэлементов, на которые последовательно подается управляющее напряжение. Это усложняет конструкцию двигателя, но дает дополнительные возможности по созданию реверсных двигателей.

Кроме линейного перемещения толкателя, с помощью многоэлектродных пьезоэлементов можно получить и другие виды движения, например, изгиб, скручивание, стоячую волну, бегущую волну и т.д. Примеры получения изгибных перемещений и формирования бегущей волны изображены на рис. 2, 3.

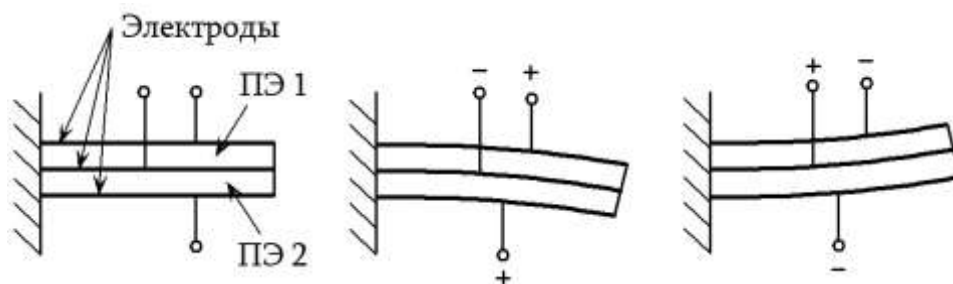


Рис. 2. Пьезоэлемент изгибного типа

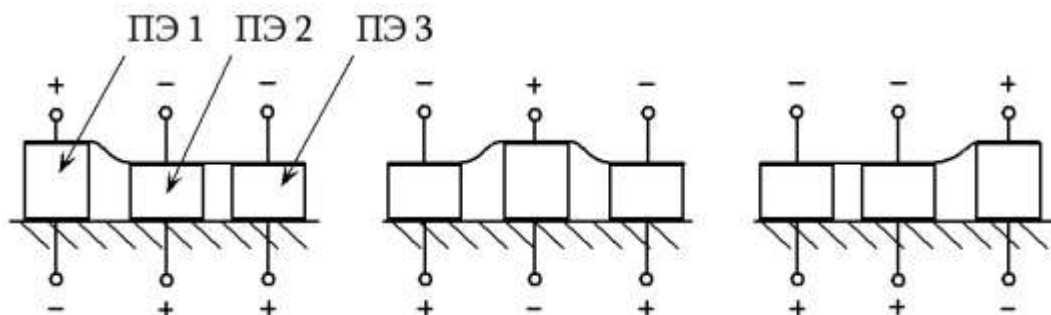


Рис. 3. Создание бегущей волны с помощью пьезоэлементов

Расположив пьезоэлементы с поляризацией в двух плоскостях, можно получить эффект шагающего механизма (рис. 4).

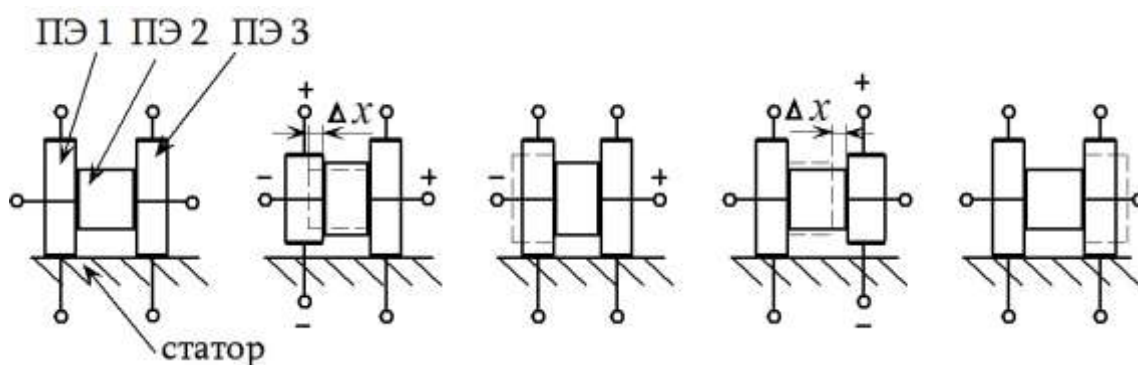


Рис. 4. Шагающий механизм на пьезоэлементах

Поляризация ПЭ1 и ПЭ3 (рис. 4) выполняется в вертикальной плоскости, а ПЭ2 – в горизонтальной. При подаче напряжения на обкладки ПЭ1 и ПЭ2 левая стойка сжимается и переносится на  $\Delta x$  вправо, после чего напряжение с ПЭ1 снимается. Левая стойка входит в зацепление со статором. После этого подается напряжение на ПЭ3, а с ПЭ2 напряжение снимается. Правая стойка перемещается на  $\Delta x$  вправо. После этого напряжение с ПЭ3 снимается и правая стойка входит в зацепление со статором. Цикл перемещения на один шаг закончен.

С помощью такого механизма можно осуществить перемещение в двух противоположных направлениях по прямой, а при использовании еще одного пьезоэлемента – в плоскости.

Подобного вида перемещение можно организовать, возбуждая в многоэлектродном пьезокерамическом статоре бегущую волну, причем статор выполняется зубчатым. Такого типа двигатели разработаны для установки в объективы фотоаппаратов [5].

Недостатком многоэлектродных пьезодвигателей является многоканальность системы управления. К тому же изменение габаритов ПЭ при подаче на его обкладки напряжения имеет порядок десятых долей миллиметра, поэтому получить большой шаг ПД невозможно. Это делает невозможным получения больших скоростей вращения ротора, но при этом позволяет создавать низкооборотные безредукторные двигатели и осуществлять очень точное позиционирование подвижного элемента.

КПД пьезодвигателей может быть очень высок (более 90%). Главным препятствием к достижению такого высокого КПД является сложность расчета ПЭ. Если частота, подаваемого на обкладки пьезоэлемента напряжения не совпадает с его механической резонансной частотой, то КПД снижается более, чем в два раза [6]. При этом нужно отметить, что резонансные характеристики ПЭ зависят от его габаритов. Таким образом, получение высоких энергетических и эксплуатационных характеристик пьезодвигателя зависит от его размеров

## 2. Электромеханические характеристики пьезоэлемента

Выбор пьезоматериалов для пьезодвигателей осуществляют в основном по следующим параметрам: пьезомодуль в направлении рабочих деформаций, модуль Юнга, коэффициент электромеханической связи и механическая добротность. Они определяют диапазон перемещений, упругие и резонансные свойства, эффективность преобразования электрической энергии в механическую, степень затухания колебательных процессов пьезоэлемента.

Очень важной характеристикой пьезоэлемента является зависимость сопротивления (проводимости) образца пьезокерамики от частоты напряжения, подаваемого на его обкладки. По этой характеристике можно определить резонансные и антирезонансные частоты элемента.

Пьезоэлектрический модуль (пьезомодуль)  $d_{ij}$  – это отношение электрического заряда  $q$ , возникающего на обкладках пьезоэлемента, к вызывающей его деформацию силе  $F$ :  $d_{ij} = \frac{q}{F}$ . Единица измерения Кл/Н. Нижние индексы в обозначении пьезомодуля указывают на взаимонаправление приложенной силы и реакции пьезоэлемента относительно поляризации кристалла (рис. 5).

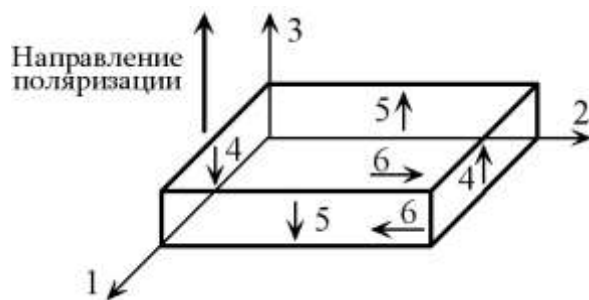


Рис. 5. Определение направлений воздействия и реакции пьезоэлемента относительно направления поляризации

Например, индексы в обозначении пьезомодуля  $d_{31}$  для прямого пьезоэффекта означают, что механическое воздействие происходило в направлении поляризации, а разность потенциалов снималась с граней, расположенных в плоскостях, перпендикулярных оси «1» рис. 5, а индексы пьезомодуля  $d_{15}$  для обратного пьезоэффекта означают, что разность потенциалов прикладывалась в направлении оси «1», а сдвиговая деформация наблюдалась по направлениям «5» рис. 5.

Коэффициент электромеханической связи  $k_{ij}$  характеризует эффективность преобразования механической энергии в электрическую или наоборот [7]:  $k_{ij} = \sqrt{\frac{W_M}{W}}$  или  $k_{ij} = \sqrt{\frac{W_3}{W}}$ , где  $W$  – энергия прикладываемая к пьезоэлементу;  $W_M, W_3$  – энергия отклика пьезоэлемента, механическая или электрическая соответственно. Коэффициент электромехани-

ческой связи, как и пьезоэлектрические модули, зависит от направления действующих сил относительно направления поляризации кристалла.

Добротность (механическая добротность) – количественная характеристика резонансных свойств колебательных систем, указывающая во сколько раз амплитуда колебаний при резонансе превышает амплитуду колебаний на граничной частоте полосы пропускания. Полоса пропускания ( $\Delta f$ ) – это область частот, на границах которого энергия колебаний системы вдвое меньше, чем энергия на резонансной частоте ( $f_0$ ). Добротность равна отношению резонансной частоты к ширине полосы пропускания [8].

Для пьезоэлектрической колебательной системы добротность можно выразить через частоты, связанные с механическим резонансом системы (резонансная частота  $f_p$ ) и с электрическим резонансом, который еще называют «антирезонансом» (антирезонансная частота  $f_a$ ):

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r z_r C_{пз} (f_a^2 - f_p^2)},$$

где  $Q_m$  – добротность;  $z_r$  – модуль комплексного сопротивления на резонансе;  $C_{пз}$  – емкость пьезоэлемента.

Модуль упругости Юнга ( $Y_{ij}$ ), характеризует податливость материала деформации. В обозначении имеет соответствующие пьезомодулю индексы.

### 3. Электрическая модель пьезоэлемента

Т.к. пьезоэлемент представляет собой электромеханическую систему, то для упрощения расчета его параметров можно провести аналогию между механическими и электрическими характеристиками материала. Для этого следует сравнить дифференциальные уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа для последовательного  $R$ - $L$ - $C$  контура, и механической колебательной системы. Первое уравнение имеет вид:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = e(t),$$

где  $L, R, C$  – электрические индуктивность, сопротивление и емкость последовательного колебательного контура;  $e(t)$  – ЭДС источника, подключенного к цепи, причем ЭДС можно выразить через напряжение:  $e(t) = u(t)$ .

Уравнение для механической колебательной системы можно записать в виде:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t),$$

где  $m, c, k$  – масса, коэффициент демпфирования и коэффициент упругости, причем,  $k = \frac{1}{\lambda}$ ,  $\lambda$  – податливость;  $x$  – смещение под действием силы  $F$ . Учитывая, что производная

по времени от перемещения есть скорость  $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ , можно переписать уравнение в виде:

$$m \frac{dv(t)}{dt} + cv(t) + \frac{1}{\lambda} \int v(t) dt = F(t).$$

Таким образом, можно провести аналогии между электрическими и механическими характеристиками системы: Напряжение  $u$  – сила  $F$ ; электрический ток  $i$  – скорость  $v$ ; индуктивность  $L$  – масса  $m$ ; электрическое сопротивление  $R$  – коэффициент демпфирования  $c$ ; емкость  $C$  – податливость  $\lambda$ . Следовательно, индуктивное сопротивление электрической системы должно быть равно инерционному сопротивлению механической, а емкостное – упругому:  $\omega L = \omega m = Z_{\text{ин}}$ ;  $\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega \lambda} = Z_{\text{упр}}$ . Электрический импеданс должен быть равен механическому:  $Z_{\text{э}} = \frac{u}{i} = \frac{F}{v} = Z_{\text{м}}$ .

С учетом того, что пьезоэлемент с электрической точки зрения представляет собой конденсатор, то, используя приведенные выше аналогии, будет корректным смоделировать электромеханическую систему пьезоэлемента в виде электрической цепи, изображенной на рис. 6.

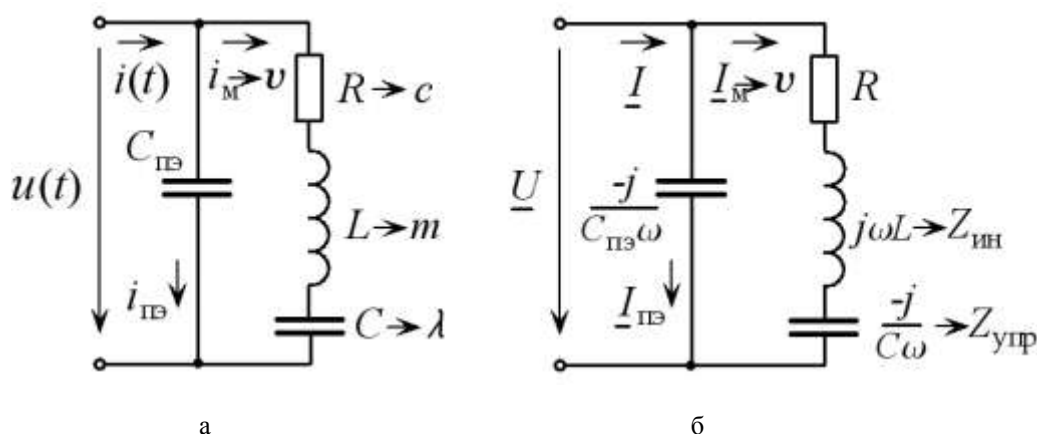


Рис. 6. Электрическая модель пьезоэлемента: а – во временной форме; б – в комплексной форме

Схема рис. 6 представляет собой сложный колебательный контур, в котором может наблюдаться резонанс токов в параллельных ветвях и резонанс напряжений (механический резонанс или антирезонанс) в последовательном колебательном контуре.

#### 4. Расчет резонансных характеристик пьезоэлемента

Расчет резонансных характеристик пьезоэлемента проведем на примере пластины цирконат титанат свинца ЦТС 842. Этот материал используется для изготовления пьезодвигателей и виброэлементов широкого назначения. Геометрические параметры пластины пьезоэлемента: ширина  $l_1 = 5$  мм; длина  $l_2 = 10$  мм; высота  $l_3 = 2$  мм. Индексы геометрических параметров соответствуют координатной сетке рис. 5.

Компания-изготовитель пьезокерамики APC International Ltd. декларирует следующие характеристики материала ЦТС 842 [9]:



- относительная диэлектрическая проницаемость  $K^T = \frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_0} = 1250$ ;
- точка Кюри [°C]  $T_c = 325$ ;
- коэффициент электромеханической связи  $k_{31} = 0.35$ ;
- пьезоэлектрический модуль [ $10^{-12}$  Кл/Н]  $d_{33} = 300$ ;  $-d_{31} = 125$ ;  $d_{15} = 480$ ;
- модуль Юнга [ $10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>]  $Y_{11} = 8.0$ ;  $Y_{33} = 6.8$ ;
- плотность [г/см<sup>3</sup>]  $\rho = 7.6$ ;
- добротность  $Q_m = 600$ .

В примечаниях к приведенным выше характеристикам пьезокерамики фирма-производитель указывает: «Значения получены на тестовых образцах и могут использоваться только справочно. На практике пьезокерамические компоненты показываются отличающиеся параметры в зависимости от толщины, конфигурации, качества и метода обработки поверхности.» [9].

Для расчета частотной характеристики пьезоэлемента, необходимо определить параметры элементов цепи рис. 6. Собственную емкость пьезоэлемента  $C_{пэ}$  можно рассчитать по формуле:

$$C_{пэ} = \frac{K^T \cdot \varepsilon_0 \cdot l1 \cdot l2}{l3} (1 - k_{31}^2),$$

где  $K^T$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная ( $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $l1 \cdot l2$  – площадь грани пьезоэлемента;  $l3$  – толщина пластины пьезоэлемента;  $k_{31}$  – коэффициент электромеханической связи. Подставляя значения параметров в формулу, рассчитаем собственную емкость пьезоэлемента:

$$C_{пэ} = \frac{1250 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} (1 - 0.35^2) = 2.43 \cdot 10^{-10} \text{ Ф.}$$

Собственная резонансная частота для пластинчатого пьезоэлемента определяется его механическими характеристиками – плотностью и упругостью:

$$\omega_0 = \frac{1.58}{l3} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho}},$$

где  $Y_{11}$  – модуль Юнга;  $\rho$  – плотность. Подставляя значения параметров в формулу, рассчитаем собственную резонансную частоту:

$$\omega_0 = \frac{1.58}{2 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{8 \cdot 10^{10}}{7.6 \cdot 10^6}} = 810522.5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Резонансная частота электромеханической системы рассчитывается с учетом коэффициента электромеханической связи:

$$\omega_p = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - k_{31}^2}} = \frac{810522.5}{\sqrt{1 - 0.35^2}} = 865249.8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Ширину полосы пропускания рассчитаем с учетом добротности  $Q_m$ :

$$\Delta\omega = \frac{\omega_p}{Q_m} = \frac{865249.8}{600} = 1442.1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Граничные частоты полосы пропускания резонансной системы ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \omega_2 - \omega_1; \\ \omega_p &= \sqrt{\omega_1\omega_2}.\end{aligned}$$

С учетом рассчитанных значений  $\Delta\omega$  и  $\omega_p$  получим  $\omega_1 = 864529.05$  рад/с;  $\omega_2 = 865971.15$  рад/с.

Для определения частотной характеристики электромеханической системы пьезоэлемента, воспользуемся электрическими аналогиями механических параметров упругой колебательной системы и схемой электрической модели пьезоэлемента рис. 6. С учетом того, что индуктивное сопротивление электрической системы должно быть равно инерционному сопротивлению механической, получим значение индуктивности последовательного колебательного контура:  $L = V\rho$ , где  $V$  – объем пластины пьезоэлемента,  $V = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3$ . Следовательно,  $L = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 7.6 \cdot 10^6 = 0.76$ . Эквивалентную электрическую  $C$  (рис. 6) рассчитаем, используя условие резонанса  $\omega_p L = \frac{1}{\omega_p C}$ :

$$C = \frac{1}{\omega_p^2 L} = \frac{1}{865249.8^2 \cdot 0.76} = 1.76 \cdot 10^{-12}.$$

Сопротивление  $R$  электрической модели рис. 6 определим из формулы добротности последовательного резонансного контура:  $Q_m = \frac{\omega_p L}{R}$ :

$$R = \frac{\omega_p L}{Q_m} = \frac{865249.8 \cdot 0.76}{600} = 1096.$$

Схема рис. 6 представляет собой сложный колебательный контур. В параллельном колебательном контуре наблюдается резонанс токов, который характеризуется минимальной электрической проводимостью системы (антирезонанс). В последовательном колебательном контуре на резонансной частоте  $\omega_p$  (частный механический резонанс системы) электрическая проводимость максимальна. Определим комплексную частотную характеристику электромеханической системы  $Y(j\omega)$  (рис. 6), где  $Y$  – электрическая проводимость:

$$Y(\omega j) = C_{\text{пз}}\omega j + \frac{1}{R + j(L\omega - 1/C\omega)} = \frac{-C_{\text{пз}}RC\omega^2 + ((C_{\text{пз}} + C)\omega - C_{\text{пз}}LC\omega^3)j}{1 - LC\omega^2 + RC\omega j}.$$

Перейдем к показательной форме записи комплексных величин:

$$\begin{aligned}Y(\omega j) &= \sqrt{\frac{(-C_{\text{пз}}RC\omega^2)^2 + ((C_{\text{пз}} + C)\omega - C_{\text{пз}}LC\omega^3)^2}{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}} e^{j(\arctg\frac{(C_{\text{пз}}+C)\omega - C_{\text{пз}}LC\omega^3}{-C_{\text{пз}}RC\omega} - \arctg\frac{RC\omega}{1-LC\omega^2})} \\ &= Y(\omega)e^{j\varphi(\omega)},\end{aligned}$$

где  $Y(\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);  $\varphi(\omega)$  – фазочастотная характеристика (ФЧХ).

Графики АЧХ и ФЧХ электромеханической системы приведены на рис. 7.

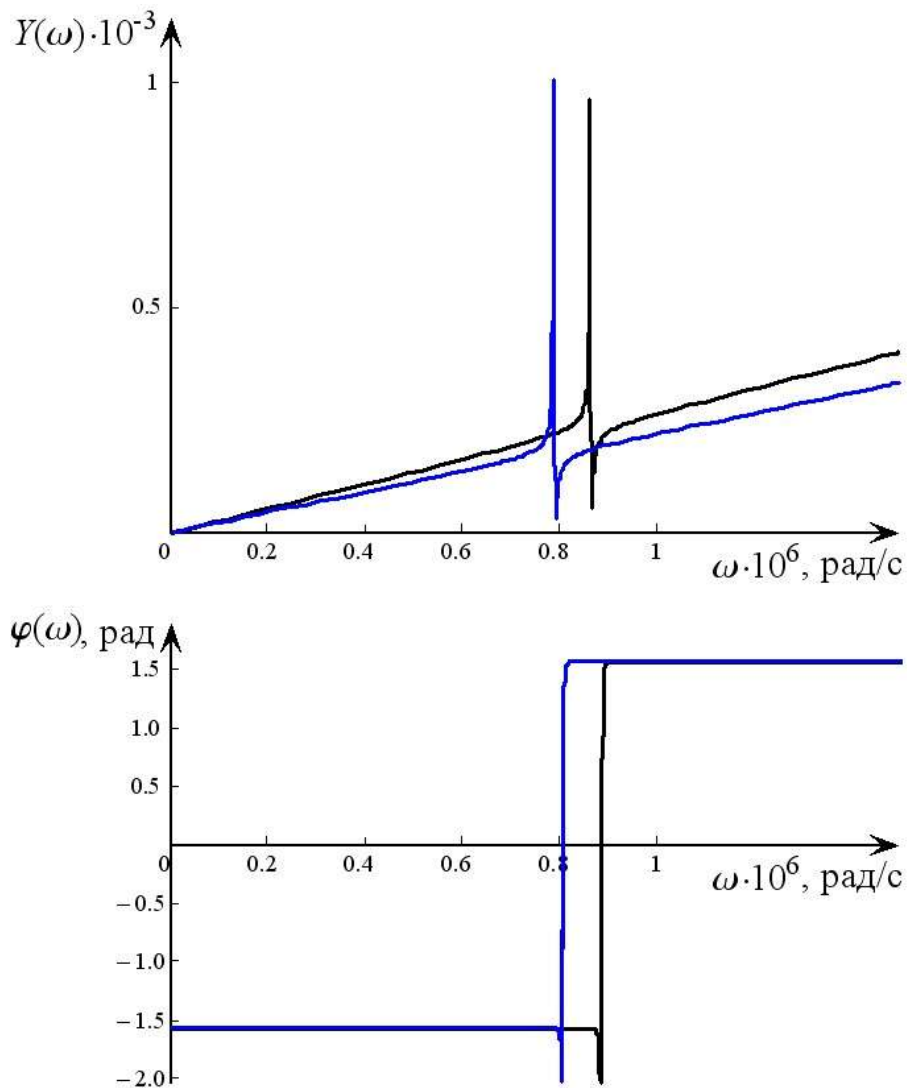


Рис. 7. АЧХ и ФЧХ электромеханической системы пьезоэлемента

На рис. 7 приведены частотные характеристики для расчетных габаритов пьезоэлемента (рис. 7 черная кривая) и при изменении толщины пластины пьезокерамики на 10% (рис. 7 синяя кривая). По графику АЧХ можно определить поведение электромеханической системы, как на частотах, приближенных к резонансным, так и на частотах, существенно отличающихся от резонансных.

## Выводы

Пьезоэлектрический эффект сегодня находит широкое применение в различных электромеханических устройствах и системах. Поэтому предсказуемость характеристик пьезоэлементов при производстве таких систем является основной задачей проектирова-

ния. Предложенный алгоритм расчета частотных характеристик пьезоэлемента позволяет на основе данных, предоставляемых фирмой-изготовителем пьезокерамики определить такие параметры пьезоэлемента заданной формы, как его резонансная и антирезонансная частоты, ширина пропускания и граничные частоты полосы пропускания. Расчет этих параметров прост, с его помощью можно построить семейство частотных характеристик для различных габаритов пьезоэлемента, что дает возможность разработчикам электромеханических систем на основе пьезоэффекта определить оптимальную конструкцию чувствительного или исполнительного элемента.

### Список литературы

1. Лавриненко В.В., Карташов И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980. 372 с.
2. Бардин В.А., Васильев В.А. Актюаторы нано- и микроперемещений для систем управления, контроля и безопасности // Современная техника и технологии. Электрон. журн. 2014. № 2. Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2014/02/3057> (дата обращения: 10.07.2016).
3. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. М.: Техносфера, 2006. 224 с. [K. Worden. Smart materials. River Edge: World Scientific, 2003].
4. Петренко С.Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. Киев: Корнійчук, 2002. 96 с.
5. Касей Г., Конвей М., Мэрфи М. Приводы для фокусировки объектива в камерных модулях высокого разрешения // Компоненты и технологии. 2008. № 3. С. 147-150. Режим доступа: [http://kit-e.ru/articles/powerel/2008\\_3](http://kit-e.ru/articles/powerel/2008_3) (дата обращения: 20.08.2016).
6. Акопьян В. А., Соловьев А. Н., Шевцов С. Н. Методы и алгоритм определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамических материалов. Ростов н/Д: Изд-во Южного Федерального ун-та, 2008. 144 с.
7. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применения. Пер. с чешск. М.: Мир, 1990. 584 с. [J. Zelenka. [Piezoelektrické rezonátory a jejich použití](#) = Piezoelectric resonators and their applications. Amst.;N.Y.: Elsevier, 1986].
8. Васильев В.А., Веремьев В.А., Тихонов А.И. Влияние частотных факторов и параметров на информативный сигнал пьезоэлектрических датчиков давления // Датчики и системы. 2003. № 8. С.5–9.
9. Symmetron Group: Электронные компоненты. Пьезокерамика APC International Ltd. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.symmetron.ru/suppliers/apc/index.shtml> (дата обращения: 08.09.2016).

10. Головнин В.А., Каплунов И.А., Малышкина О.В., Педько Б.Б. Пьезоэлектрическая керамика: применение, производство, перспективы // Вестник Тверского гос. ун-та. Сер.: Физика. 2010. № 11. С. 47 – 58.
11. Бардин В.А., Васильев В.А. Двигатели для нано- и микроперемещений // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф.(г. Пенза, 23 – 25 апреля 2013 г.) / Под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. С.259 – 263.
12. Головнин В.А., Каплунов И.А., Малышкина О.В., Педько Б.Б., Мовчикова А.А. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. М.: Техносфера, 2013. 272 с.
13. Piezoelectric ceramics: Principles and applications. Mackeyville: APC International, 2002.

## Calculating the Ultra-Sound Engine Piezoelectric Element Characteristics

S.I. Maslennikova<sup>1</sup>, A.V. Sitnikov<sup>1,\*</sup>,

[\\*sit\\_irina@mail.ru](mailto:sit_irina@mail.ru)

I.V. Mironova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Research Institute for Applied Mechanics n. a. Academician  
V.I. Kuznetsov, Moscow, Russia

---

**Keywords:** piezoelectric motor, Ultrasonic Motor (USM), the piezoelectric element, zirconate lead titanate, piezomodule, coefficient of electromechanical connection, the resonant frequency, antiresonance

---

The current trend in miniaturization of actuators for various electronic devices leads to requirement toughening for dimension and weight parameters of electric

Further reduction of the electromagnetic motor volume is no longer possible, therefore, electromechanical transducers, based on the piezoelectric effect come to the fore. Changing the piezoelectric element dimensions when exposed to an electric field (inverse piezoelectric effect) is due to failed symmetrical configuration of the electrical structure of microcrystals of piezo-ceramic material.

To transform the changing piezoelectric element dimensions into translational or rotational movement of the movable piezo-motor part are used different designs, for example those using elastically deformed elements or shock-anchoring mechanisms. Using the electrode piezoelectric systems allows us to create "walking" type engines, and the piezo-engines in which through the multi-electrode piezo-elements is formed a traveling wave whose energy is converted into rotational motion of the rotor have found wide application in focusing systems of photo- and cine-cameras.

Piezoelectric motors have a number of advantages that allow them to compete successfully with other types of electromechanical transducers. These advantages include a high efficiency, high torque retention when there is a lack of the supply voltage, the possibility to obtain low rates and micro-movements without using the mechanical gears, high volume power. However, a difficulty in calculation of the piezoelectric element in this class of motors significantly reduces their workability, resulting in a high percentage of sorting out the piezoelectric elements produced.

To calculate the piezoelectric element characteristics such as resonance and anti-resonance frequency, piezoelectric element capacity, total impedance of piezoelectric element can be used an electric model of the electromechanical system.

The paper has analyzed various construction diagrams of the piezo-engine, proposed a simple algorithm for calculating the frequency characteristics of the piezoelectric element and has given an example to calculate the plate from the piezo-ceramics of lead zirconate titanate.

## References

1. Lavrinenko V.V., Kartashov I.A., Vishnevsky V.S. *Piezoelektricheskie dvigateli* [Piezoelectric engines]. Moscow: Energiia, 1980. 372 p.
2. Bardin V.A., Vasiliev V.A. Nano- and micro- displacements actuators for the drive, control and security systems. *Sovremennaiia tekhnika i tekhnologii* [Modern technics and technologies], 2014, no.2 (In Russian).
3. Worden K. *Novye intellektualnye materialy i konstruksii* [Smart materials]. Moscow: Technosphaera, 2006. 224 p.
4. Petrenko S.F. *Piezoelektricheskij dvigatel v priborostroenii* [Piezoelectric engine instrumentation]. Kiev: Kornijchuk, 2002. 96 p.
5. Casey G., Murphy M., Conway M. Focus lens drives in the high resolution chamber modules. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2008, no.3, pp.147-150 (In Russian).
6. Akopjan V.A., Soloviev A.N., Shevtsov S.N. *Metody i algoritm opredeleniya polnogo nabora sovместимыkh konstant piezokeramicheskikh materialov* [Methods and algorithm for determining the full set of compatible material constants of piezoceramic materials]. Rostov-na-Donu: South Federal Univ. Publ., 2008. 144 p.
7. Zelenka J. *Piezoelektricheskie rezonatory na objemnyh i poverhnostnyh akusticheskikh volnah* [Piezoelectric resonators and their applications]. Moscow: Mir, 1990. 584 p.
8. Vasiliev V.A., Veremyov V.A., Tikhonov A.I. The effect of frequency factors and parameters on the informative signal of piezoelectric pressure. *Datchiki & Systemi* [Sensors & Systems], 2003, no.8, pp.5-9 (In Russian).
9. *Symmetron Group: Elektronnye komponenty. Piezokeramika APC Intern. Ltd.* [Electronic componens. Piezoceramics]. Available at: <http://www.symmetron.ru/suppliers/apc/index.shtml>, accessed 08.09.2016.
10. Golovnin V.A., Kaplunov I.A., Malyshkina O.V., Pedko B.B. Piezoelectric ceramics: applications, production, perspectives. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.:Fizika*, 2010, no.11, pp. 47-58 (In Russian).
11. Bardin V.A., Vasiliev V.A. Dvigateli dlya nano- i micro- peremeschenij [Engines for nano - and micro - displacements]. *Problemy avtomatizatsii i upravleniia v tekhnicheskikh sistemah. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenysiia*. Penza: Penza State Univ., 2013, pp.259-263.

12. Golovnin V.A., Kaplunov I.A., Malyskina O.V., Pedko B.B., Movchikova A.A. *Fizicheskie osnovy, metody issledovaniia i prakticheskoe primenenie piezomaterialov* [Physical foundations of research methods and practical application of piezomaterials]. Moscow: Technosfera, 2013. 272 p.
13. Piezoelectric ceramics: Principles and applications. Mackeyville: APC International, 2002.