



### 3. Электромагнитные ЧЭ

Принцип действия основан на том, что в измеряемый параметр (например, перемещение) «вовлекается» один из элементов магнитного контура ЧЭ (обычно индуктивность).

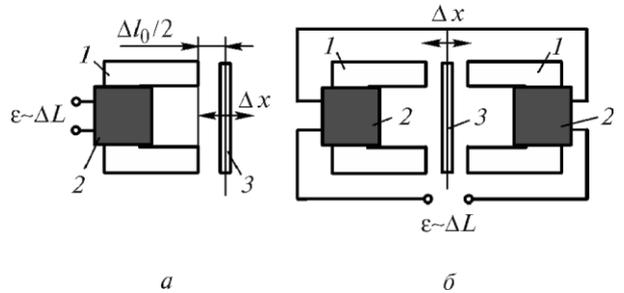
#### Классификация



Основным электромагнитным ЧЭ является **катушка индуктивности** — соленоид — винтовая или спиральная катушка из свёрнутого изолированного проводника, обладающая значительной индуктивностью при относительно малой ёмкости и малом активном сопротивлении.

**Индуктивность**  $L$  дросселя с числом витков  $N$  катушки, магнитным сопротивлением  $R_\mu$  и относительной магнитной проницаемостью  $\mu$  сердечника вычисляют по формуле:

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} \quad (1)$$



Вид **функции преобразования** ЧЭ зависит от того, какой из параметров является информативным: если изменяется площадь  $s$  зазора, то функция **линейна**, если его длина  $l$ , то нет. Как правило, оба эти параметра зависят от перемещения сердечника  $x$

Электромагнитные ЧЭ можно включать по **дроссельной** и **трансформаторной** схемам.

При построении электромагнитных датчиков наиболее часто используют два подхода:

- индуктивный
- индукционный.

В расчетах используют упрощенную формулу:

$$L \approx \frac{\mu N^2 S}{l} \quad (2)$$

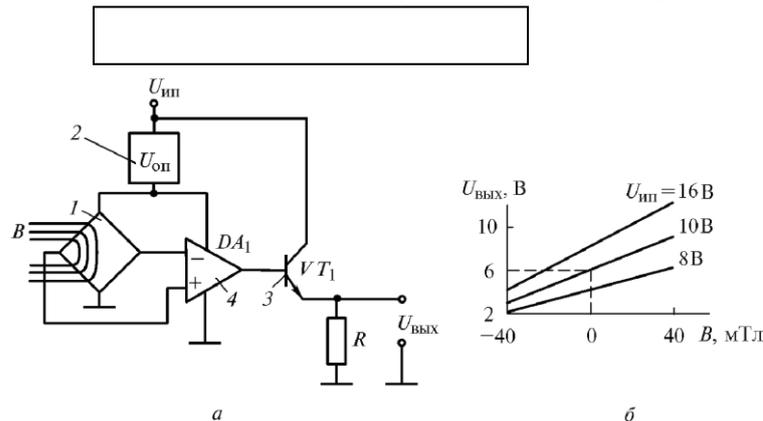
Существенное уменьшение погрешности, вызванной нелинейностью  $\Delta L(\Delta x)$ , достигается при **дифференциальной** (встречной) схеме включения двух одинаковых катушек

Дифференциальная схема соединения ЧЭ

Функция преобразования

### 4. Преобразователи Холла

**Эффект Холла** основан на взаимодействии между движущимися носителями электрического заряда и **внешним магнитным** полем. Выходным сигналом **преобразователя Холла** является напряжение Холла  $U_x$ , которое возникает в случае, если через находящийся в магнитном поле кристалл протекает опорный ток  $I_{оп}$ :



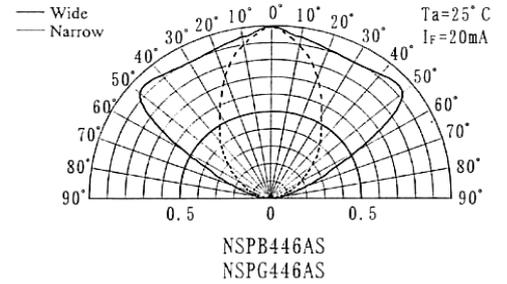
Обычно преобразователи Холла выполняют в виде интегральных микросхем. Датчик, содержащий преобразователь Холла, относится к классу **генераторных**.

## 5. Оптические ЧЭ

В качестве оптических ЧЭ чаще всего используют оптронные пары светоизлучатель — фотоэлемент.

### Излучатели

Температурные (*a*) и временные (*b*) характеристики лампы накаливания (*I*) и светодиода



**Люминесценция** представляет собой нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения.

Энергия излучаемого фотона  $W$  зависит от длины волны излучения  $\lambda$ :

$$W = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж с — постоянная Планка,  $c$  — скорость света в среде.

**Диаграмма направленности** характеризует зависимость мощности излучения  $P$  от его направления  $r$  (или угла  $\theta$ ):



### Фотоприемники

Действие приемников света, основано на внешнем и внутреннем фотоэффекте.

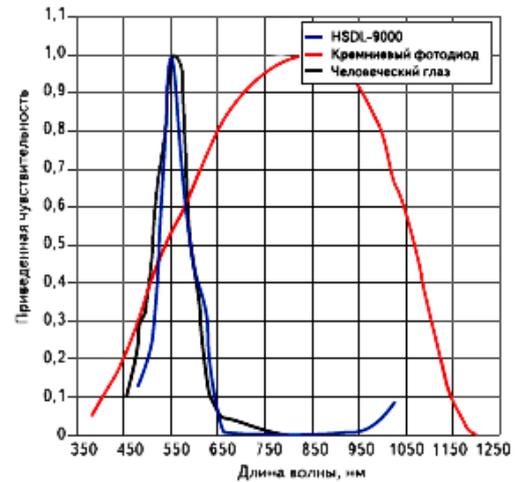
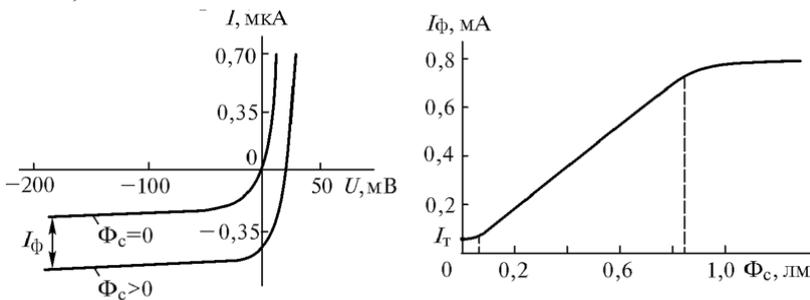
### Классификация



**Функция преобразования** фотоприемника имеет вид:

$$I_{\Phi} = S_{\Phi} \cdot \Phi_c$$

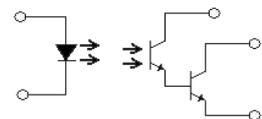
где  $S_{\Phi}$  — чувствительность фотоприемника, А/лм,  $\Phi_c$  — световой поток, лм.



Фотодиод может работать в **двух режимах**:

- фотогоальваническом (без внешнего источника напряжения);
- фотодиодном (с внешним обратным напряжением).

### Пример построения навигационного датчика



Электрическая схема датчика

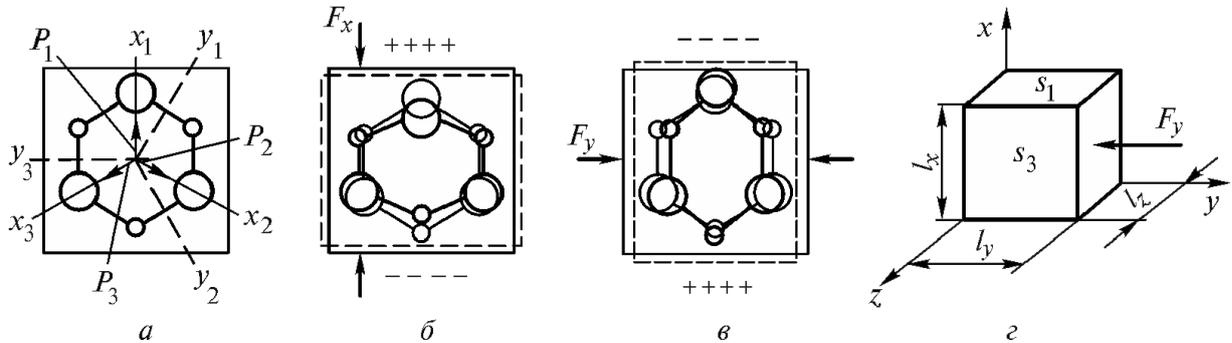
## 6. Пьезоэлектрические ЧЭ

**Пьезоэлектрическим** называется эффект **поляризации** анизотропного диэлектрика под действием механического напряжения или возникновения в нем механических деформаций под действием электрического поля. В первом случае говорят о **прямом** пьезоэффекте, во втором — об **обратном**.

### Исходная модель

Рассмотрим упрощенную модель пьезоэффекта на примере **кварца**. Элементарная кристаллическая ячейка состоит из трех молекул  $\text{SiO}_2$ , которые, группируясь по две, образуют гексагональную структуру.

Кристалл имеет срезы вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ .



При напряженном состоянии материала ЧЭ заряды принципиально могут возникать между **тремя** парами граней. Это означает, что поляризационный заряд  $\mathbf{Q}$  является вектором и описывается тремя компонентами:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{pmatrix}$$

где  $\mathbf{q}$  — плотность заряда;  $s$  — площадь грани ячейки;  $\mathbf{D}$  — матрица пьезомодулей;  $\boldsymbol{\sigma}$  — вектор напряженного состояния.

### Пример расчета ЧЭ

Для каждой компоненты вектора  $\mathbf{q}$  справедливо:

$$q_i = \sum_{j,k} d_{ijk} \sigma_j$$

Особенностью **поперечного** пьезоэффекта является возможность **увеличения** заряда путем выбора **относительных размеров** пьезоэлемента, т. е. длин ребер  $l_x, l_y$

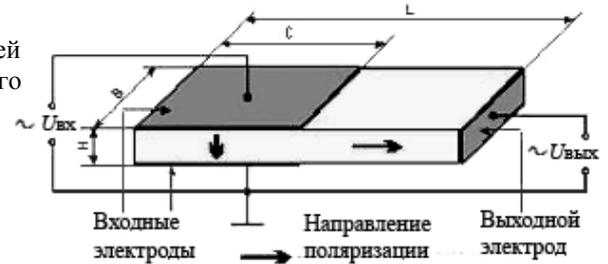
$$Q = q \cdot l_x \cdot l_y$$

### Пьезоэлектрический трансформатор

В ЧЭ, построенном по схеме **пьезоэлектрического трансформатора** используют **одновременно** прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.

При действии на пьезоэлектрический трансформатор внешней силы  $F$  возникает деформация кристалла и изменяется частота его собственных механических колебаний  $f_c$ , пропорционально приложенной силе:

$$\Delta f_c = f_p - f$$



где  $\Delta f_c = f_p - f$  и  $f_p$  — резонансная частота ЧЭ,  $L$  — длина ЧЭ,  $C$  и  $\rho$  — жесткость и плотность материала ЧЭ.

### Пример включения пьезодатчика

