

# Лекция №10

## Пьезоэлектрические преобразователи

**Пьезопреобразователи** – электромеханические преобразователи, принцип действия которых основан на пьезоэлектрическом эффекте – явлении возникновения электрической поляризации под действием механических напряжений:

- прямой пьезоэффект или эффект Кюри;
- обратный пьезоэффект, эффект Джоуля.

Для изготовления пьезопреобразователей используют следующие классы анизотропных материалов:

- анизотропные кристаллы естественного происхождения;
- синтетические кристаллы: сегнетова соль, ниобат лития;
- поляризованные поликристаллические сегнетоэлектрики (пьезокерамика типа ЦТС – цирконат-титанат свинца);
- пьезополимерные пленки ПВДФ.

# Пьезоэлектрические преобразователи

- Пьезоэлектрические свойства преобразователей характеризуют константами, связывающими механические величины: напряжение  $T$  и деформацию  $S$  с электрическими: напряженностью электрического поля  $E$  и электрической индукцией  $D$
- Система уравнений, описывающих работу пьезопреобразователя, должна включать:
  - уравнение движения упругой среды;
  - уравнения, связывающие механические напряжения и деформации;
  - уравнения для прямого и обратного пьезоэффектов.
- Так как все пьезоэлектрики существенно анизотропны, их свойства зависят от направления относительно кристаллических осей, поэтому для описания свойств пьезоэлектрических материалов используют тензорные представления теории электроупругости.

# Пьезоэлектрические преобразователи

- Тензор деформаций, как и тензор напряжений, характеризуется девятью компонентами, представимыми в форме матрицы:

$$S_{ik} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_1 & S_6 & S_5 \\ S_6 & S_2 & S_4 \\ S_5 & S_4 & S_3 \end{vmatrix}$$

Вторая запись матрицы  $S$  учитывающая равенство компонент  $S_{21} = S_{12}$ ,  $S_{31} = S_{13}$ ,  $S_{32} = S_{23}$  более удобна, в ней компоненты  $S_1, S_2, S_3$  соответствуют линейным деформациям растяжения – сжатия, а компоненты  $S_4, S_5, S_6$  – сдвиговым деформациям.

- Такая же запись используется и для тензора напряжений, записываемого в виде условного 6-мерного вектора  $\sigma_{ik} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6)$ , где первые три компоненты соответствуют нормальным напряжениям, а три вторые – сдвиговым.

# Пьезоэлектрические преобразователи

- Упругие свойства пьезоэлектриков описываются законом

Гука:

$$T_i = \sum_{k=1}^6 c_{ik} S_k ,$$

где коэффициенты  $c_{ik}$  – константы упругости, общее число которых из-за формализации сокращается до 36.

- Диэлектрические свойства кристаллов выражаются тензором диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ik}$ , связывающим между собой компоненты векторов индукции и напряженности электрического поля в пьезоэлектрике:

$$D_i = \sum_{k=1}^3 \varepsilon_{ik} E_k .$$

Отметим, что значения компонент тензора зависят от условий механического нагружения пьезоэлемента.

# Пьезоэлектрические преобразователи

## ***Пьезоэлектрические константы:***

1. Пьезоконстанта давления  $g_{ik}$  связывающая напряженность электрического поля  $E_i$  с величиной механического напряжения  $T_k$

$$E_i = \sum_{k=1}^6 g_{ik} T_k = g_{ik} T_k, \quad i = 1, 2, 3.$$

Размерность константы  $[g_{ik}] = (\text{Н} \cdot \text{м}) / \text{В}$ . Индекс  $i$  характеризует направление ориентации электрического поля, а индекс  $k$  направление воздействия механических напряжений, причем для нормальных напряжений в направлении пространственных осей используют индексы 1, 2, 3, а для сдвиговых в тех же направлениях – индексы 4, 5, 6.

# Пьезоэлектрические преобразователи

## ***Пьезоэлектрические константы:***

2. Пьезоконстанта деформации  $h_{ik}$  определяющая величину напряженности электрического поля при единичной деформации пьезоэлемента:

$$E_i = h_{ik} S_k, \quad i = 1, 2, 3; \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

Размерность  $[h_{ik}] = \text{В} \cdot \text{м} / \text{Н}$ .

3. Пьезомодуль  $d_{ik}$ , дающий величину деформации пьезоэлемента в направлении  $i$ , вызванной электрическим полем единичной напряженности в направлении  $k$

$$S_i = d_{ik} E_k, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \quad k = 1, 2, 3.$$

Размерность  $[d_{ik}] = \text{м} / \text{В}$ .

# Пьезоэлектрические преобразователи

## **Пьезоэлектрические константы:**

4. Пьезоэлектрическая константа  $e_{ik}$  характеризующая механические напряжения в пьезоэлементе при возбуждении в нем электрического поля единичной напряженности (размерность  $[E_{tk}] \text{ В/м} (\cdot)$ ):

$$T_i = e_{ik} E_k, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \quad k = 1, 2, 3.$$

Существуют еще четыре соотношения, из которых могут быть определены пьезоэлектрические константы. Так,

пьезомодуль  $d_{ik}$  является коэффициентом пропорциональности между электрической индукцией  $D_i$  механическим напряжением  $T_k$  соответственно с уравнением, описывающим прямой пьезоэффект:

$$D_i = d_{ik} T_k.$$

# Пьезоэлектрические преобразователи

## **Важнейшие характеристики пьезоэлементов:**

1. Частотная постоянная  $K_f$  численно равной половине скорости звука в материале преобразователя:

$$K_{\text{фв}} = lf_r = /2.$$

2. Коэффициент электромеханической связи  $K_{\text{эм}}$  характеризующий эффективность преобразования электрической энергии в механическую и обратно.
3. Температура Кюри, при нагреве выше которой пьезоэлектрические свойства преобразователей исчезают.
4. Скорость звука в материале датчика, определяемая константами упругости и плотностью материала;
5. Относительная диэлектрическая проницаемость материала пьезодатчика  $\epsilon_{\text{отн}} = \epsilon_{ik}^T / \epsilon_0$ , определяющая его собственную емкость.

# Пьезоэлектрические преобразователи

- Пьезоэлементы из разных материалов, имеющие простую геометрическую форму (пластина, диск, стержень), определенным образом ориентированы относительно осей, условно обозначаемых цифрами 1, 2, 3. Пластина кварца, например, вырезается так, что ось кристалла (ось 1) совпадает с ее толщиной (кварц среза).
- Пластина керамики ЦТС изготавливается так, что ось поляризации (ось  $Z$ , ось 3) ориентирована перпендикулярно граням, на которые нанесены электроды, и тоже совпадает с толщиной пластины.
- Если при определенных типах колебаний преобразователей ориентация механических напряжений и электрических полей совпадает, соответственно совпадают и индексы  $i$  и  $j$  в соотношениях для пьезоконстант.

# Пьезоэлектрические преобразователи

Прямой пьезоэффект для кварцевой пластины  $X$  – среза, деформируемой по толщине, в статическом режиме описывается выражением:

$$u_1 = E_1 h = g_{11} h T_1,$$

где  $u_1$  – разность потенциалов, возникающая на электродах;  
 $E_1$  – напряженность электрического поля в пластине;  
 $h$  – толщина пластины;  $T_1$  – механическое напряжение, деформирующее пластину;  $g_{11}$  – пьезоэлектрическая константа давления кварца.

Величина деформации в пьезокерамической пластине из пьезокерамики типа ЦТС толщиной  $h$  при прикладывании внешней разности потенциалов  $u$  определится из выражения:

$$S_3 = d_{33} E_3 = d_{33} \frac{u_3}{h}$$