

Часть 2

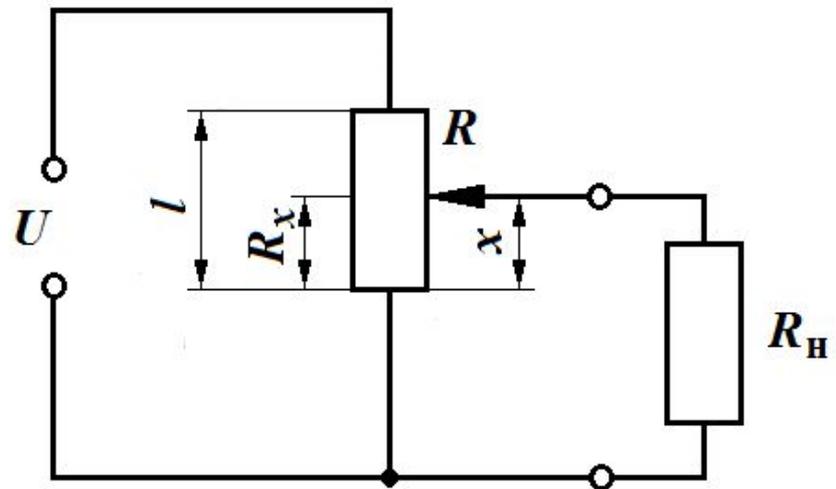
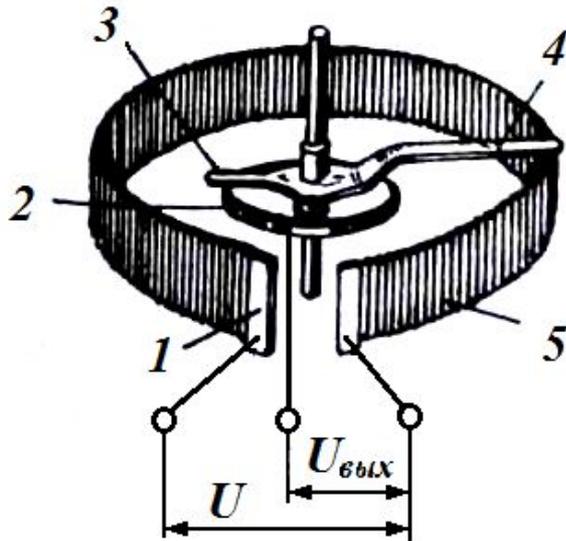
Первичные измерительные преобразователи

- **Измерительный преобразователь (ИП)** — техническое устройство, предназначенное для преобразования одной физической величины в другую, функционально с ней связанную.
- **Первичный измерительный преобразователь** — ИП, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина. Первичный ИП является первым преобразователем в измерительной цепи.
- **Промежуточный измерительный преобразователь** — ИП, занимающий место в измерительной цепи после первичного преобразователя.
- **Датчик** — конструктивно обособленная совокупность ряда ИП, размещенная непосредственно у объекта управления

ГОСТ 26.011-80 «Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные»

Сигналы постоянного напряжения		Сигналы постоянного тока	
Диапазон, В	Сопротивление нагрузки, не менее, Ом	Диапазон, мА	Сопротивление нагрузки, не более, Ом (в скобках – для СИА на ИМС)
0...5	1000	0...5	2500 (2000)
1...5	1000	-5...+5	2500 (2000)
0...10	2000	0...20	1000 (500)
-10...+10	2000	4...20	1000 (500)

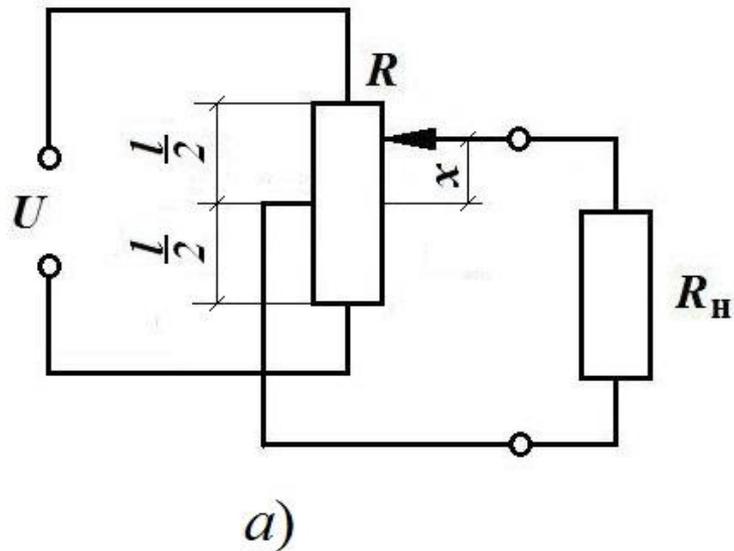
Простейший потенциометрический преобразователь



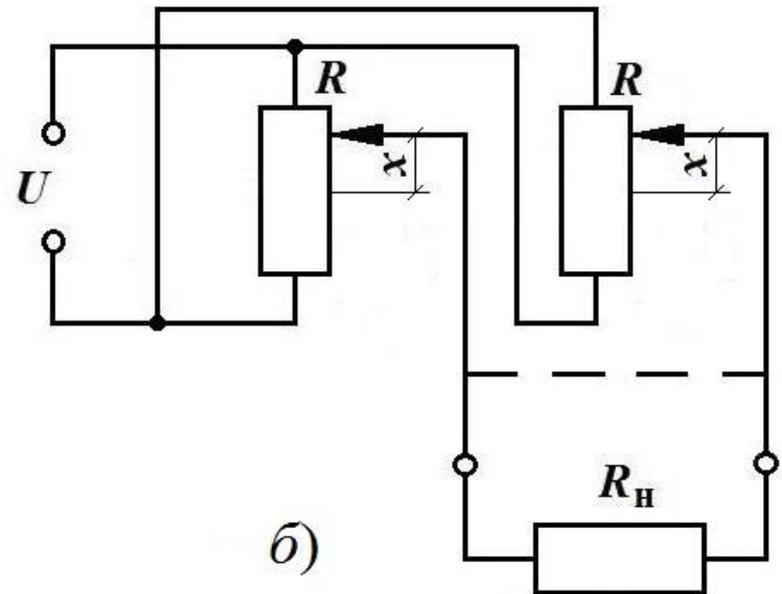
В режиме холостого хода $U_{\text{вых}} = U \frac{R_x}{R}$.

При равномерной намотке $R_x = R \frac{x}{l}$. Тогда $U_{\text{вых}} = U \frac{x}{l}$.

Реверсивные потенциометрические преобразователи



$$U_{\text{вых}} = U \frac{x}{l}$$



$$U_{\text{вых}} = 2U \frac{x}{l}$$

Тензорезисторные преобразователи

Закон Гука:
$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E},$$

где ε_l — относительная продольная деформация;

l — длина проводника;

Δl — изменение длины в результате деформации;

σ — механическое напряжение в проводнике;

E — модуль упругости (механическая х-ка материала).

Относительная поперечная деформация проводника

$$\varepsilon_n = -\varepsilon_l / \mu,$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Сопротивление тензорезистора

Активное сопротивление проводника

$$R = \rho l / S.$$

Изменение сопротивления проводника:

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho$$

Относительное изменение сопротивления

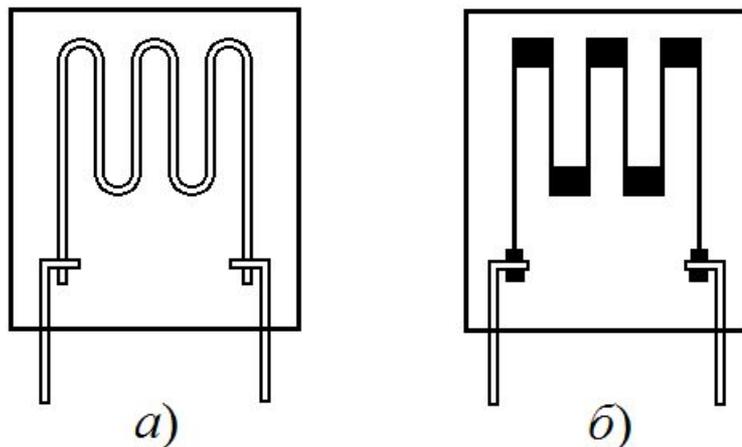
$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Тензоэффект характеризуется коэффициентом тензочувствительности:

$$k_T = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = 1 - \frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_l} + \frac{\varepsilon_\rho}{\varepsilon_l}$$

Для металлов и ряда сплавов (константан, нихром) k_T близок к 2.

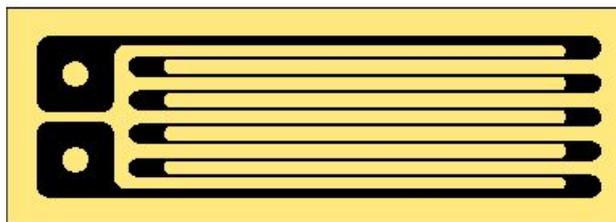
Конструкция тензорезисторов



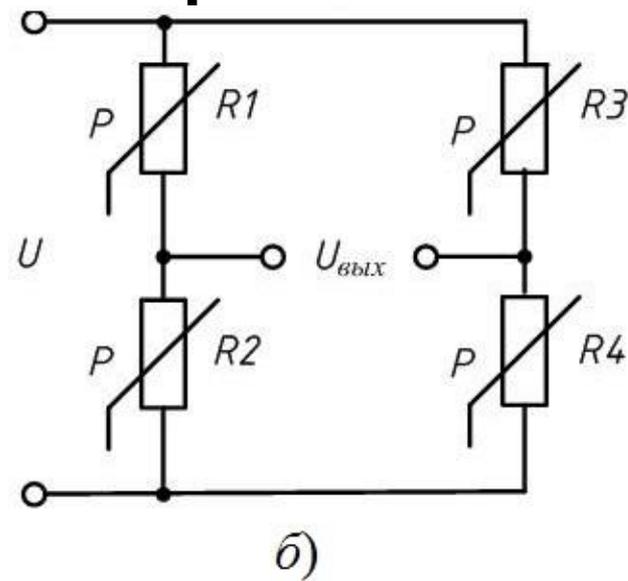
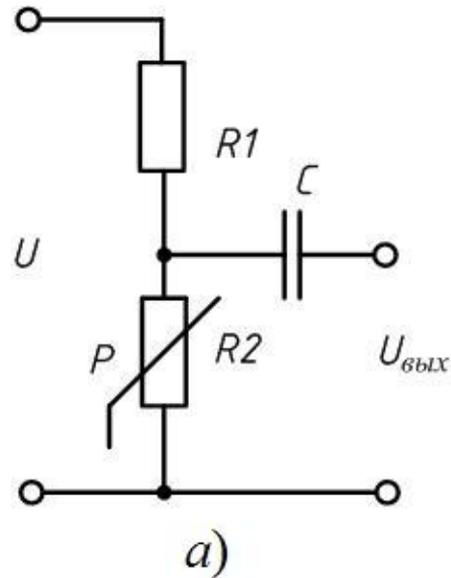
а – проволочный, б – фольговый

zakatayrukava.ru

$R = 150 \text{ Ом}$



Схемы включения тензорезисторов:



а) – потенциометрическая, б) – мостовая

Термопреобразователи сопротивления

Принцип действия основан на изменении электрического сопротивления материала при изменении температуры.

Используемые материалы для проводниковых ТС:

Металл	ТКС, 1/°C	Диапазон температур, ° C (рекомендова н)	Особенности
Платина	0,0039	-196 ... 600	Высокая точность и стабильность. Высокое удельное сопротивление. Высокая линейность.
Никель	0,0067	-60 ... 180	Наиболее высокий ТКС
Медь	0,0043	-50 ... 150	Наиболее линейная характеристика, низкое

Зависимость сопротивления от температуры:

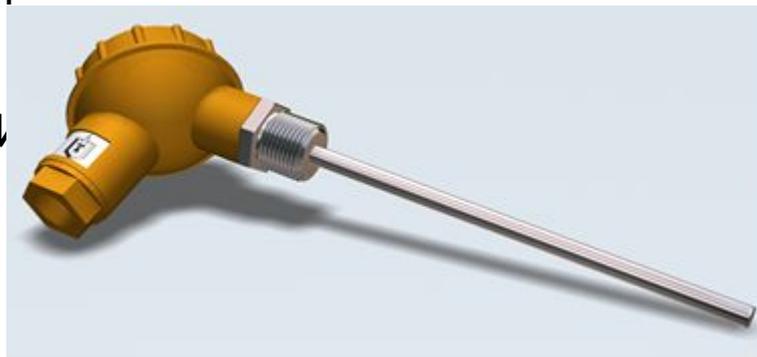
$$R = R_0(1 + \alpha \Theta + \beta \Theta^2 + \gamma \Theta^3 + \dots),$$

где R_0 – сопротивление проводника при начальной температуре;

Θ – перегрев проводника относительно начальной температуры;

$\alpha, \beta, \gamma, \dots$ – коэффициенты, зависящие от свойств проводника.

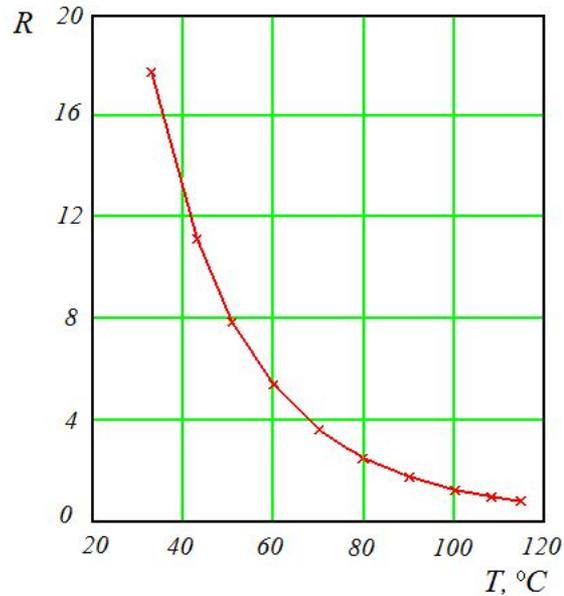
Конструкти



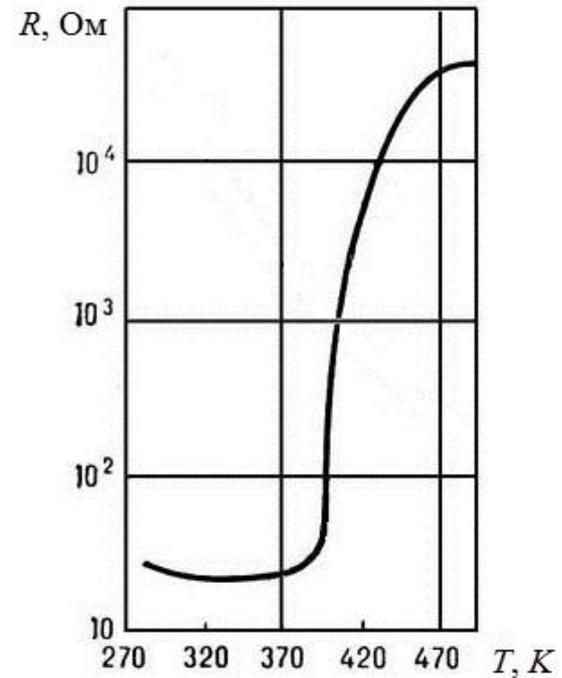
Термисторы

ТКС < 0

$$T = \frac{1}{a_0 + a_1 \ln R + a_2 (\ln R)^2}$$

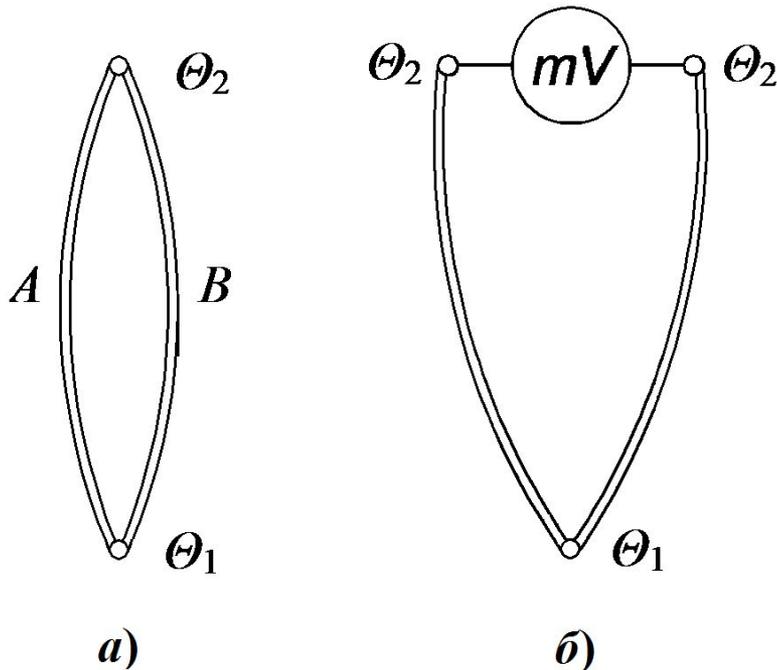


ТКС >> 0 (позистор)



Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Термоэлектрические цепи



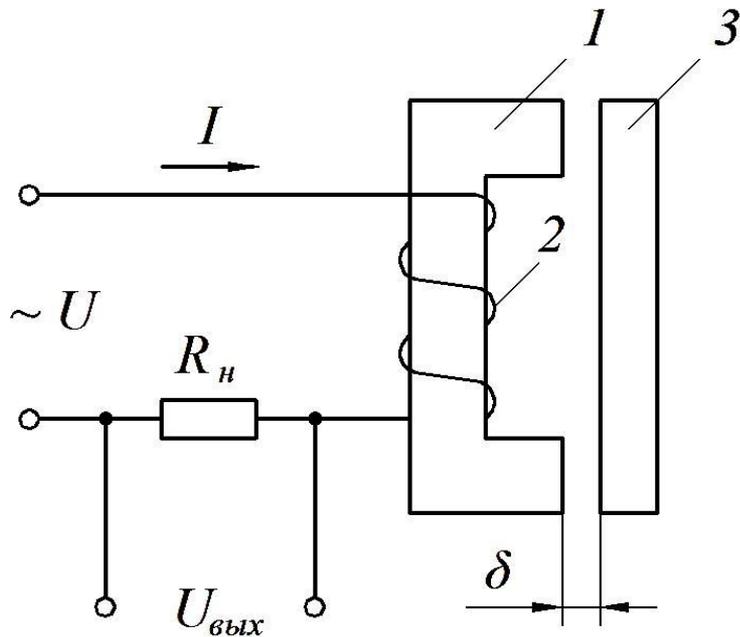
Наиболее распространенные термопары:

- хромель-копелевые (тип ТХК)
- хромель-алюмелевые (тип ТХА)

- Хромель:
89% Ni + 10% Cr + примеси.
- Копель:
56% Cu + 44% Ni.
- Алюмель:
94% Ni + 2% Al + 2,5% Mn + 1% Si + примеси

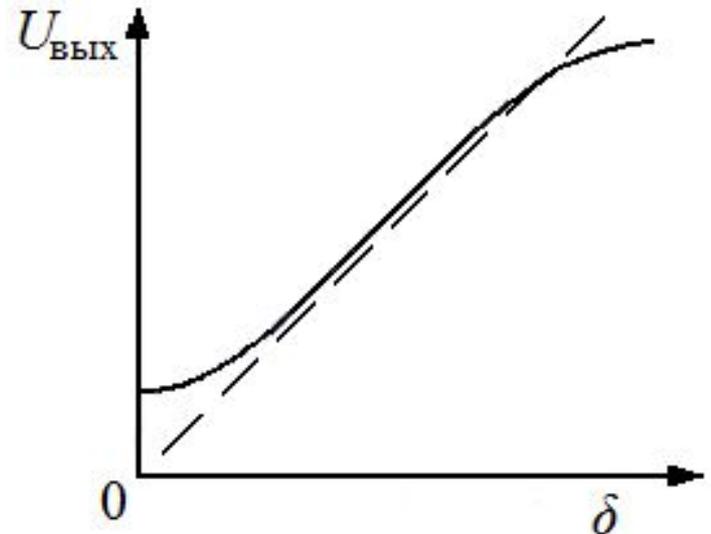
Индуктивные преобразователи перемещения

Простейший индуктивный
преобразователь

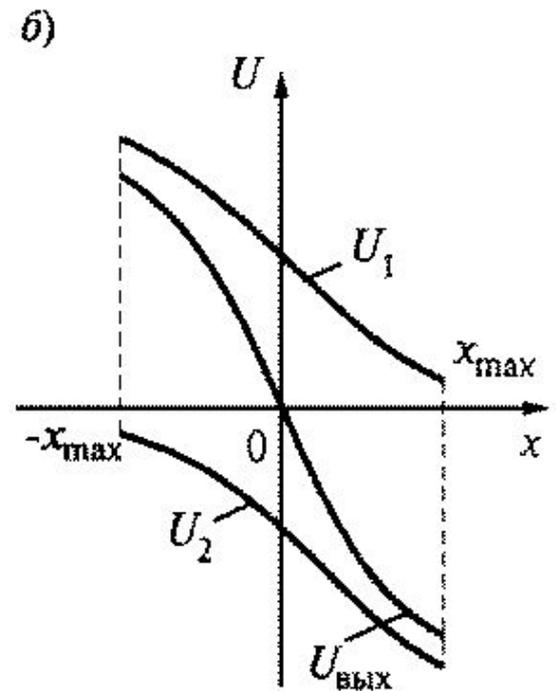
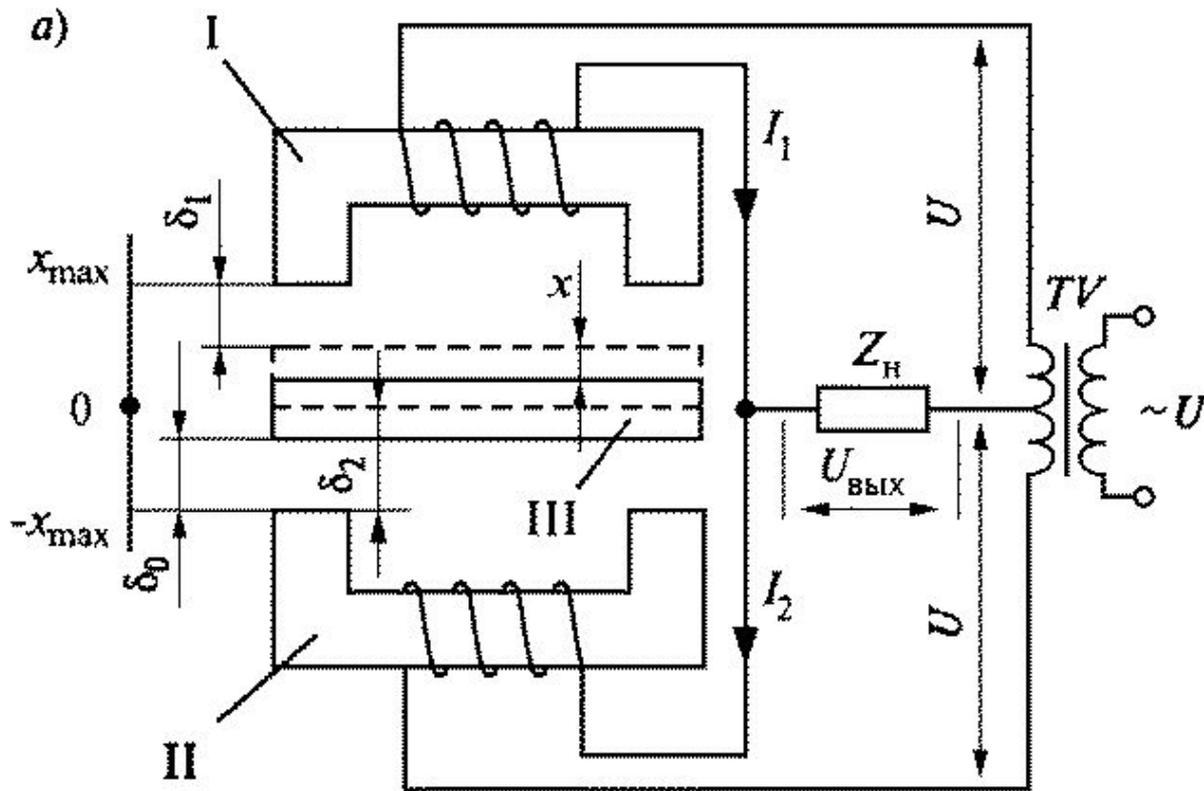


$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{2UR_H\delta}{\mu_0\omega w^2 S}$$

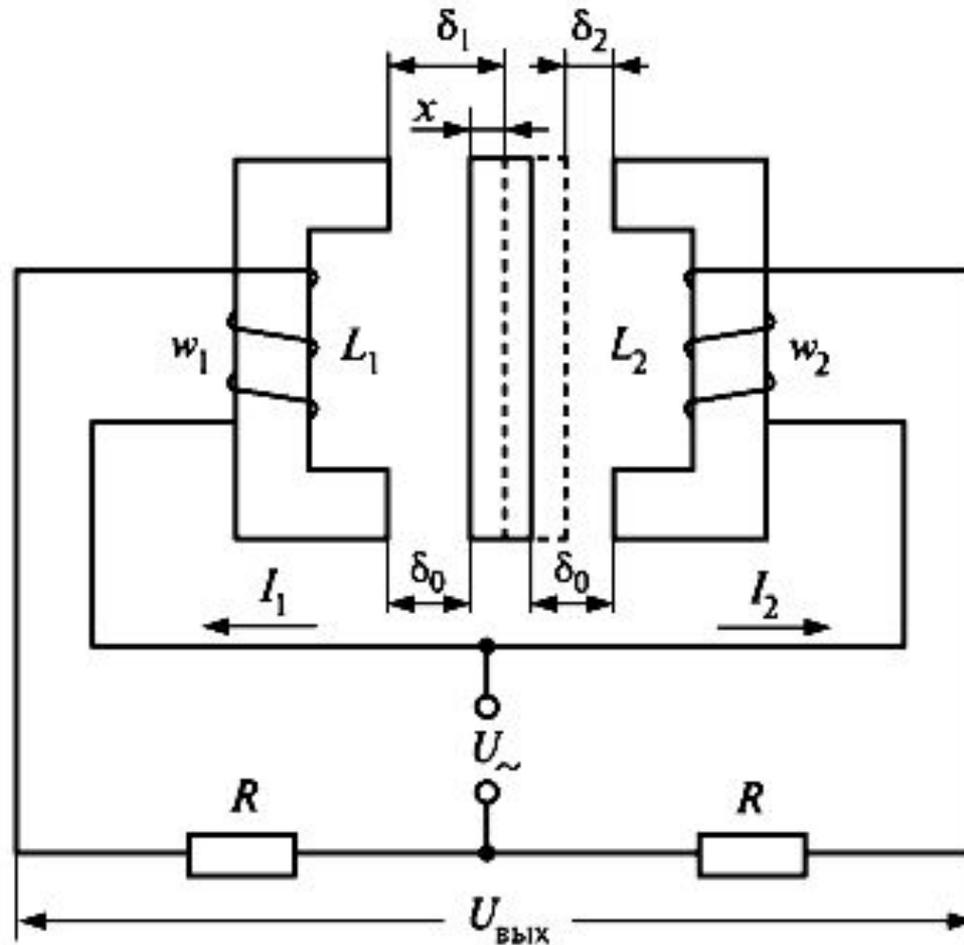
Статическая характеристика
индуктивного
преобразователя



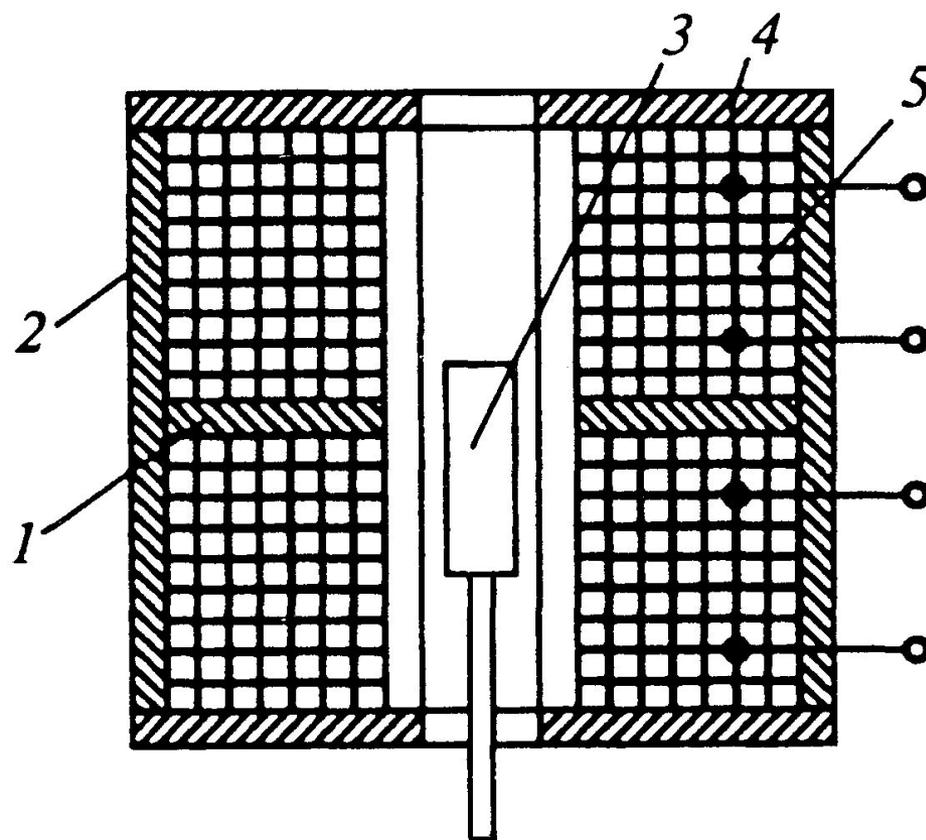
Дифференциальный реверсивный индуктивный преобразователь



Мостовой реверсивный индуктивный преобразователь

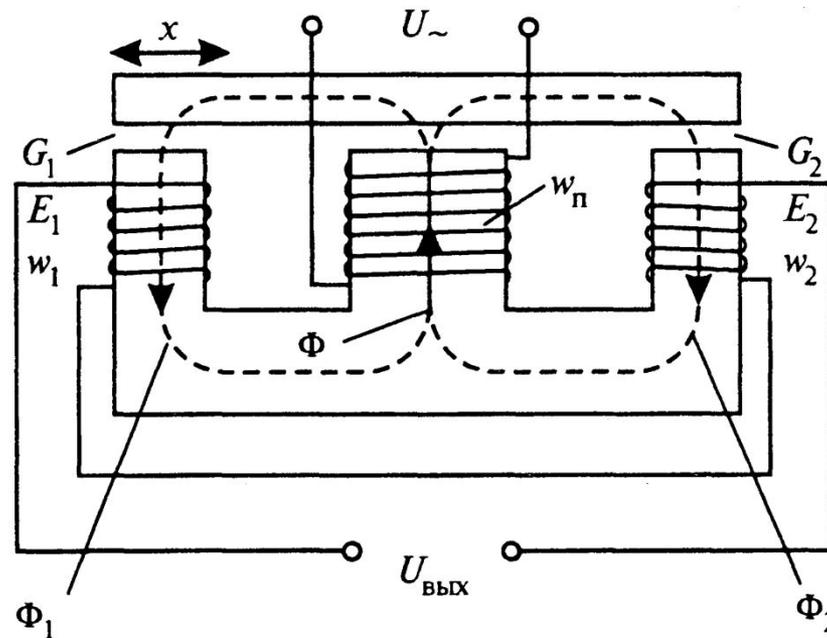


Цилиндрический реверсивный индуктивный преобразователь



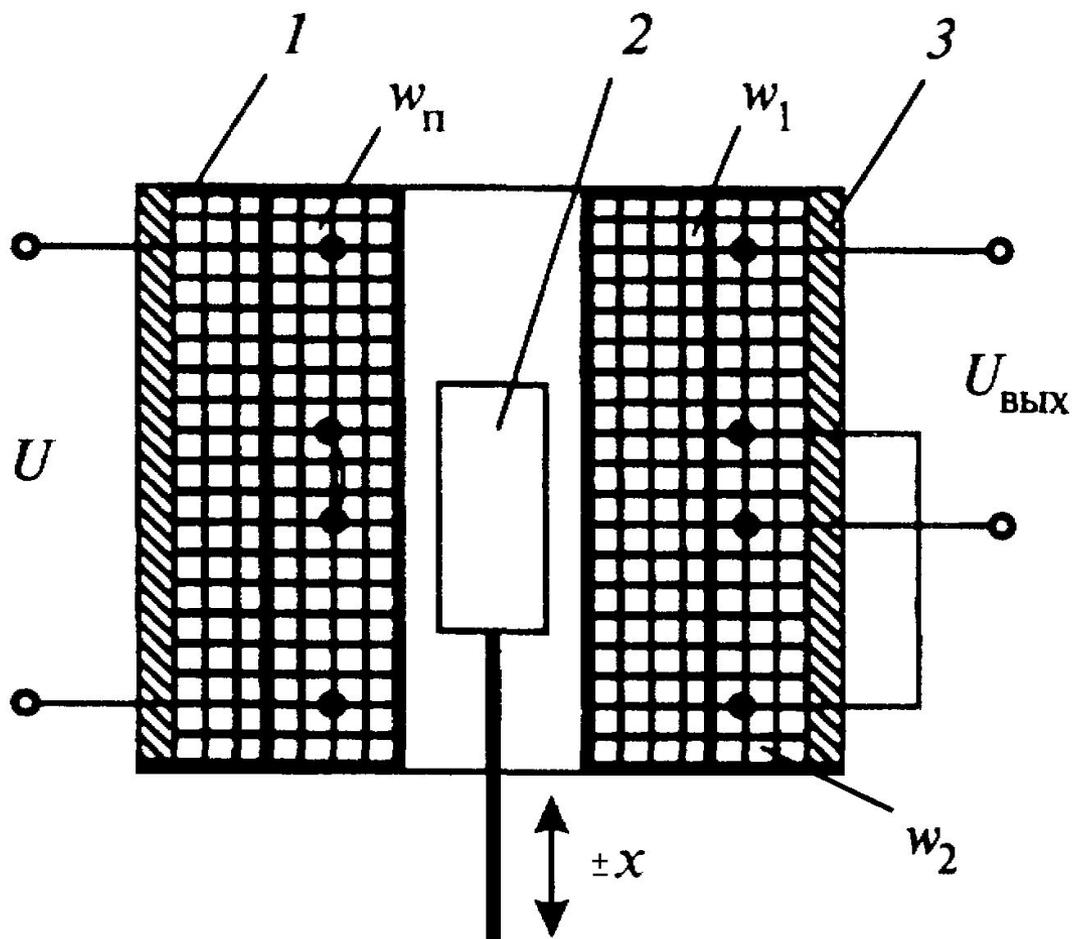
Трансформаторные преобразователи

Плоский дифференциально-трансформаторный преобразователь



$$U_{\text{ВЫХ}} = E_1 - E_2 = 4,44 f (w_1 \Phi_{1m} - w_2 \Phi_{2m}) = 4,44 f w (\Phi_{1m} - \Phi_{2m})$$

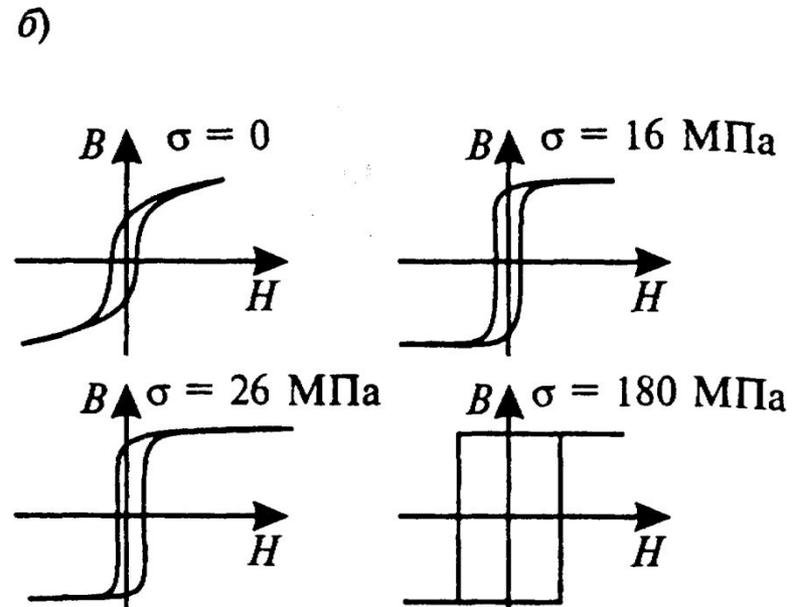
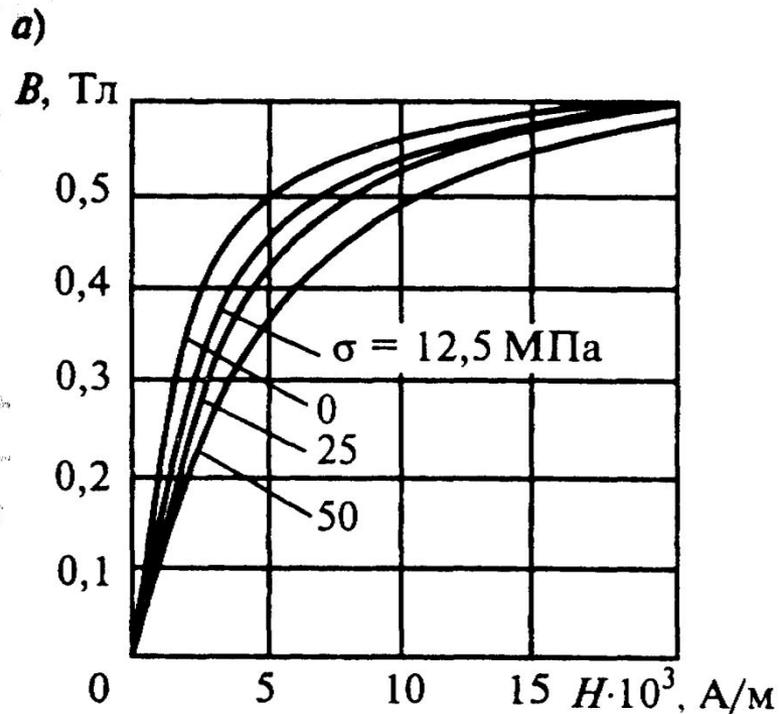
Цилиндрический дифференциально-трансформаторный преобразователь



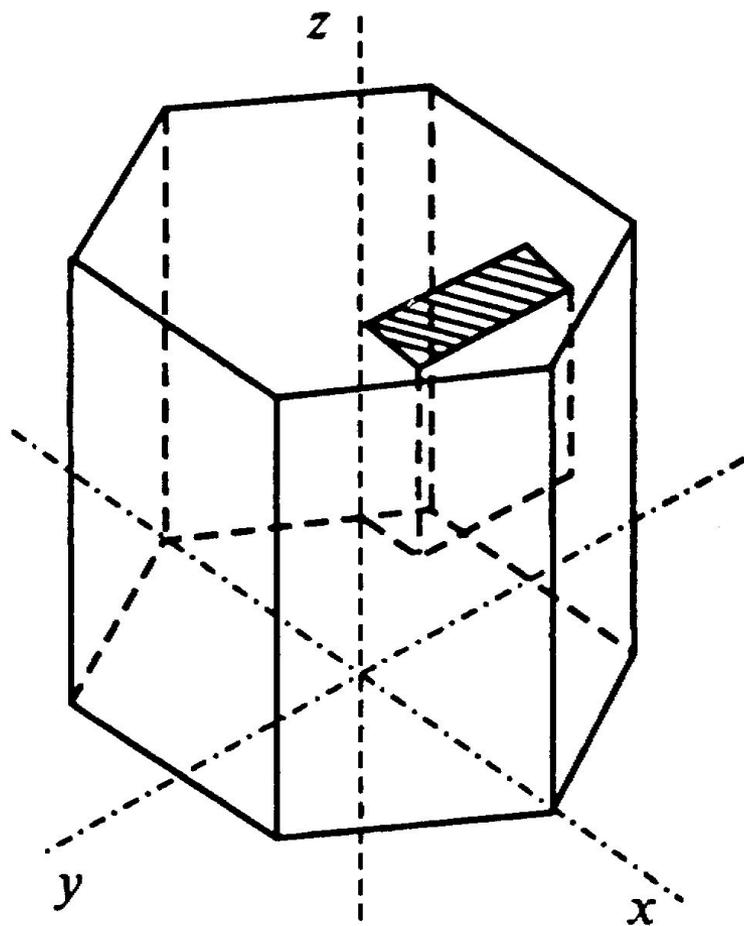
Магнитоупругие преобразователи

Зависимость кривой намагничивания
от механических напряжений

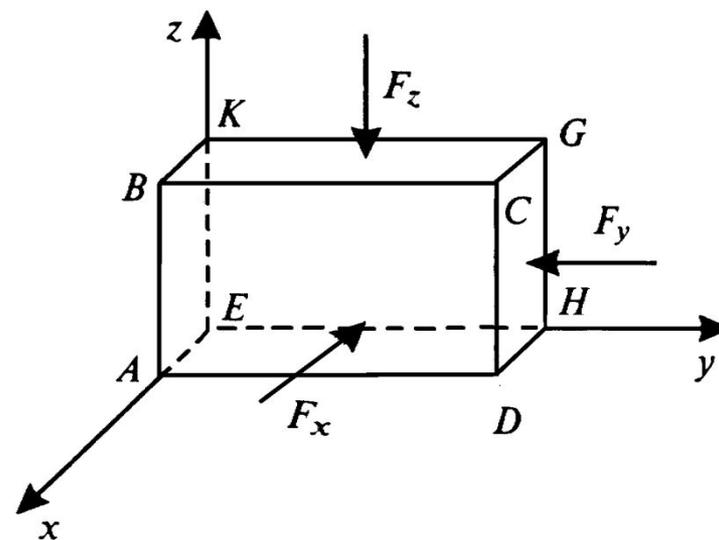
а) – никель; б) – пермаллой



Пьезоэлектрические преобразователи



Кристалл кварца



Пьезочувствительный элемент

Электрические заряды, возникающие на гранях $ABCD$ и $EKGN$ при действии силы F_x

$$q_x = k_{\Pi} F_x$$

Напряжение между гранями пьезочувствительного элемента при отсутствии нагрузки в первый момент после приложения силы F_x

$$U = q_x / C,$$

где $C = C_{\Pi} + C_{\text{Н}}$

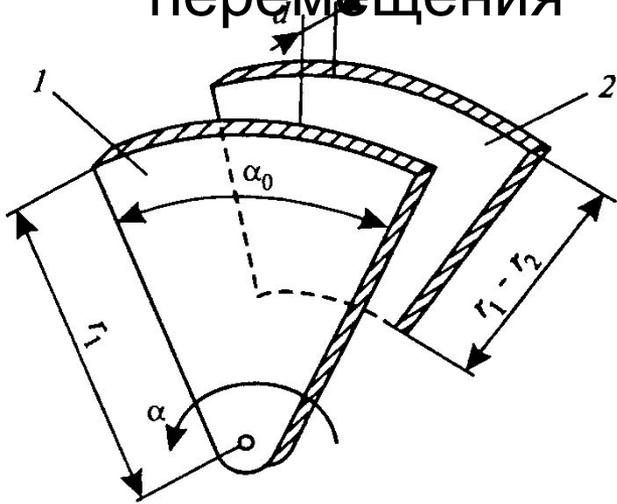
Таким образом, $U_{\text{ВЫХ}}$ выходное напряжение при $t = 0$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{k_{\Pi} F_x}{C_{\Pi} + C_{\text{Н}}}$$

Емкостные преобразователи

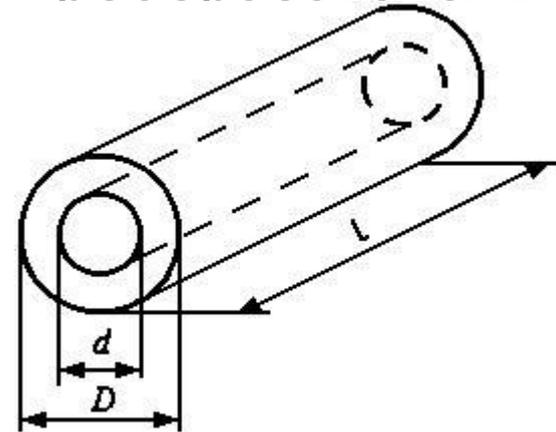
Емкость плоскостного конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$

Емкостной преобразователь углового перемещения



$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (r_2^2 - r_1^2)}{2d} (\alpha_0 - \alpha)$$

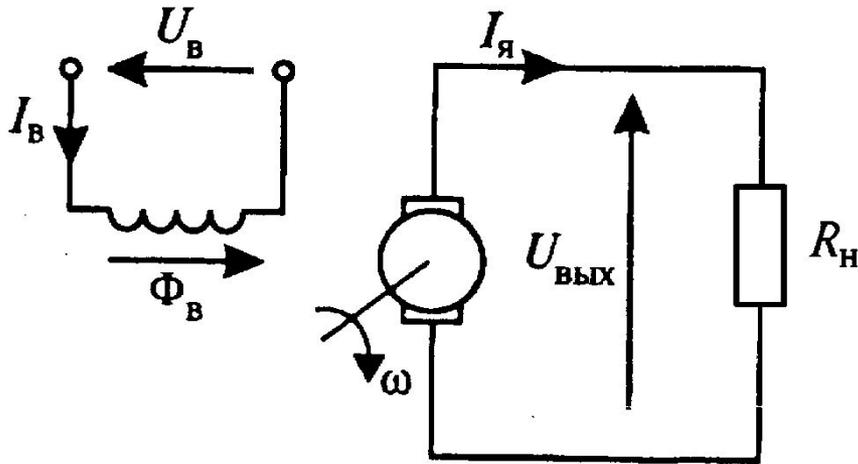
Цилиндрический емкостной преобразователь



$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}$$

Тахогенераторы

Тахогенератор постоянного тока



Уравнение якорной цепи

$$U_{\text{ВЫХ}} = E - I_я R_{\text{я.ц}},$$

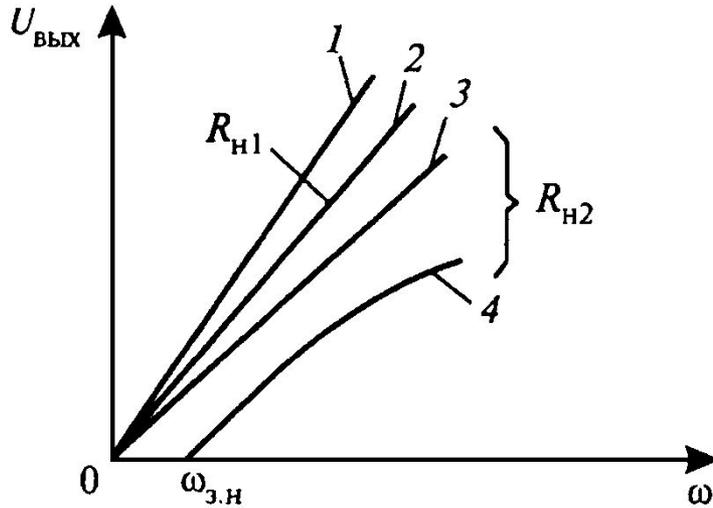
где $E = c_e \Phi \omega$ – ЭДС тахогенератора;

$I_я = U_{\text{ВЫХ}} / R_H$ – ток якоря

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{c_e \Phi \omega}{1 + \frac{R_{\text{я.ц}}}{R_H}}$$

Отсюда

Статические характеристики тахогенератора постоянного тока



Получаем:

$$T_{я} \frac{du_{\text{вых}}}{dt} + u_{\text{вых}} = k_{\text{мг}} \omega \quad \text{или}$$

Передаточная функция

$$W_{\omega}(p) = \frac{k_{\text{мг}}}{1 + T_{я} p} \quad \text{или} \quad W_{\alpha}(p) = \frac{k_{\text{мг}} p}{1 + T_{я} p}$$

Динамические характеристики тахогенератора постоянного тока

Уравнение динамики:

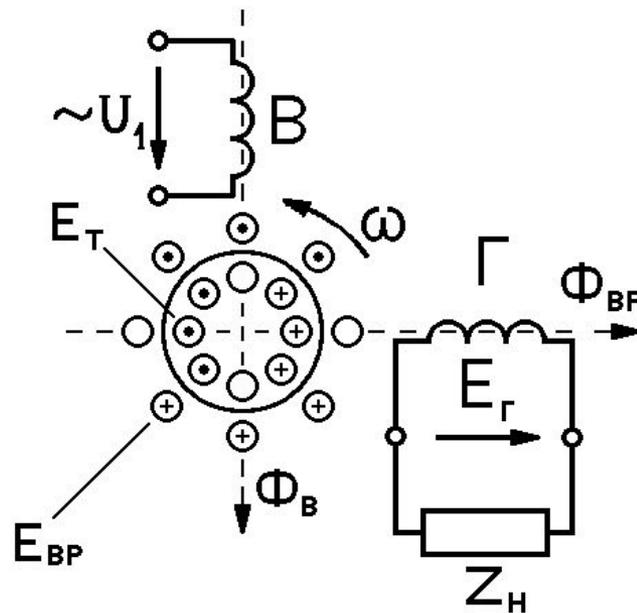
$$u_{\text{вых}} = e - L_{я} \frac{di_{я}}{dt} - i_{я} R_{я.ц}$$

Подставляем e и $i_{я}$.

Вводим обозначения:

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я.ц} + R_{н}}; \quad k_{\text{мг}} = \frac{R_{н} c_e \Phi}{R_{я.ц} + R_{н}}$$

Асинхронный тахогенератор



Величина ЭДС вращения:

$$E_{вр} = k_1 \omega \Phi_B$$

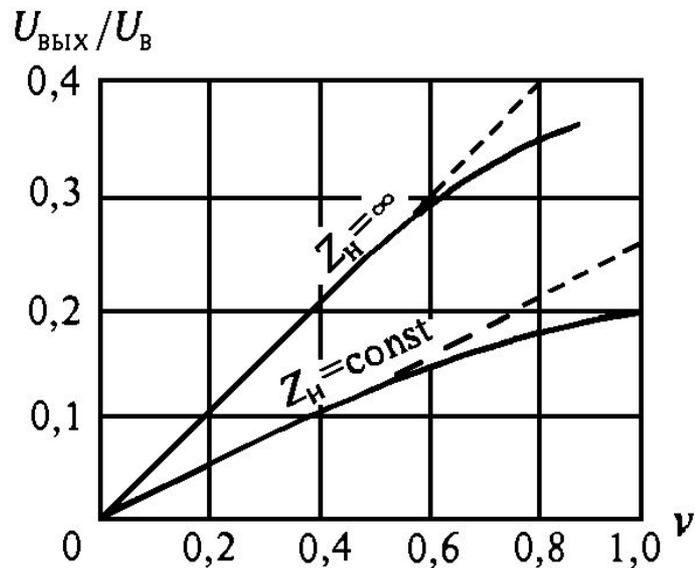
Магнитный поток $\Phi_{вр}$, создаваемый током $I_{вр}$:

$$\Phi_{вр} = k_2 \omega$$

Выходная ЭДС, наводимая потоком $\Phi_{вр}$ в генераторной обмотке:

$$E_{вых} = 4,44 f \omega_{г.эф} \Phi_{вр.m}$$

Статические характеристики асинхронного тахогенератора



Динамические характеристики асинхронного тахогенератора

$$W_{\omega}(p) = k$$

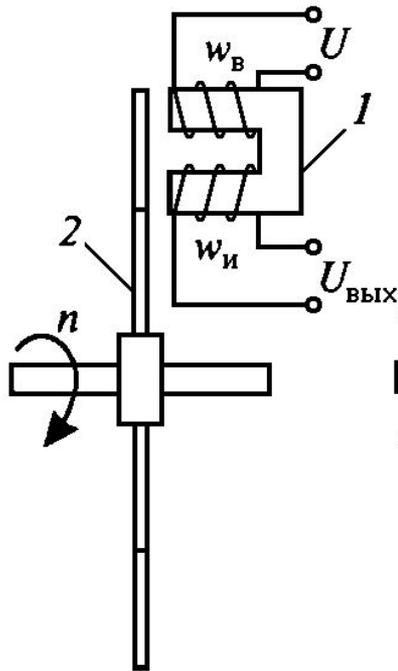
$$W_{\alpha}(p) = kp$$

Типичные параметры:

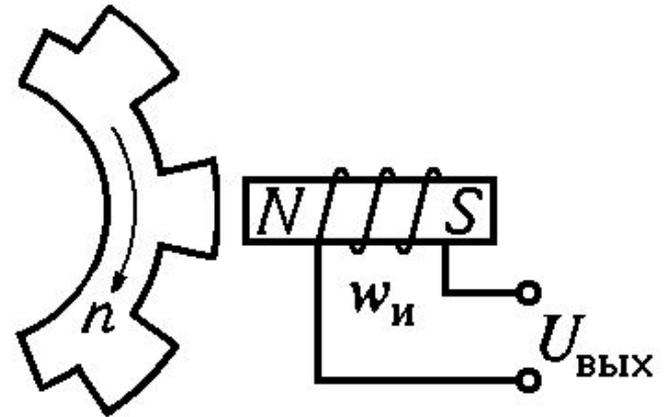
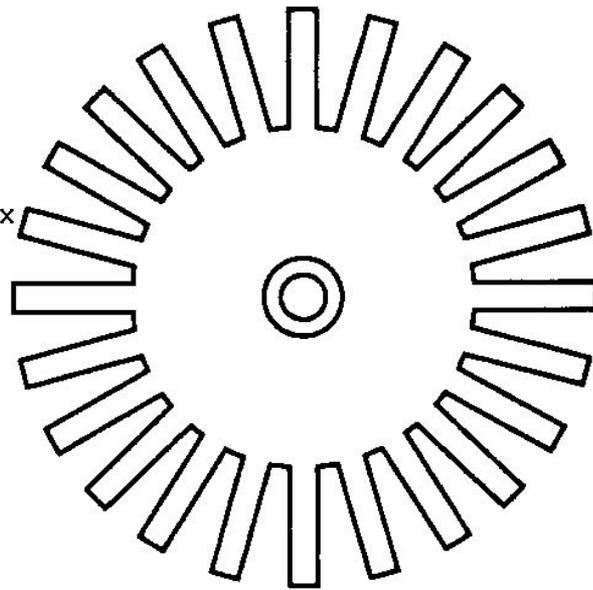
- полная погрешность при максимальной рабочей скорости 0,1–2,5%;
- крутизна выходной характеристики 1–10 мВ/(об/мин);
- величина остаточной ЭДС 25–100 мВ.

Импульсные преобразователи частоты вращения

Индукционные частотные преобразователи

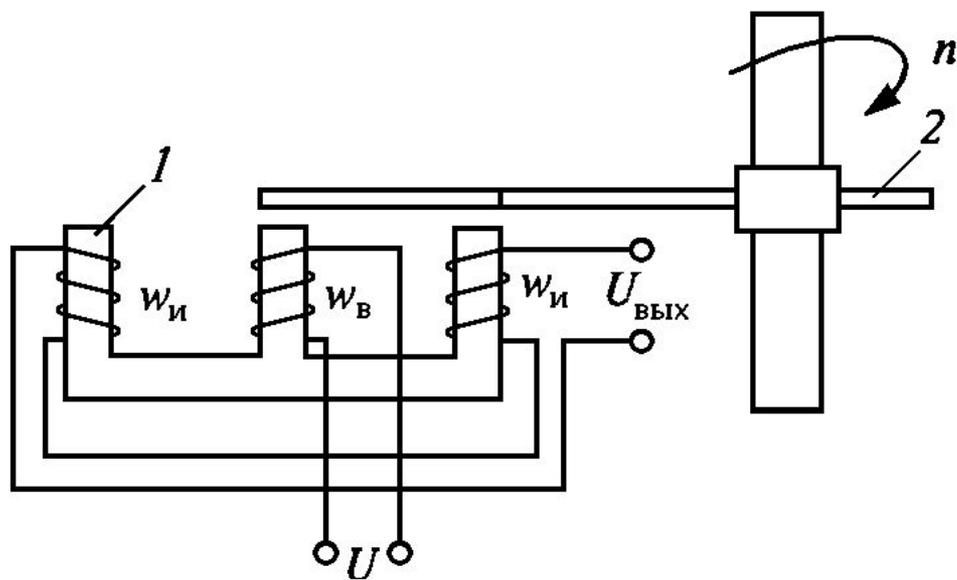


С обмоткой возбуждения
магнитом

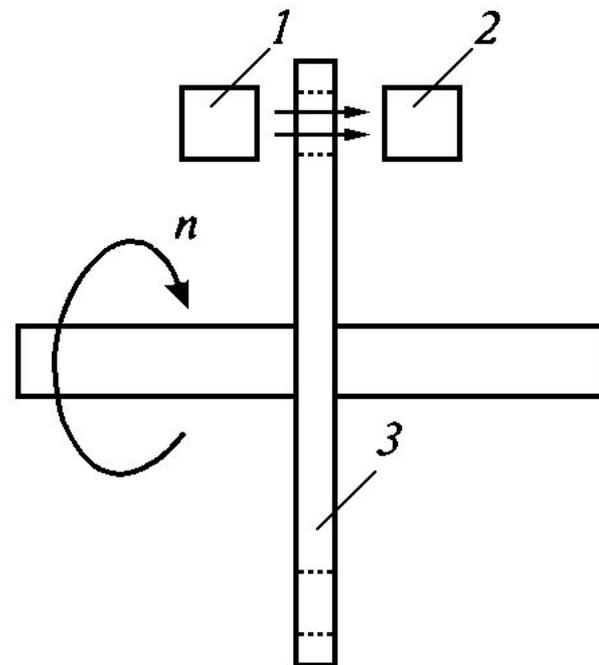


С постоянным

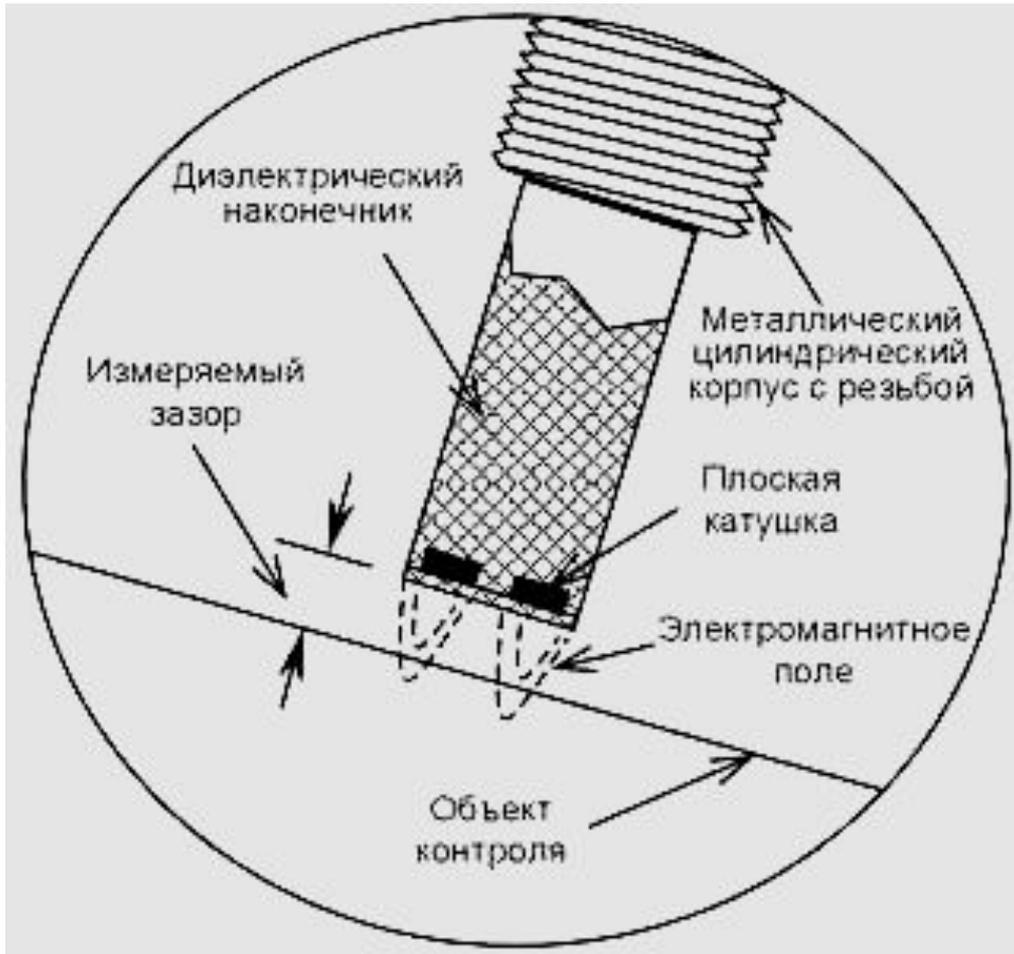
Трансформаторный преобразователь



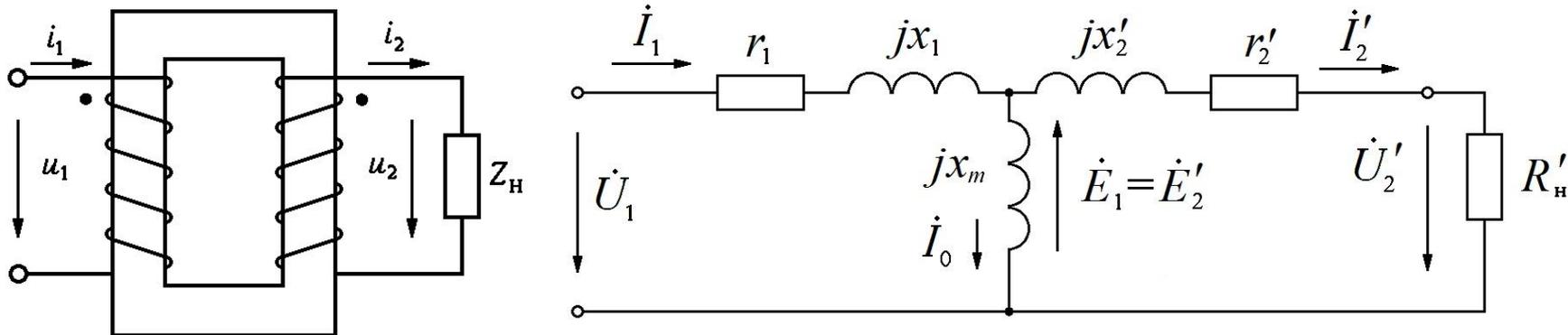
Фотоэлектрический преобразователь



Вихретоковые преобразователи



Измерительные преобразователи напряжения



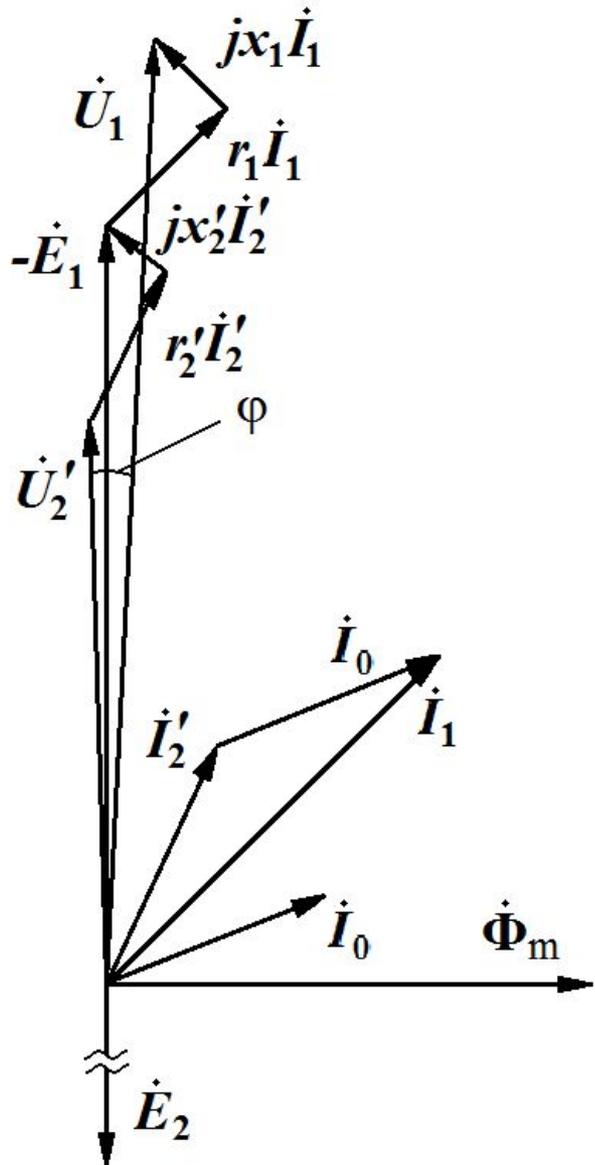
Приведение параметров вторичной обмотки к первичной:

$$U_2' = U_2(w_1/w_2); \quad I_2' = I_2(w_2/w_1); \quad z_2' = z_2(w_1/w_2)^2.$$

Система уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1; \\ -\dot{E}_2' &= \dot{U}_2' + r_2' \dot{I}_2' + jx_2' \dot{I}_2'; \\ \dot{I}_1 - \dot{I}_2' &= \dot{I}_0. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма трансформатора напряжения



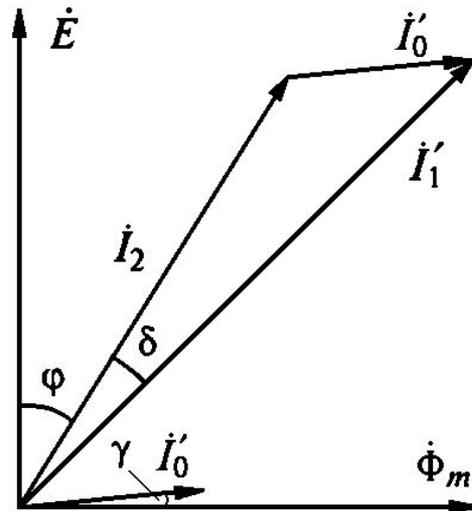
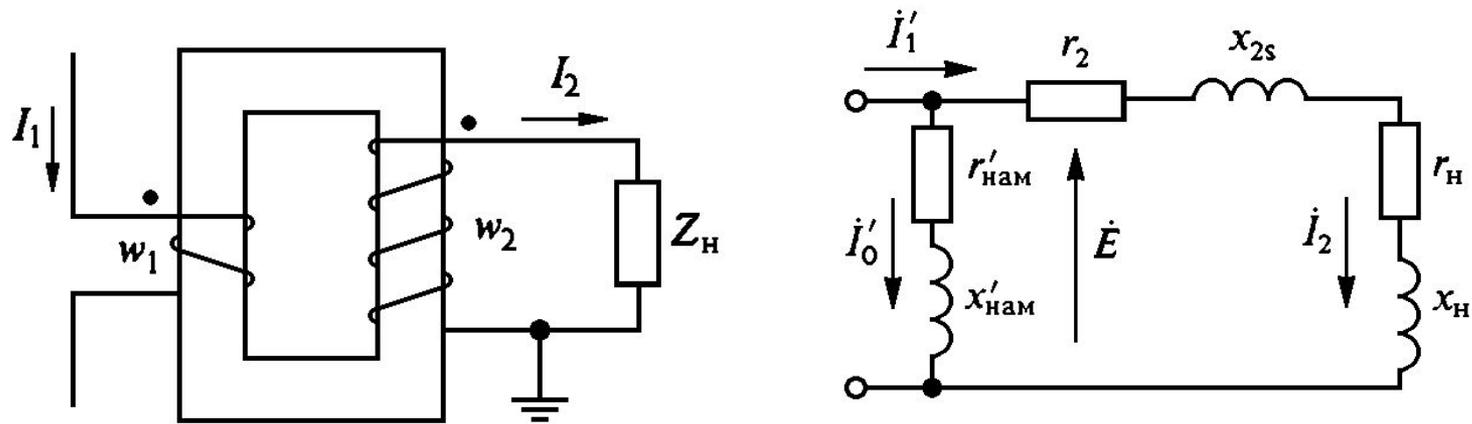
Погрешности трансформатора напряжения:

а) погрешность напряжения

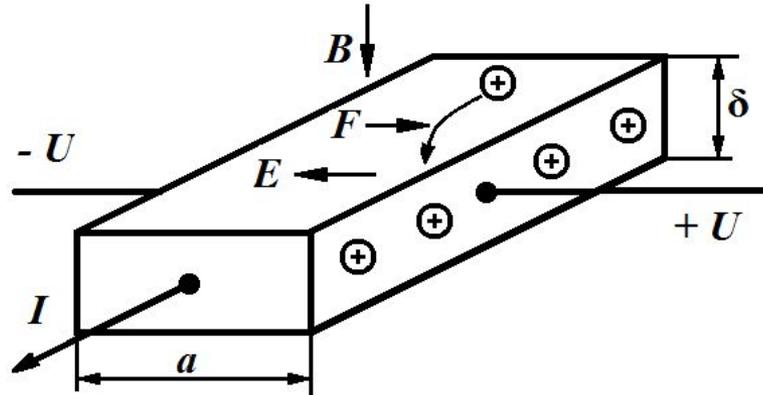
$$\delta U = \frac{k_{UH} U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100 \%$$

б) угловая погрешность φ

Измерительные преобразователи тока



Преобразователь Холла



Сила Лоренца $F = qvB$.

Сила действия электрического поля $F_E = qE = qU/a$

Скорость носителей тока $v = \frac{j}{qn}$

Плотность тока $j = \frac{I}{a\delta}$

ЭДС Холла $U = \frac{BI}{qn\delta} = R_x \frac{BI}{\delta}$

Датчик тока с преобразователем Холла

