

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Нуралиев Ф.М.**

Профессор, к.т.н., ТУИТ,  
ТУИТ - Ташкентский университет информационных технологий имени  
Мухаммада Аль-Хорезмия

**Тахиров Б.Н.**

докторант, БГУ  
БГУ-Бухарский государственный университет  
E-mail: [b.n.taxirov@buxdu.uz](mailto:b.n.taxirov@buxdu.uz)

### АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается история создания пьезоэлектриков, их свойства, математическое моделирование пьезоэлектриков, устройство пьезоэлектрических датчиков, принцип действия и схемы подключения.

### ABSTRACT

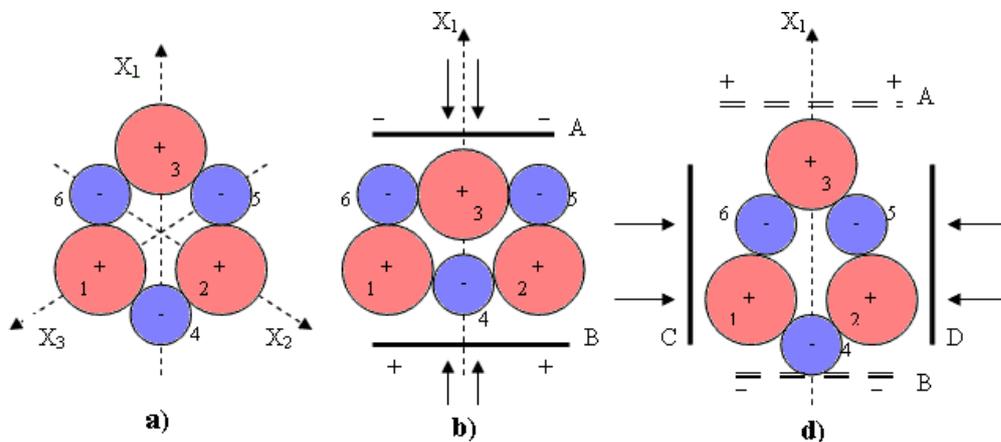
This article discusses the history of the creation of piezoelectrics, their properties, mathematical modeling of piezoelectrics, the device of piezoelectric sensors, the principle of operation and wiring diagrams.

Пьезоэлектрический по-гречески пьезо означает создание электрических зарядов путем сжатия. Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на способности некоторых кристаллических веществ генерировать электрический заряд под действием механической силы. Это явление называется пьезоэффектом. Пьер Кюри открыл пьезоэлектрический эффект в 1880 году, но только в 1950-х годах производители начали применять пьезоэлектрический эффект в промышленных чувствительных приложениях. Пьезоэффект наблюдается в кристаллах кварца, турмалина, сегнетовой соли, титаната бария и других веществ. В этих типах инструментов часто используется кварц. Пьезоэлектрический эффект кварца не зависит от температуры до  $+500^{\circ}\text{C}$ , но при температуре выше  $+570^{\circ}\text{C}$  этот эффект остается нулевым. Пьезоэлектрический датчик относится к датчикам генераторного типа, где величина входа (ускорение, напряжение, давление), величина выхода-величина тока.

В пьезоэлектрических датчиках в результате внешнего воздействия возникают электрические заряды, имеющие определенную полярность из-за растяжения и сжатия кристаллических веществ. Причиной пьезоэлектрического эффекта является смещение состояния электрического и механического равновесия кристалла диэлектрика под действием внешних воздействий.

Решетки кристаллического вещества не деформируются и электрически нейтральны, если на кристаллическое вещество не передается внешнее механическое воздействие. Кристаллическое вещество деформируется, если на него передается внешнее механическое воздействие, т. е. приводит к относительному смещению атомов (ионов) кристаллического вещества и деформации электронных оболочек. В результате возникают ионы и электронная поляризация. Но в большинстве кристаллов явление поляризации не происходит из-за пространственной симметрии центральной симметрии.

Пьезоэлектрический эффект может быть создан только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Примерный обзор появления пьезоэлектрического эффекта можно сделать, например, с помощью кристаллов кварца. Распределение зарядов в пьезоэлектрических покрытиях показано на (рис. 1).



**Рисунок 1. Распределение зарядов в пьезоэлектрических покрытиях**

Обозначения:

- 1, 2, 3-положительные ионы кремния;
- 4, 5, 6-отрицательные ионы кислорода;
- X1, X2, X3-оси симметрии.

В молекулярной связи, представленной на (рис.1В), если механическое действие передается вдоль полярной оси X1, то Ион кремния 3 и Ион кислорода 4 образуют связь между окружающими их боковыми ионами. Это приводит к отрицательным зарядам в плоскости А и положительным зарядам в плоскости В.

При сжатии в направлении, перпендикулярном  $X_1$  в (рис.1), ионы кремния получают одинаковые противоположно направленные сдвиги заряженных частиц 1 и 2. Ионы кислорода 5 и 6 ведут себя одинаково. При этом симметрия ячейки относительно плоскости, проходящей через середину между плоскостями С и D, сохраняется, и заряды в этих плоскостях не возникают. При этом Ион кремния 3 и Ион кислорода 4 смещаются наружу, из-за чего в плоскости а возникают положительные заряды, а в плоскости В-отрицательные (это поперечный пьезоэлектрический эффект). Из рассмотренной модели следует, что замена сжатия напряжением приводит к распределению электрических зарядов, а поляризация прямо пропорциональна деформации кристалла. Когда к пьезоматериалу прикладывается давление или ускорение, на краях кристалла создается эквивалентное количество электрического заряда. Электрический заряд будет линейно связан с давлением, передаваемым извне. Пьезоэлектрический датчик нельзя использовать для измерения статического давления. При постоянном давлении выход будет равен нулю. Работу пьезоэлектрического датчика можно резюмировать следующим образом. В пьезоэлектрическом кристалле заряды четко сбалансированы и расположены в асимметричном порядке. Эффекты зарядов компенсируют друг друга, и поэтому чистый заряд не обнаруживается на кристаллических поверхностях.

При внешнем переносе на кристалл и сжатии равновесие между зарядами в кристалле нарушается. Следовательно, эффект заряда не компенсируется взаимно, что приводит к появлению чистого положительного и отрицательного заряда на противоположных гранях кристалла. Поэтому при сжатии кристалла на противоположной стороне создается напряжение, которое называется пьезоэлектрическим.

Вычисляем такие параметры, как перераспределение зарядов в покрытиях при передаче внешнего воздействия на пьезоэлектрический кристалл, а также изменение емкости покрытий и напряжения между ними.

1) Количество перераспределяемого заряда в пьезокристаллическом покрытии

$$q = K_0 * F_x \quad (\text{Кл/Н}) \quad (1)$$

$K_0$  – пьезоэлектрическая постоянная;

$F_x$  – сила.

2) Емкость одной пластины

$$C_0 = 0.89 \frac{\epsilon_r * S_x}{d} = 0.89 \frac{\epsilon_r * \pi * D^2}{4 * d} = 0.89 \frac{\epsilon_r * \pi ab}{4 * d} \quad (\text{пФ}) \quad (2)$$

$C_0$  - емкость одной пластины ;

$\varepsilon_r$  - диэлектрическая проницаемость;

D – диаметр пластины;

a и b – стороны пластины (прямоугольник);

d – толщина пластины.

3) Напряжение между слоями

$$U = \frac{10^{12} * n * q}{C_k + n * C_0} = \frac{q * 10^{12}}{C_k / n + C_0} \quad (\text{V}) \quad (3)$$

$C_k$  - измеряемая емкость цепи

n – количество пластин;

4) Чувствительность датчика

$$S_d = \frac{U}{F_x} \quad (\text{V/N}) \quad (4)$$

$S_d$  – чувствительность датчика

Этот эффект можно увидеть в кварцевых часах. В повседневной работе наручные часы используют кварцевый резонатор, который работает как генератор. Используемый элемент-диоксид кремния. Когда на кристалл подается электрический сигнал, Кристалл вибрирует, что помогает периодически регулировать движение внутри часов. Пьезозуммер также является хорошим примером. В этом случае на кристалл подается определенное напряжение со значениями величины и частоты, которое заставляет кристалл вибрировать. Вибрация превращается в звук.

### Пьезоэлектрический манометр

Принцип действия пьезоэлектрических манометров основан на способности некоторых кристаллических веществ генерировать электрический заряд под действием механической силы. Это явление называется пьезоэффектом. Пьезоэлектрические датчики используются для измерения динамического давления. Измерение динамического давления измерение турбулентности и т. д. При измерении давления в цилиндрах двигателя изменение давления жидкостей и газов можно измерить с помощью пьезорезистивных датчиков давления. Когда пьезоэлектрик воздействует на силу диафрагмы, он создает электрический заряд на краях кристалла. С другой стороны, выходной сигнал генерирует напряжение, пропорциональное давлению.

Электрический заряд, возникающий на поверхностях кристаллической пластины под действием силы F, определяется этим уравнением:

$$Q = K_p \cdot F \quad (4)$$

здесь,  $K_p$  — пьезоэлектрическая постоянная, Кл/н.  $K_p$  значение не зависит от размера пластины и определяется природой кристалла. Для кварца

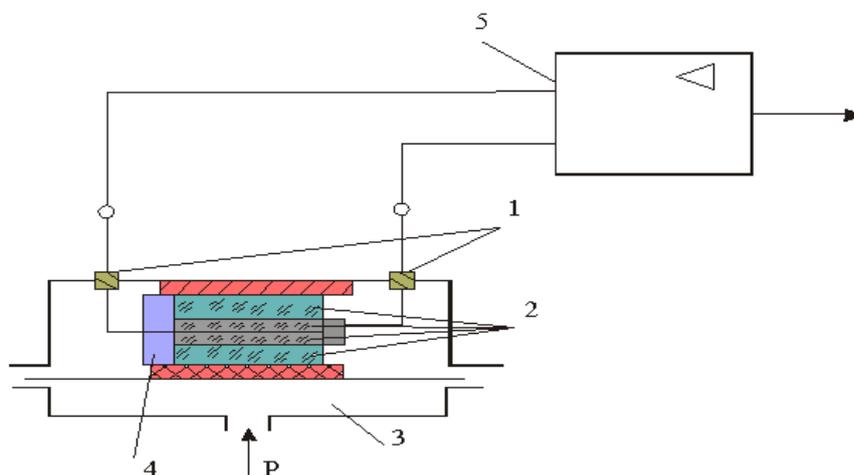
$$K_p = 2,1 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/н.}$$

На рисунке 2 показана схема пьезоэлектрического манометра. Измеряемое давление преобразуется мембраной 4 в силу, которая заставляет колонны кварцевых пластин диаметром 5 мм и толщиной 1 мм 2 сжиматься. Возникающий электрический заряд  $Q$  1 через выходы передается на электронный усилитель 5 с большим входным сопротивлением (1013 ом). Значение заряда связано с измеряемым давлением  $R$  следующим образом:

$$Q = K_p \cdot S \cdot P \quad (4)$$

здесь,  $S$  — эффективная поверхность мембраны.

Размер камеры 3 сведен к минимуму, чтобы уменьшить инерцию



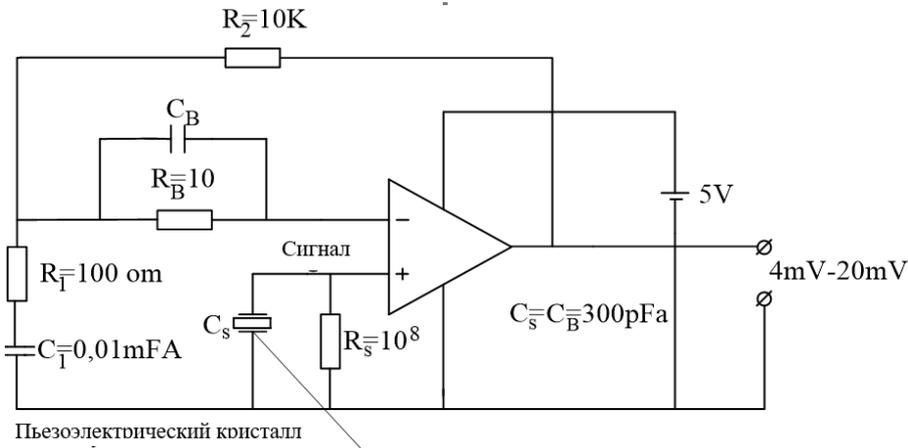
инструмента.

### Рисунок 2. Схема пьезоэлектрического манометра

Пьезокварцевые манометры, позволяющие измерять давление до 100 мПа (1000 кг / см<sup>2</sup>), широко используются при измерении быстро меняющихся давлений. Преимуществом пьезоэффекта является его инерционность. Эти приборы очень удобны при изучении процессов, в которых быстро изменяется давление (кавитация, взрыв). Класс точности пьезоэлектрических манометров 1,5; 2,0.

На рисунке ниже мы знакомимся с внутренней структурной принципиальной схемой электронного усилителя 5. Пьезоэлектрический манометр используется для контроля давления. Поэтому воспринимаемое внешнее давление необходимо и необходимо преобразовать в унифицирующий сигнал. Для этого нам понадобится передатчик пьезоэлектрического датчика. Обычно передатчик служит для передачи унифицированного(унифицированного) сигнала с преобразованием 4 мВ-20 мВ.

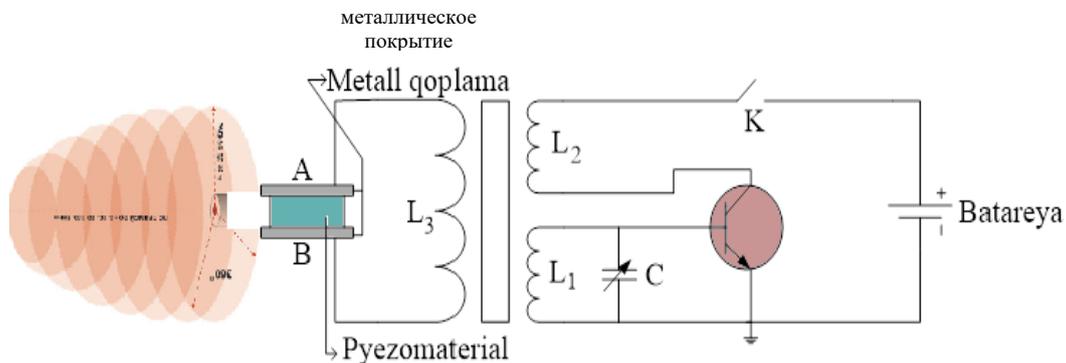
На представленном рисунке 3 рассмотрим принципиальную электрическую схему электронного усилителя.



**Рисунок 3. Принципиальная электрическая схема электронного усилителя.**

### Пьезоэлектрический ультразвуковой проводник

Ультразвуковой пьезопроводник работает по принципу обратного пьезоэлектрического эффекта. При воздействии ультразвукового проводника на пьезоэлектрический материал он деформируется пропорционально заряду. Схема ультразвукового проводника показана ниже на рисунке 2.



**Рисунок 2. Пьезоэлектрический ультразвуковой проводник**

Здесь кристалл кварца помещается между двумя металлическими оболочками А и В, подключенными к первичной обмотке трансформатора L3. Основная часть трансформатора, то есть изменение параметров первичной обмотки, зависит от изменения сопротивления кристалла кварца. L1 и L2, составляющие вторичную часть трансформатора, подключены к транзистору через переменную емкость.

Когда батарея включена, генератор генерирует высокочастотные импульсы переменного напряжения с частотой  $f = 1 \div (2\pi\sqrt{L_1C_1})$ . По этой причине в L3 создается электромагнитная индукция, которая через покрытия А и В передается на кристалл кварца, благодаря обратному пьезоэлектрическому эффекту Кристалл начинает сжиматься и генерировать механические колебания.

Резонанс возникает, когда частота электронного генератора равна собственной частоте кварца. В этот момент кварц генерирует ультразвуковые волны большой амплитуды.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной статье рассматривается история создания пьезоэлектриков, их свойства, математическое моделирование пьезоэлектриков, устройство пьезоэлектрических датчиков, принцип действия и схемы подключения.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ: (REFERENCES)**

- [1] Ван, Ю., Чжан, Л. и Ли, Х. (2015). Математическое моделирование процессов электроупругости в тонких телах. Журнал прикладной механики, 82 (11), 111001.
- [2] Сандер, Э. А., и Аксак, Б. (2014). Достижения в области методов математического моделирования электромеханически активных структур. Журнал прикладной физики, 115 (23), 231301.
- [3] Ф.М. Нуралиев. Математическое моделирование влияния электромагнитных полей на деформированное состояние тонких электропроводящих тел методом г-функций // Узбекский журнал "Проблемы вычислительной и прикладной математики" № 1 2016 - С. 23-28.
- [4] Нуралиев Ф.М. Описание модулей программного комплекса для расчета магнитоупругости пластин и оболочек сложной формы // Вестник ТУИТ. - Ташкент, 2014. - № 2 (30). - С. 110-113.