

# Часть 2

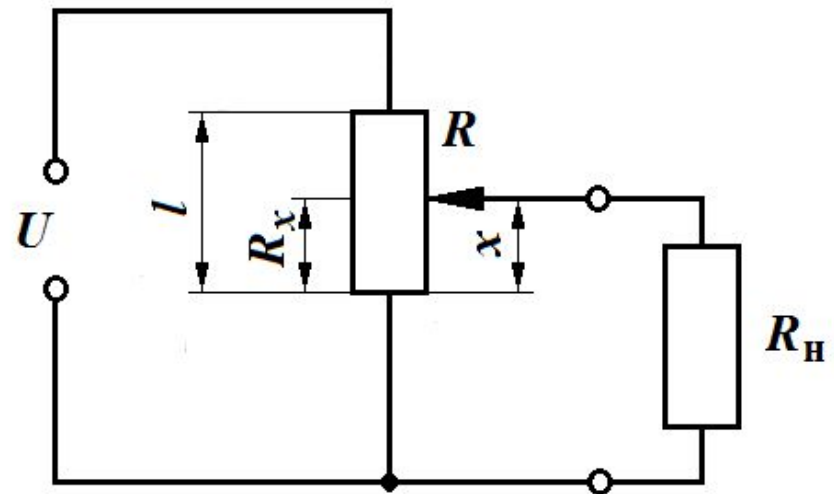
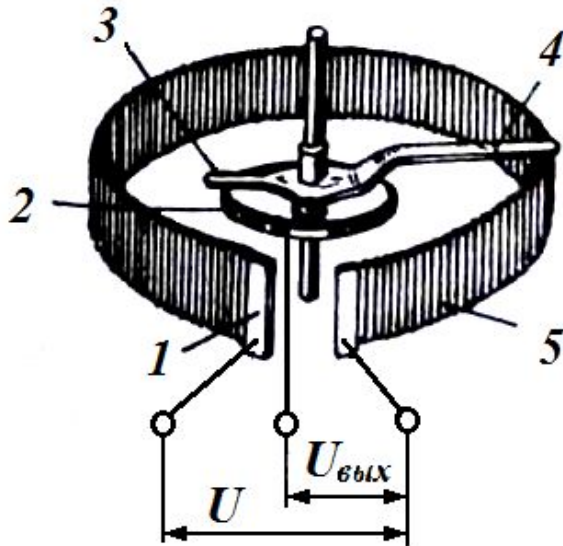
## Первичные измерительные преобразователи

- **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)

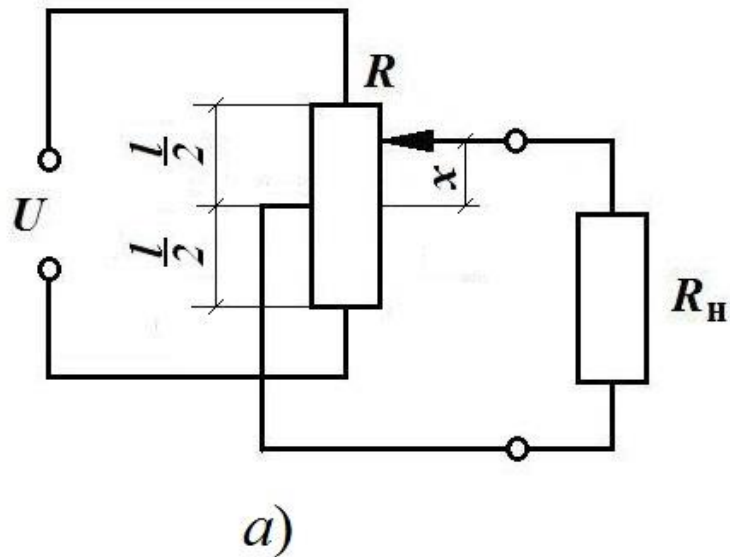
# Простейший потенциометрический преобразователь



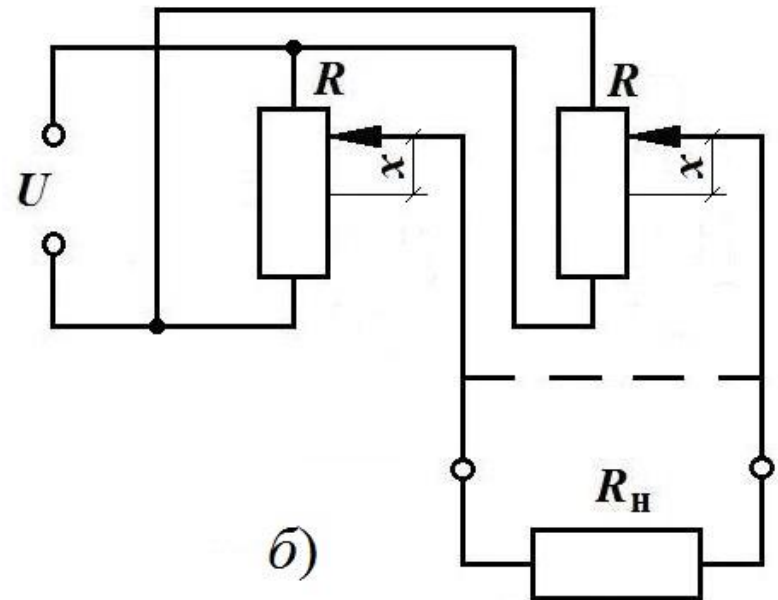
В режиме холостого хода  $U_{\text{вых}} = U \frac{R_x}{R}$ .

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  $\varepsilon_l$  — относительная продольная деформация;

$l$  — длина проводника;

$\Delta l$  — изменение длины в результате деформации;

$\sigma$  — механическое напряжение в проводнике;

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

Относительная поперечная деформация проводника

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

где  $\mu$  — 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

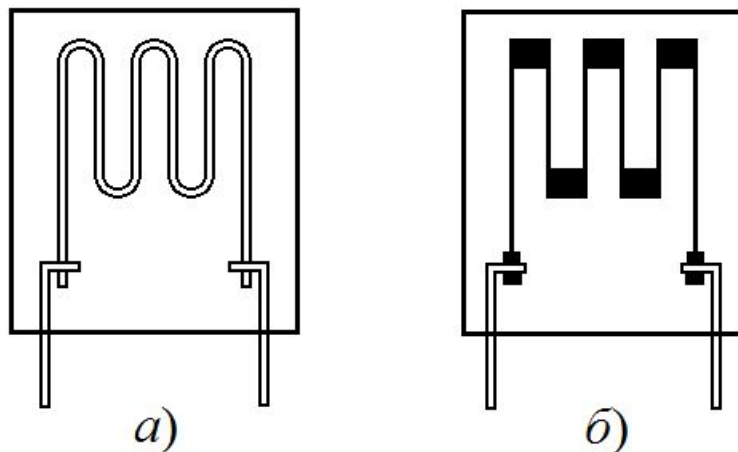
$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

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.

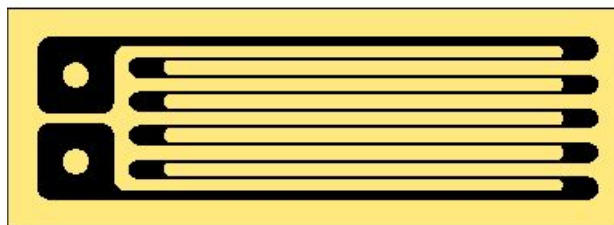
# Конструкция тензорезисторов



а – проволочный, б – фольговый

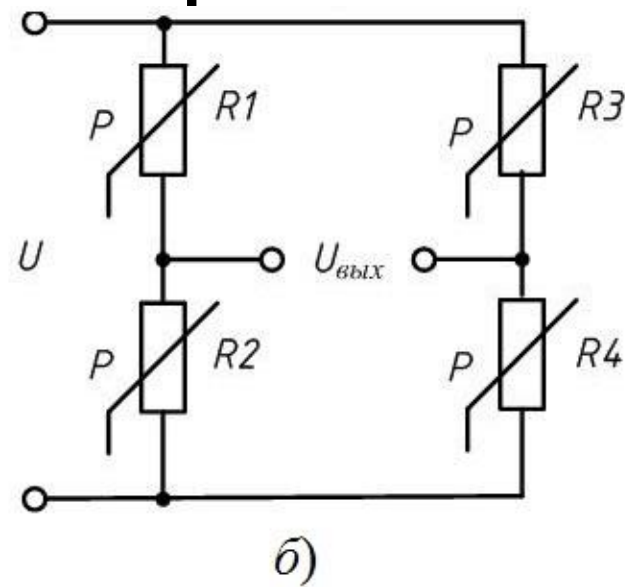
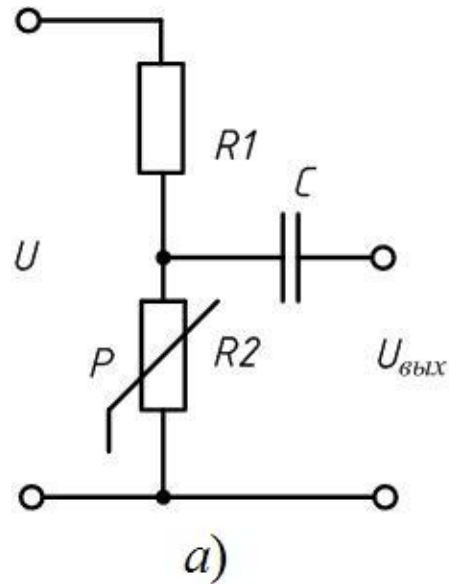
zakatayrukava.ru

$R = 150 \text{ Ом}$





# 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:

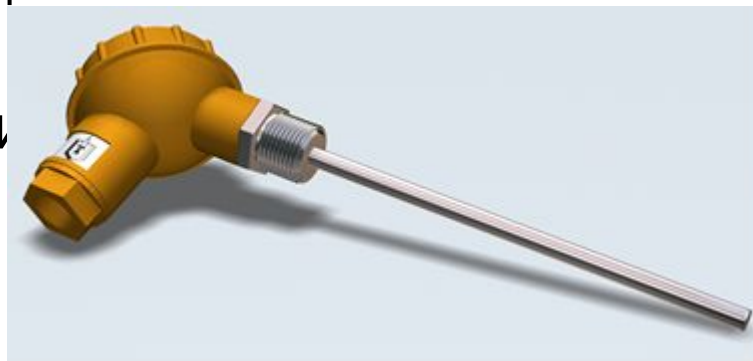
$$R = R_0(1 + \alpha \Theta + \beta \Theta^2 + \gamma \Theta^3 + \dots),$$

где  $R_0$  – сопротивление проводника при начальной температуре;

$\Theta$  – перегрев проводника относительно начальной температуры;

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

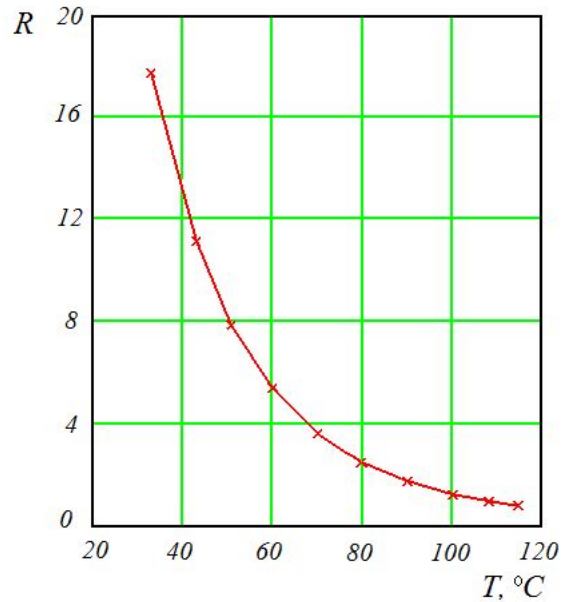
Конструкти



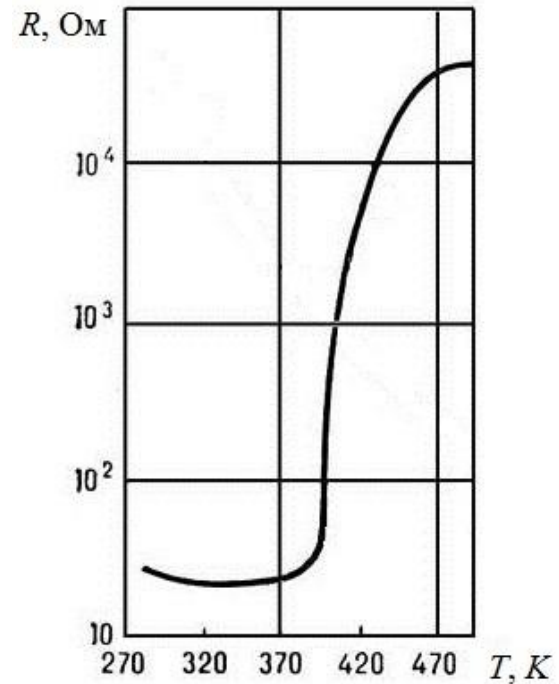
# Термисторы

ТКС < 0

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

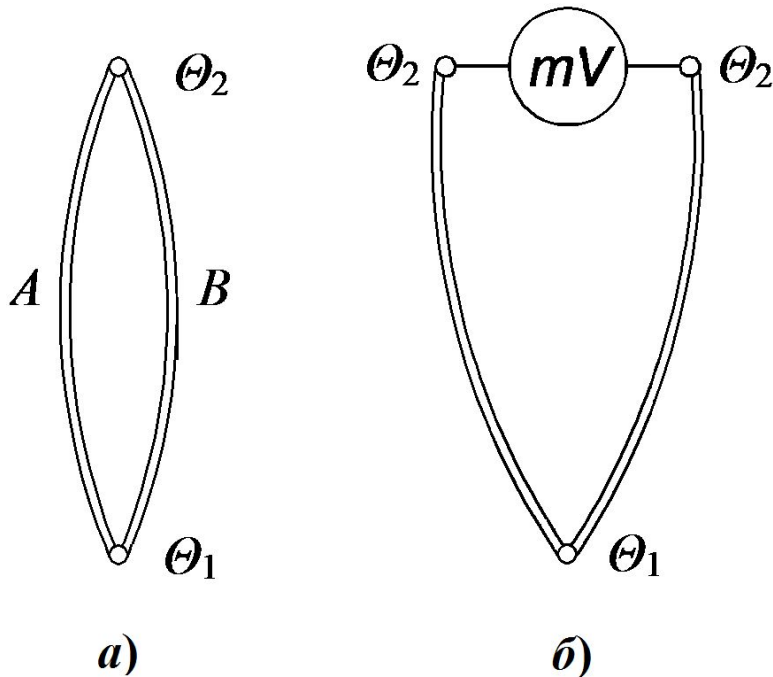


ТКС >> 0 (позистор)



# Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Термоэлектрические цепи

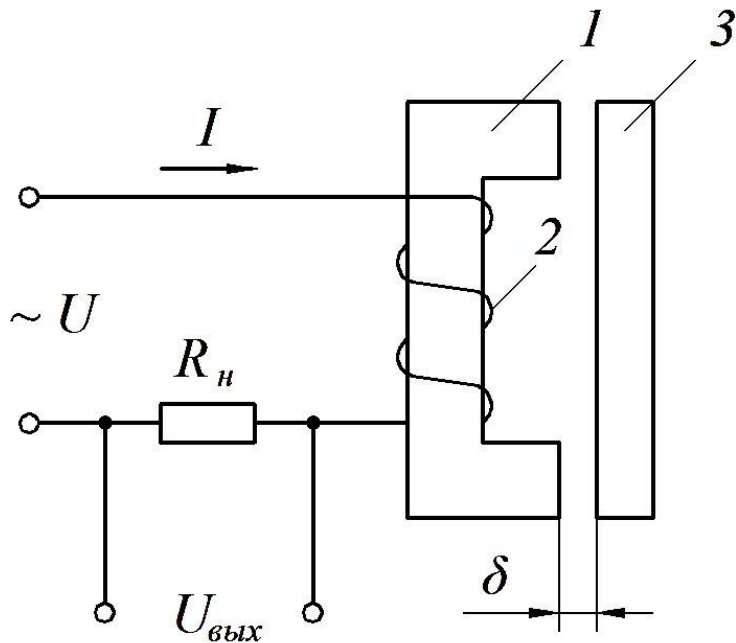


Наиболее распространенные термопары:

- 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

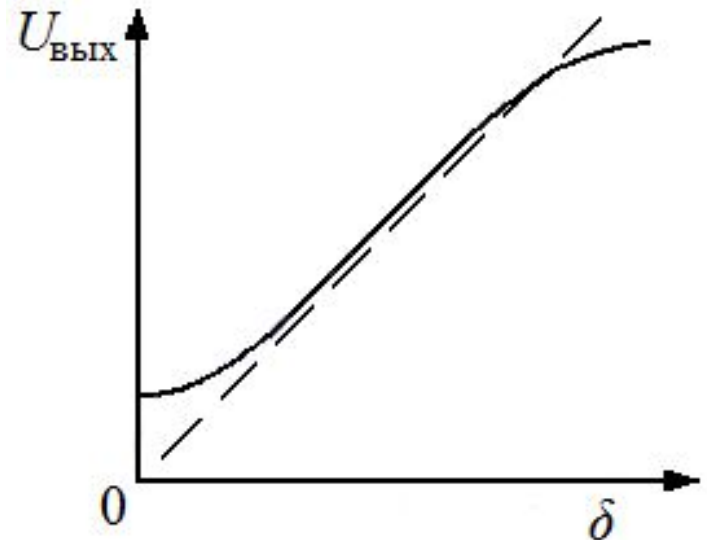
# Индуктивные преобразователи перемещения

Простейший индуктивный  
преобразователь

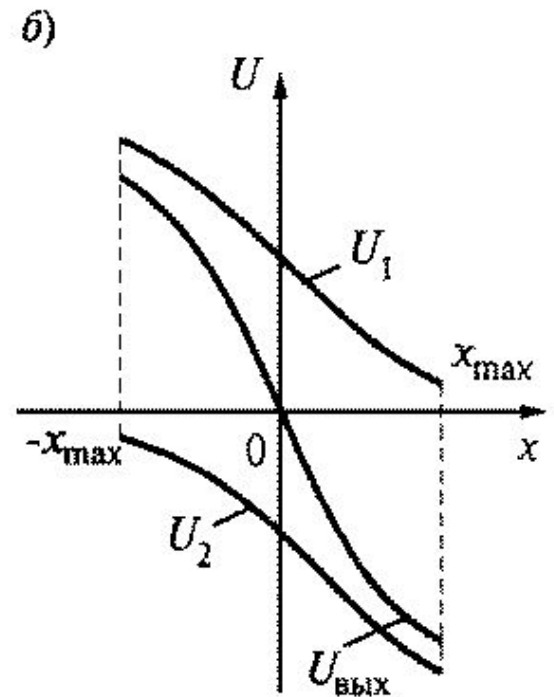
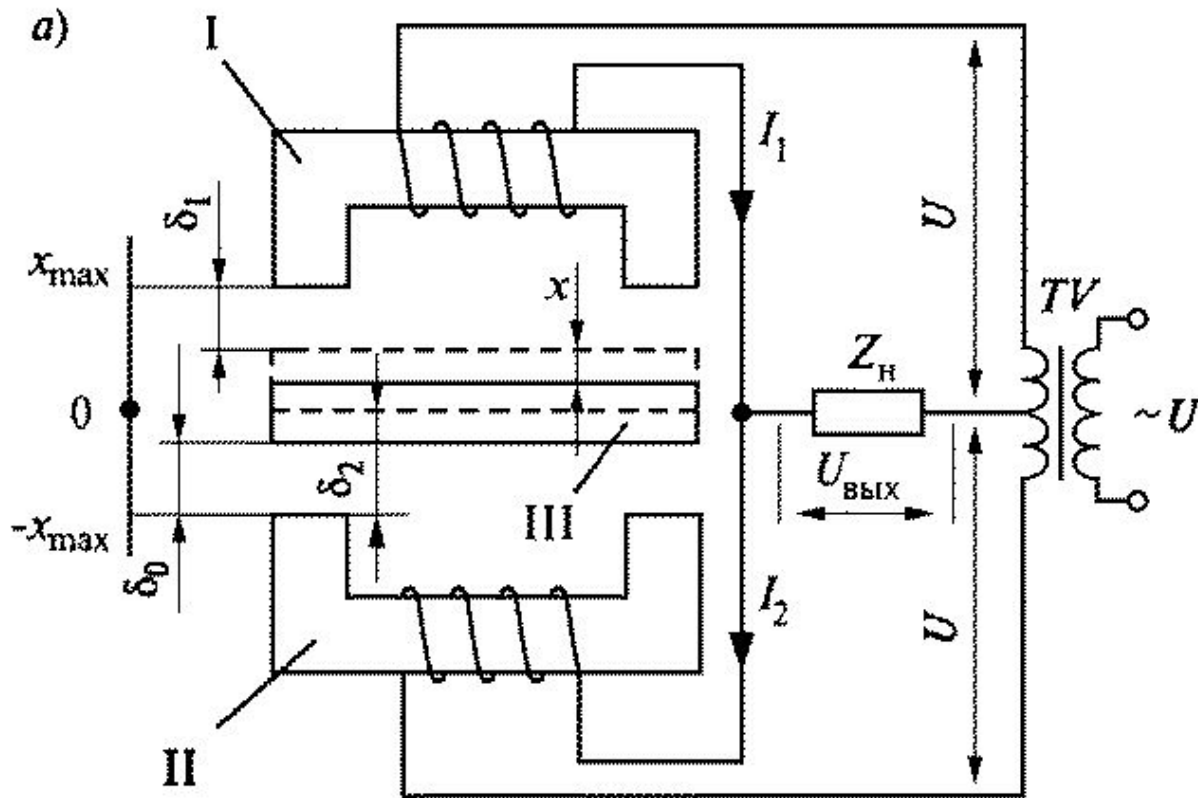


$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{2UR_H\delta}{\mu_0\omega w^2 S}$$

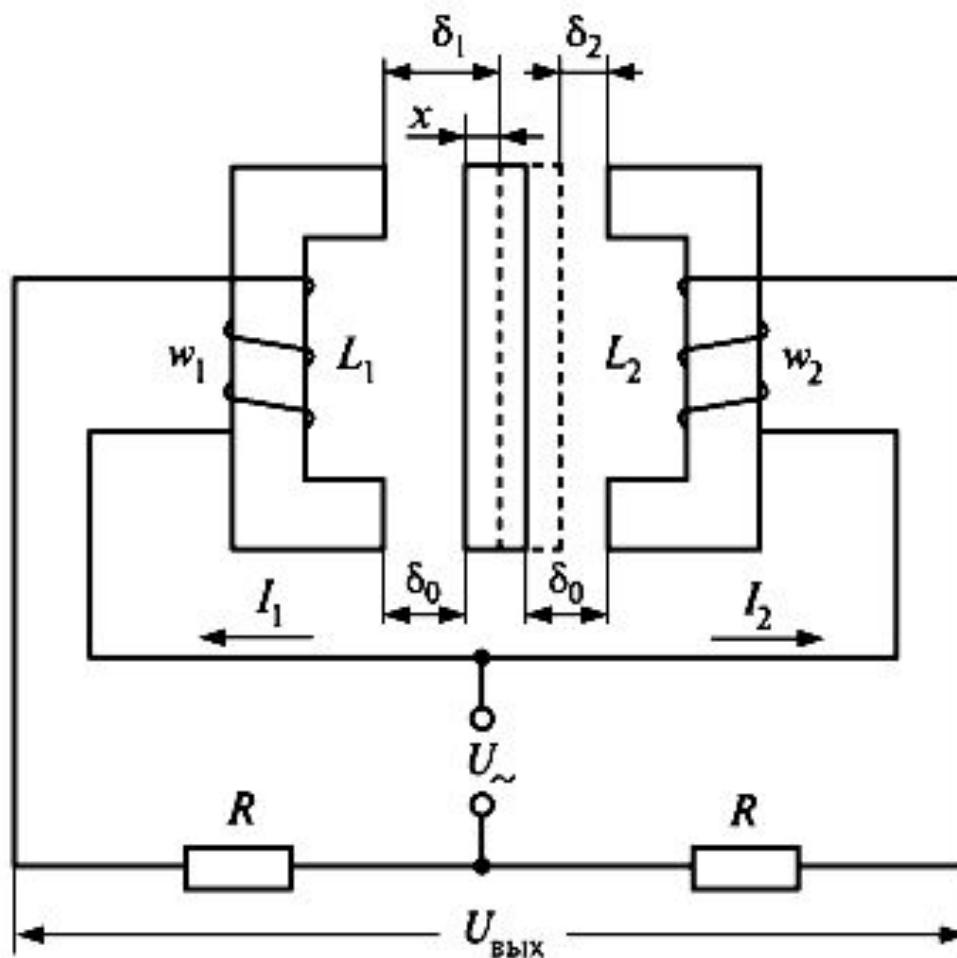
Статическая характеристика  
индуктивного  
преобразователя



# Дифференциальный реверсивный индуктивный преобразователь

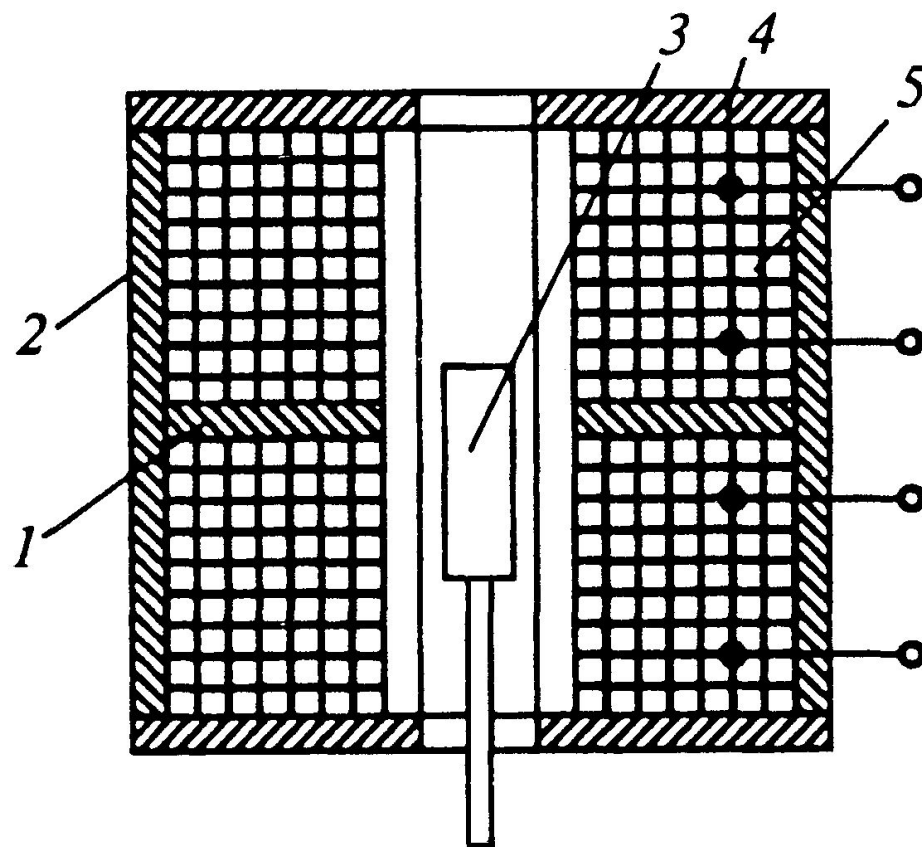


# Мостовой реверсивный индуктивный преобразователь



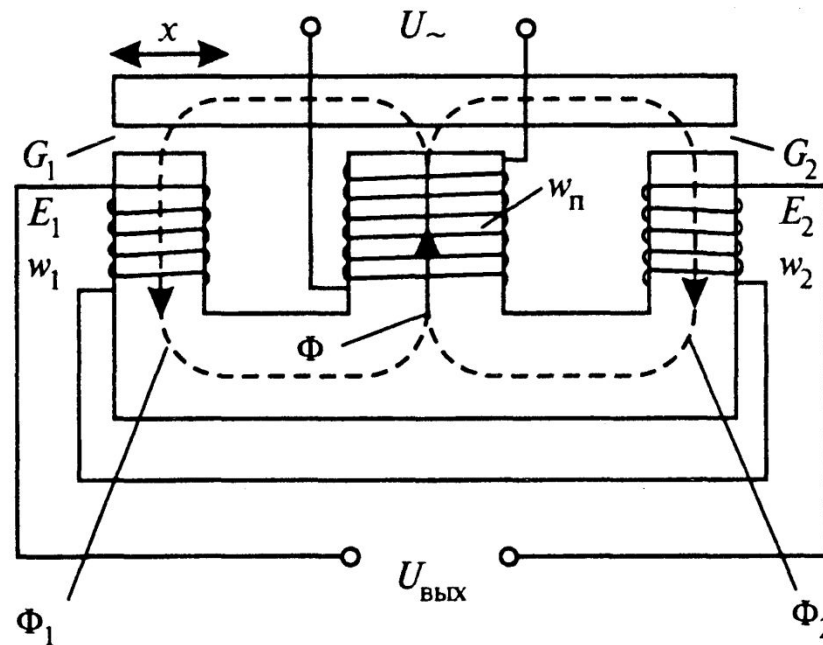


# Цилиндрический реверсивный индуктивный преобразователь



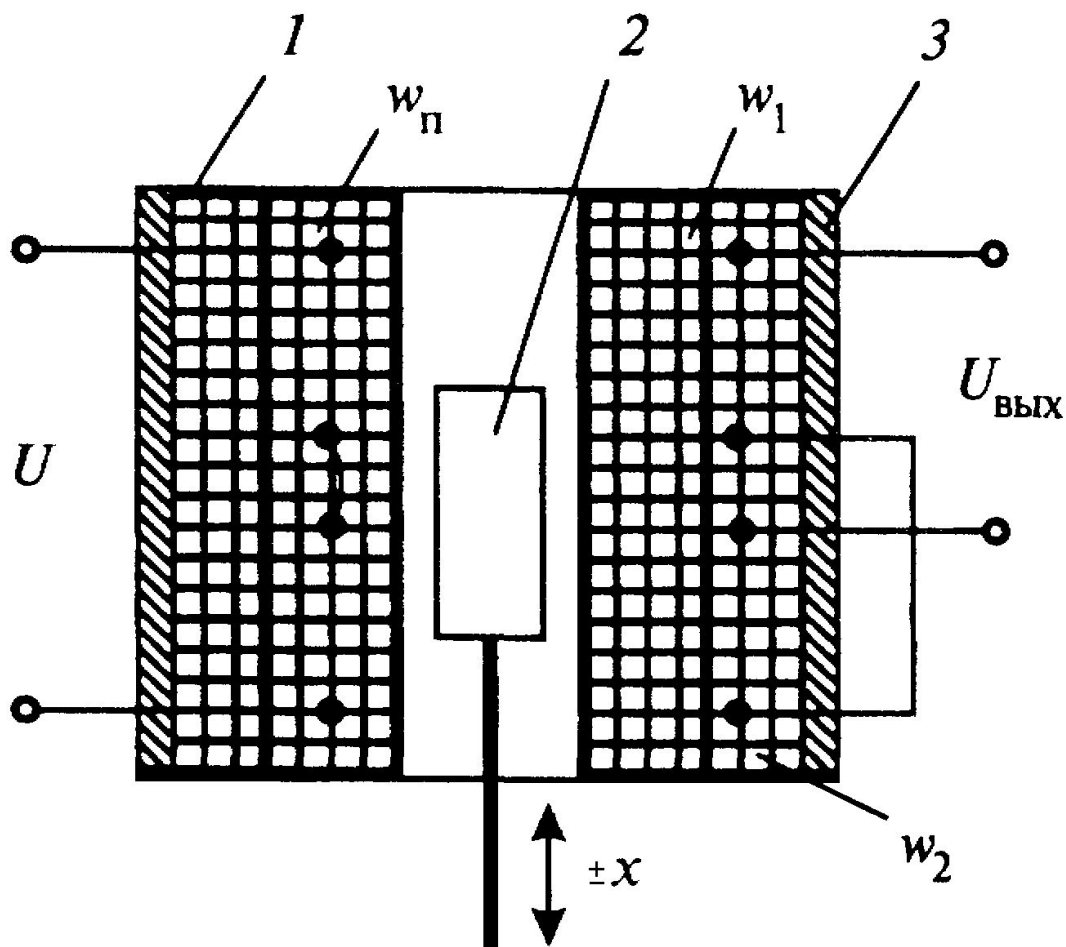
# Трансформаторные преобразователи

## Плоский дифференциально-трансформаторный преобразователь



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

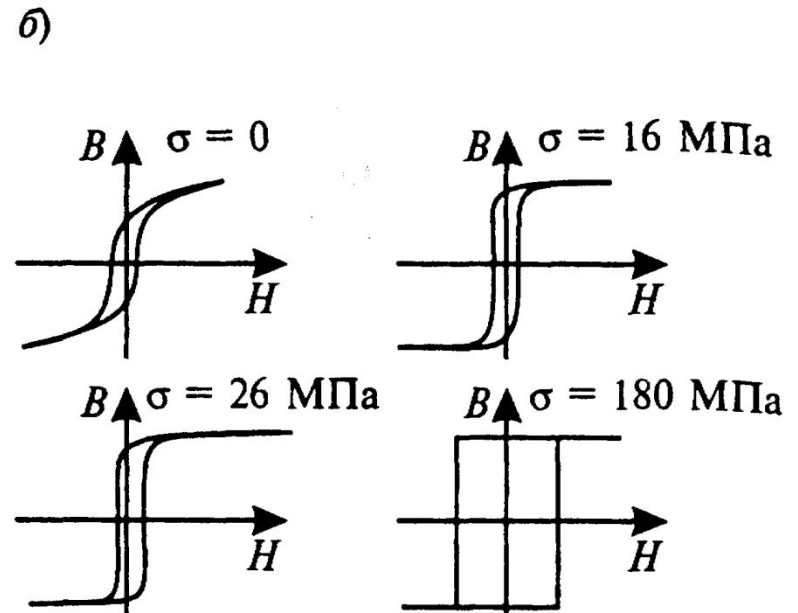
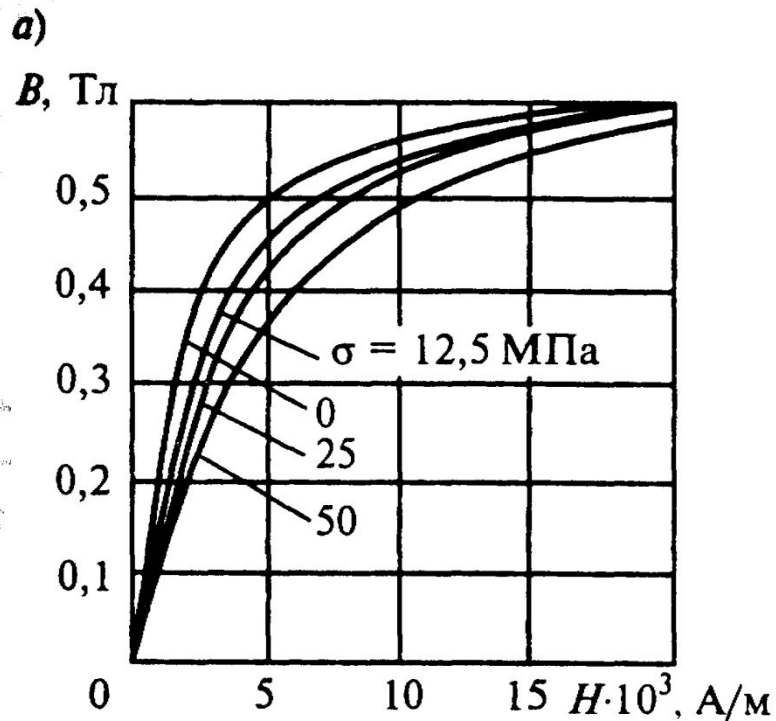
# Цилиндрический дифференциально-трансформаторный преобразователь



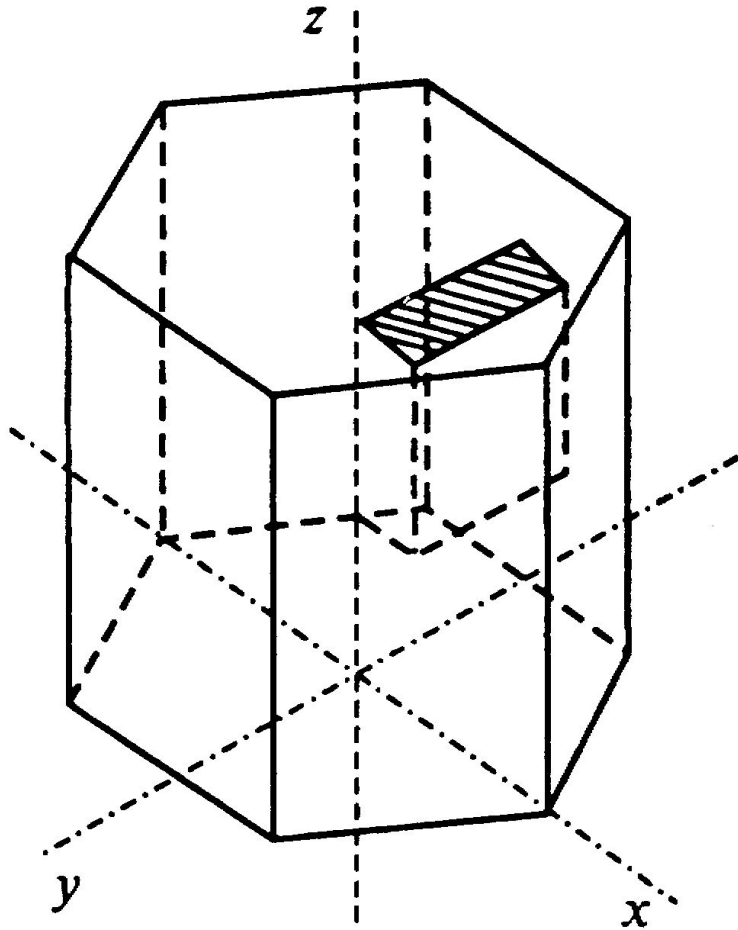
# Магнитоупругие преобразователи

Зависимость кривой намагничивания  
от механических напряжений

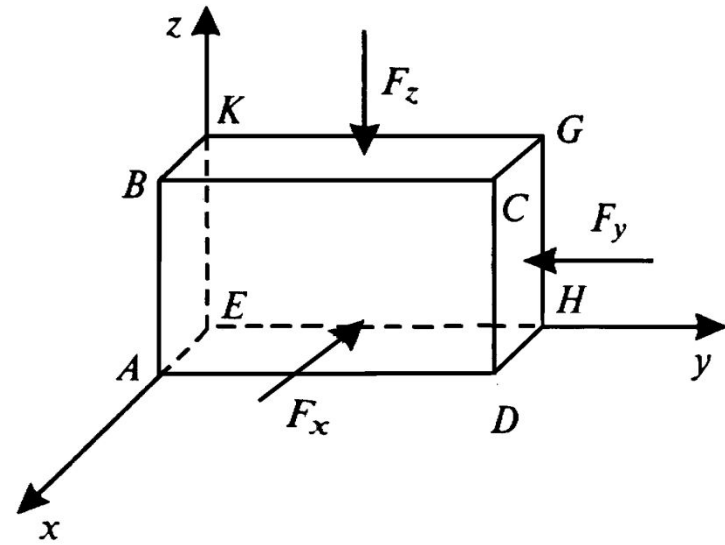
а) – никель; б) – пермаллой



# 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  $C = C_{\Pi} + C_{\text{Н}}$

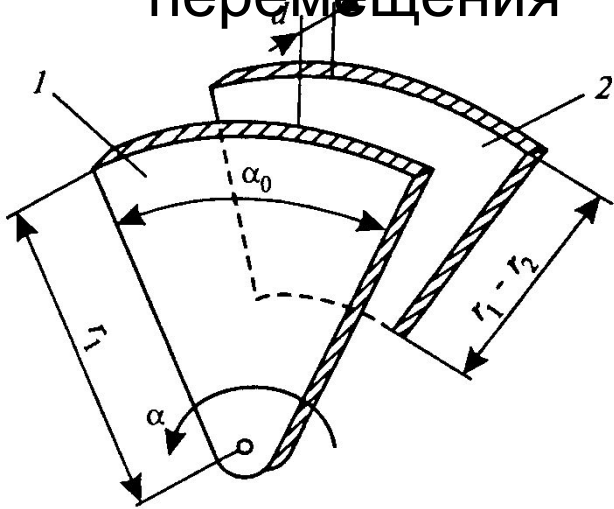
Таким образом,  $U_{\text{ВЫХ}}$  выходное напряжение при  $t = 0$

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

# Емкостные преобразователи

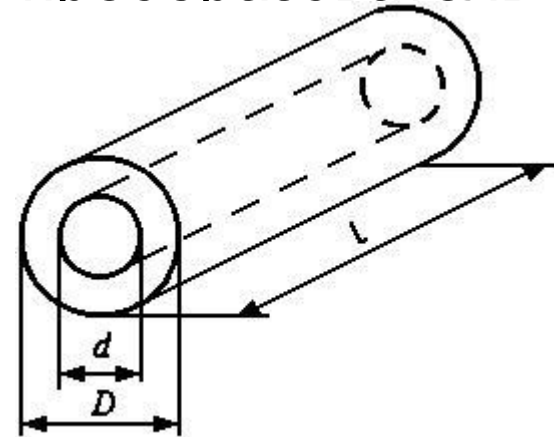
Емкость плоскостороннего конденсатора  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$

Емкостной преобразователь углового перемещения



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

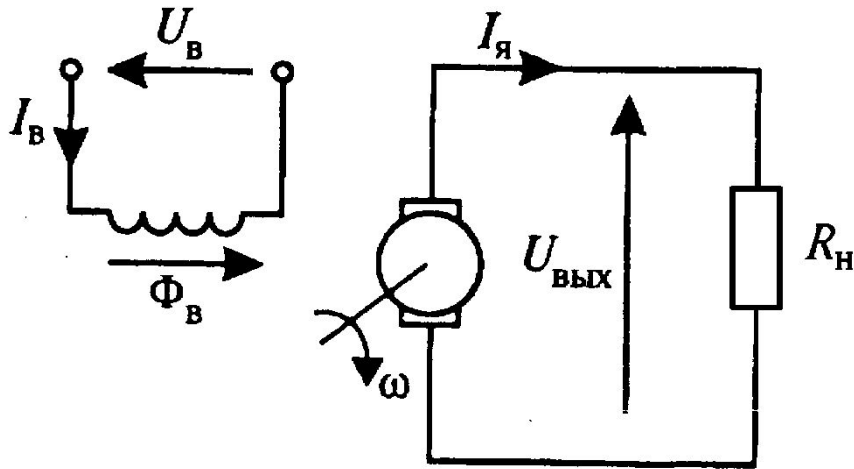
Цилиндрический емкостной преобразователь



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

# Тахогенераторы

## Тахогенератор постоянного тока



Уравнение якорной цепи

$$U_{\text{ВЫХ}} = E - I_{\text{я}} R_{\text{яц}},$$

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

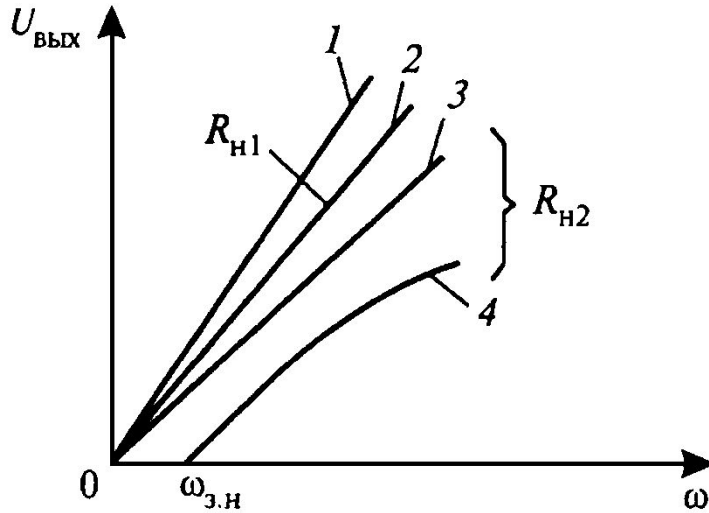
$I_{\text{я}} = U_{\text{ВЫХ}} / R_{\text{H}}$  – ток якоря

Отсюда

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



## 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:

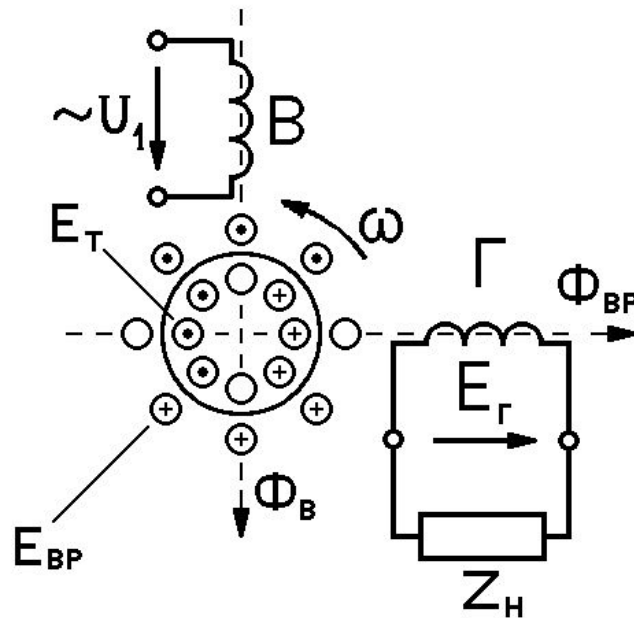
$$u_{\text{вых}} = e - L_{я} \frac{di_{я}}{dt} - i_{я} R_{я.ц}$$

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:

$$E_{\text{вр}} = k_1 \omega \Phi_{\text{в}}$$

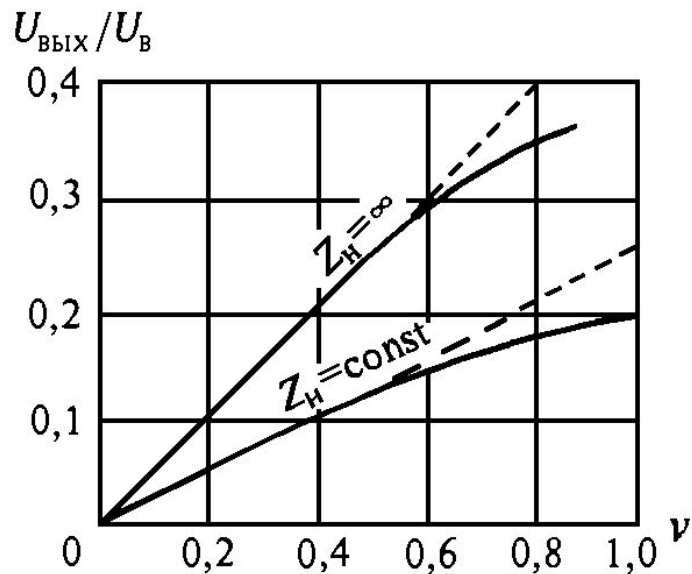
Магнитный поток  $\Phi_{\text{вр}}$ , создаваемый током  $I_{\text{вр}}$ :

$$\Phi_{\text{вр}} = k_2 \omega$$

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

$$E_{\text{вых}} = 4,44 f \omega_{\text{Г.ЭФ}} \Phi_{\text{вр.м}}$$

## Статические характеристики асинхронного тахогенератора



## Динамические характеристики асинхронного тахогенератора

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

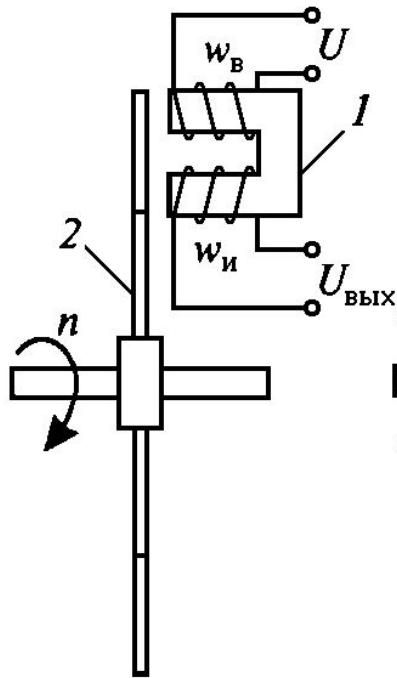
$$W_{\alpha}(p) = kp$$

Типичные параметры:

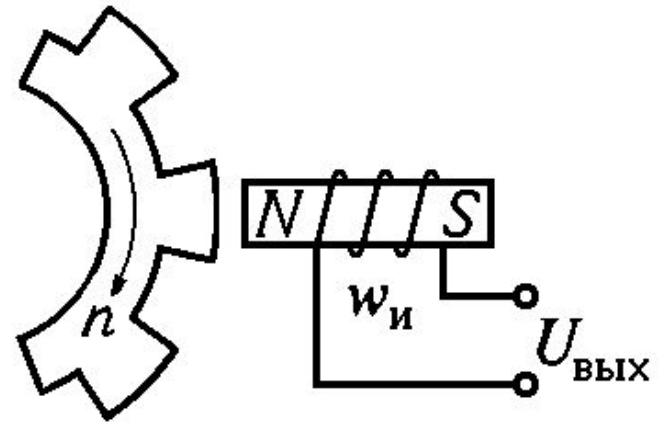
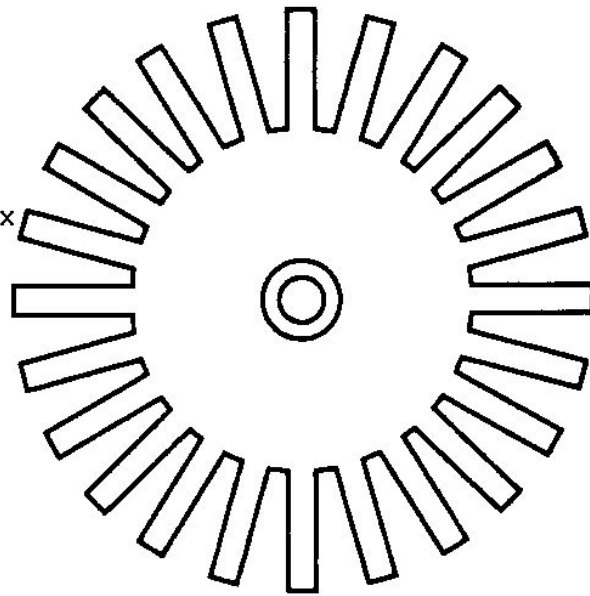
- полная погрешность при максимальной рабочей скорости 0,1–2,5%;
- крутизна выходной характеристики 1–10 мВ/(об/мин);
- величина остаточной ЭДС 25–100 мВ.

# Импульсные преобразователи частоты вращения

## Индукционные частотные преобразователи

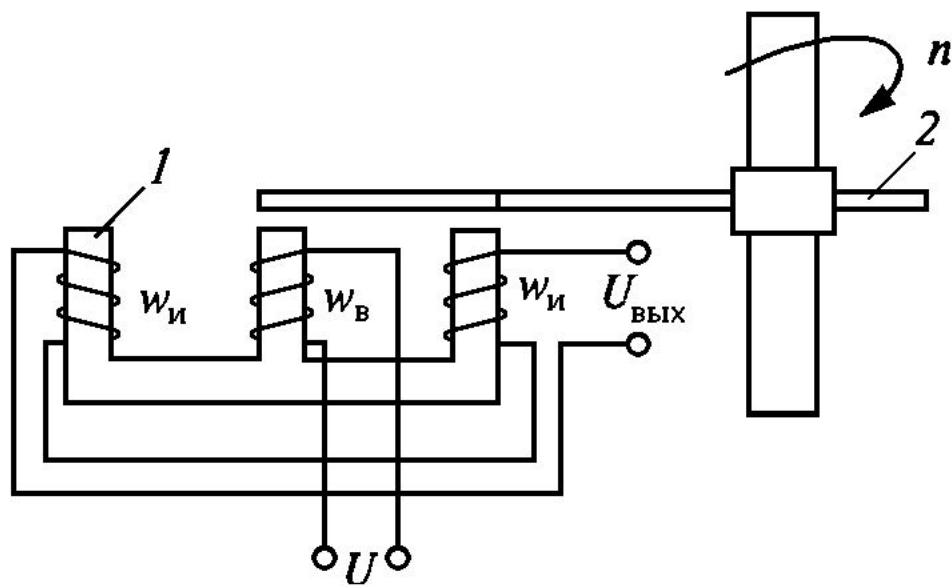


С обмоткой возбуждения  
магнитом

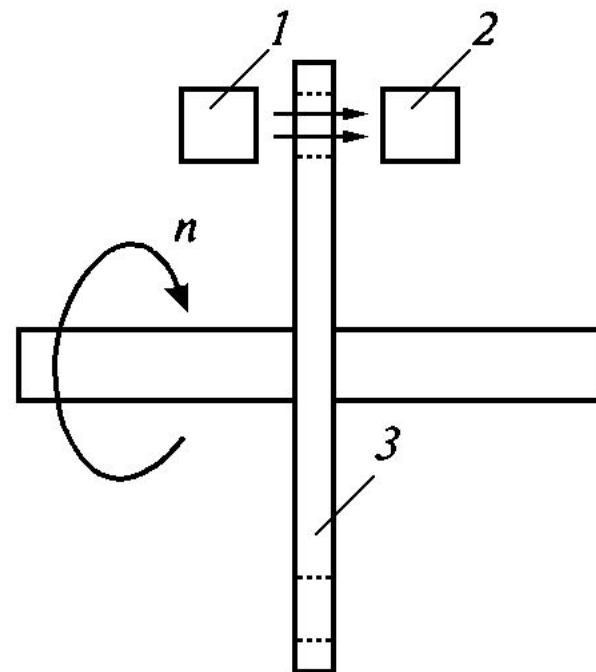


С постоянным

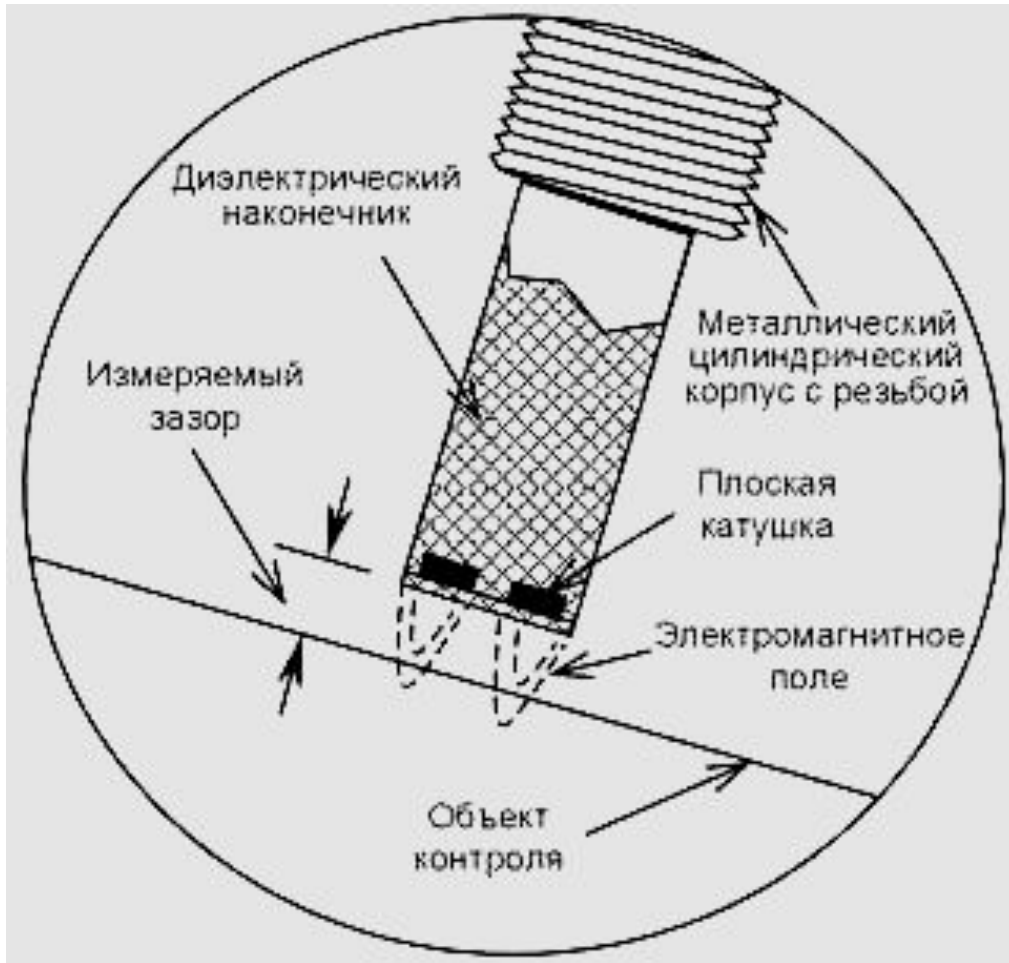
# Трансформаторный преобразователь



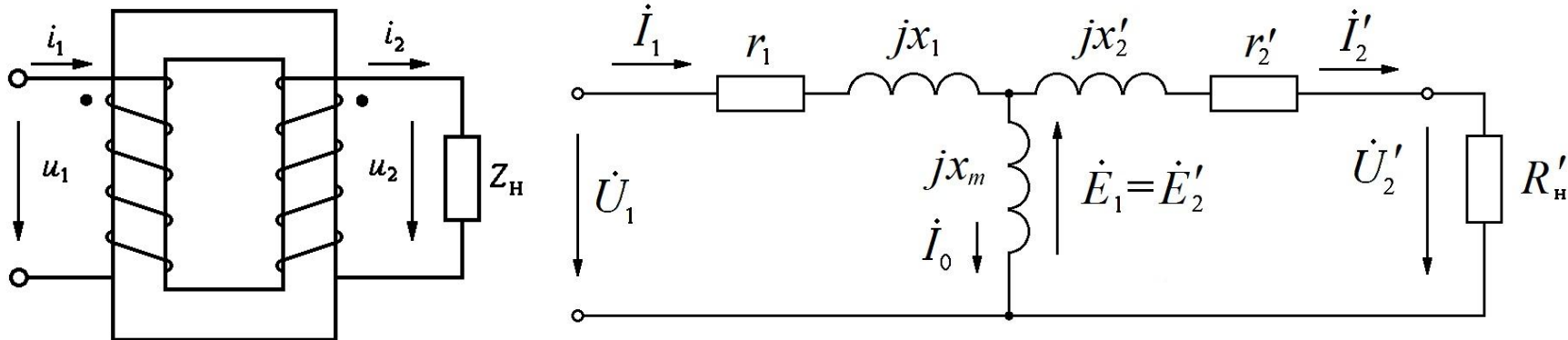
# Фотоэлектрический преобразователь



# Вихретоковые преобразователи



# Измерительные преобразователи напряжения



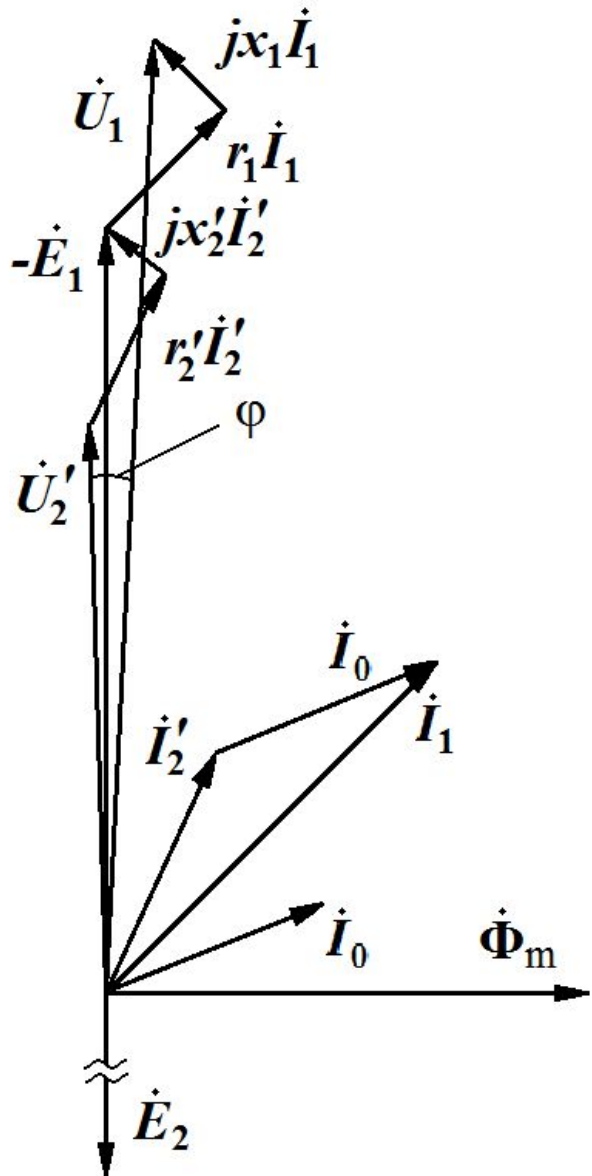
Приведение параметров вторичной обмотки к первичной:

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

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:

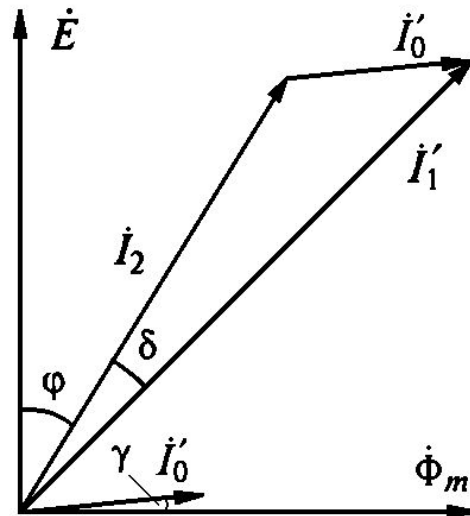
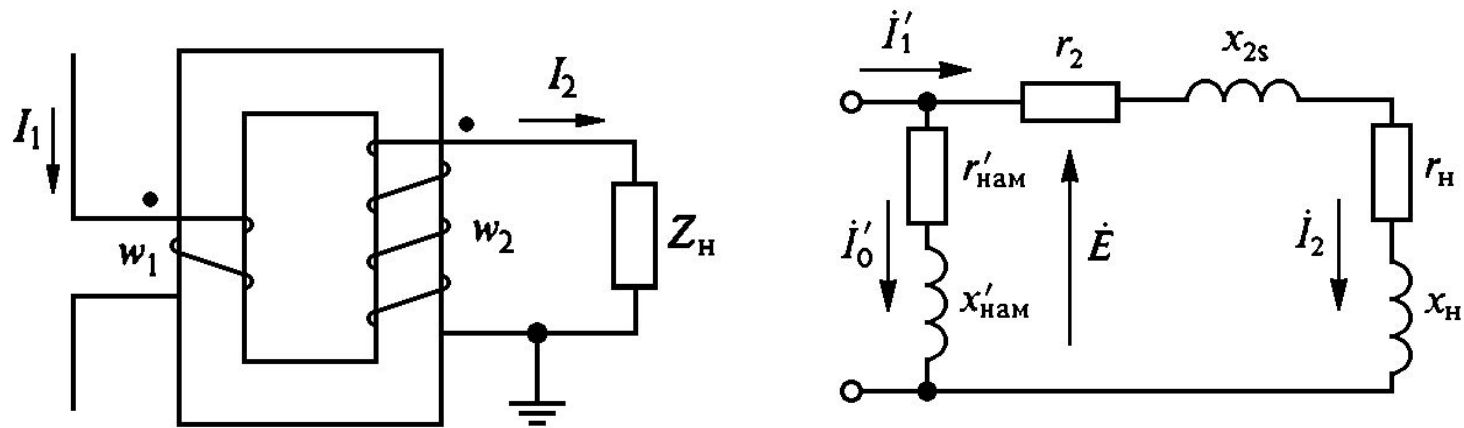
а) погрешность напряжения

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

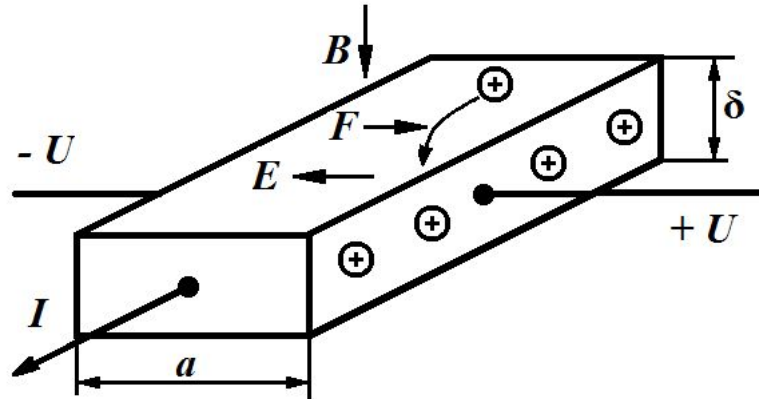
б) угловая погрешность  $\varphi$



# 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

