

Курс «измерение электрических и неэлектрических величин»

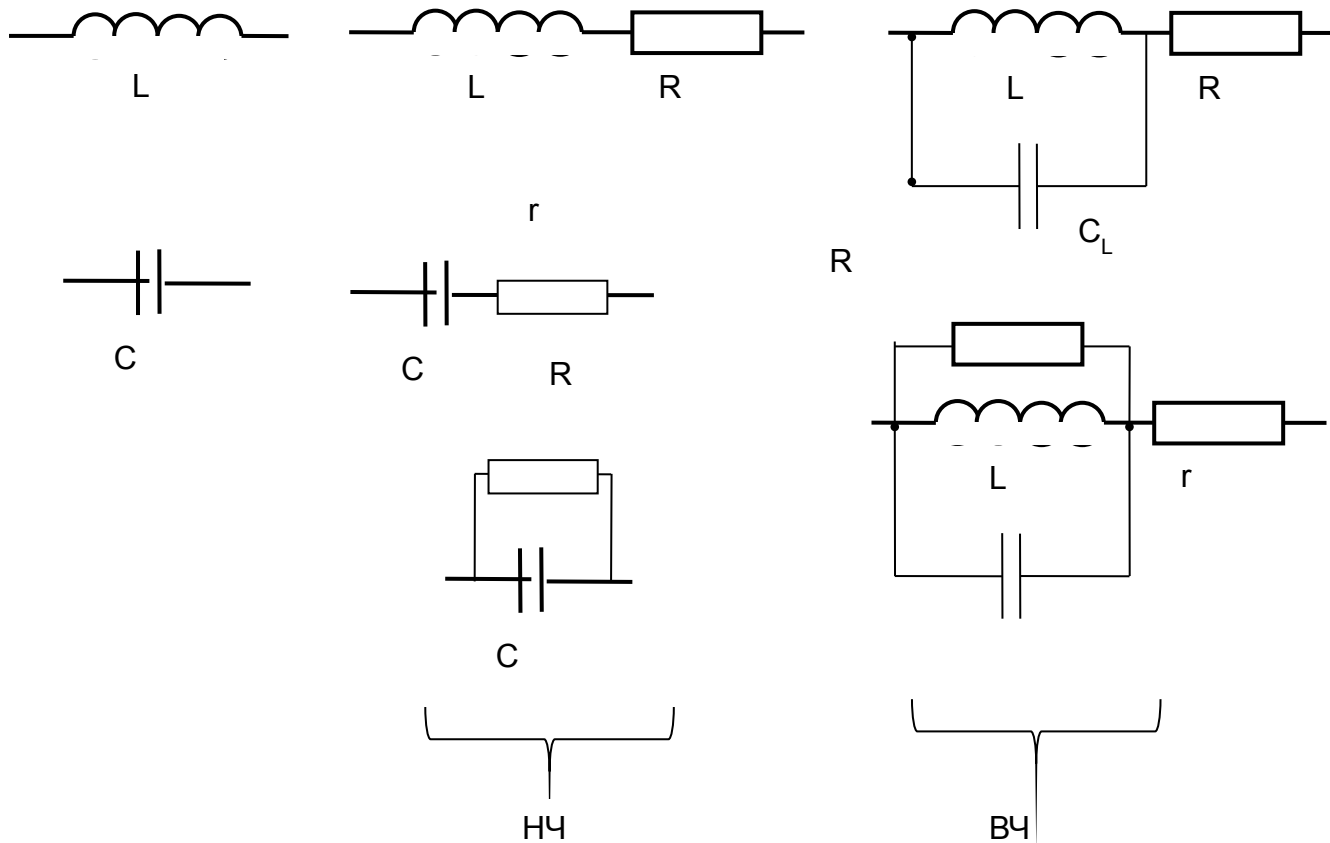
Рекомендуемая литература:

1. Раннев Г.Г. Тарасенко А.П. Методы и средства измерений.
2. В.Д.Кукуш Электрорадиоизмерения.
3. Ф.П. Кушнир Электрорадиоизмерения.
4. Кушнир Ф.П. Савенко В.Г. Электрорадиоизмерения.
5. Карпов Р.Г. Карпов Н.Р. Электрорадиоизмерения.
6. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. «Электрические измерения неэлектрических величин».
7. Левшина Е.С., Новицкий П.В. «Электрические измерения неэлектрических величин».
8. «Датчики измерительных систем» Ж. Аш с соавторами.

Измерение электрических величин

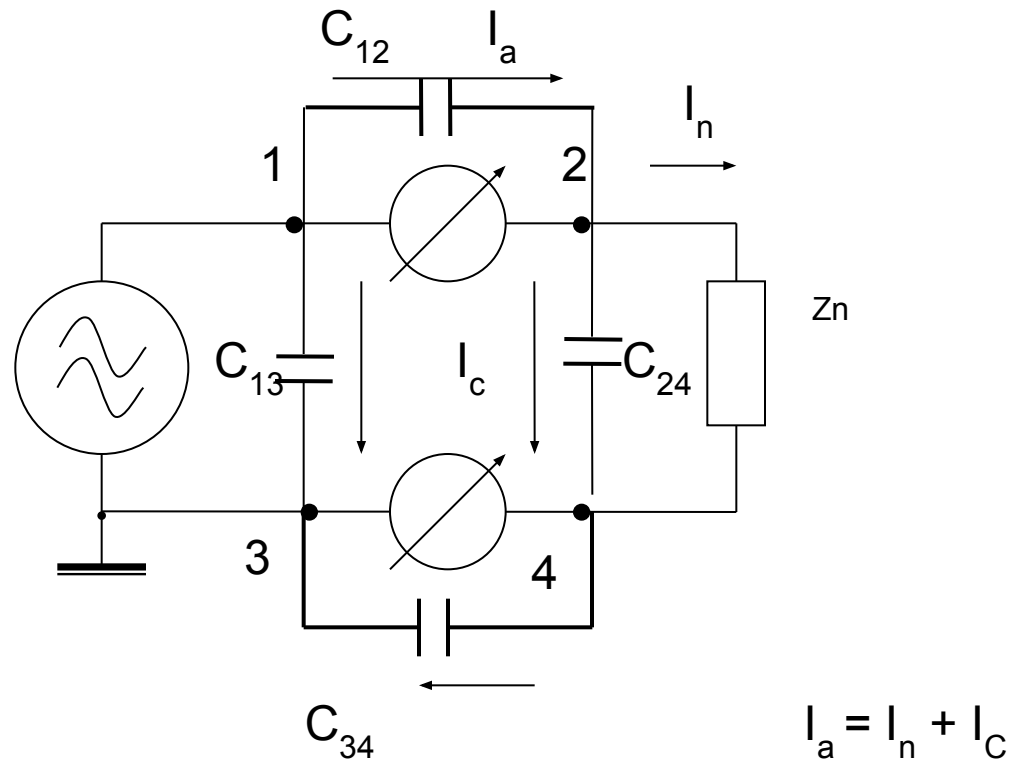
Особенности радиоизмерений.

Схемы замещения параметров цепей на НЧ и ВЧ



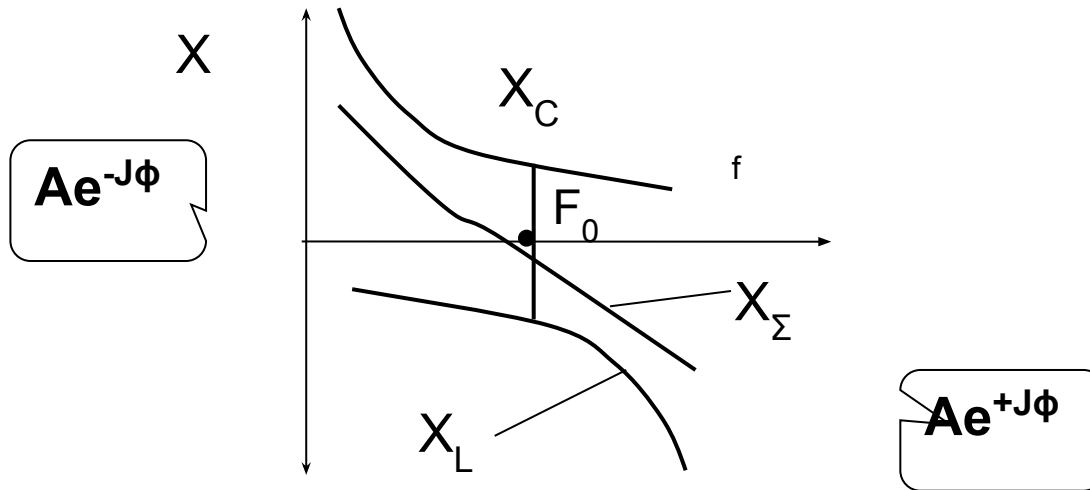
Особенности радиоизмерений.

Место подключения СИ в ВЧ - цепях



Особенности радиоизмерений.

Режимы работы реактивных параметров на ВЧ



$$X_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad X_L = j\omega L$$

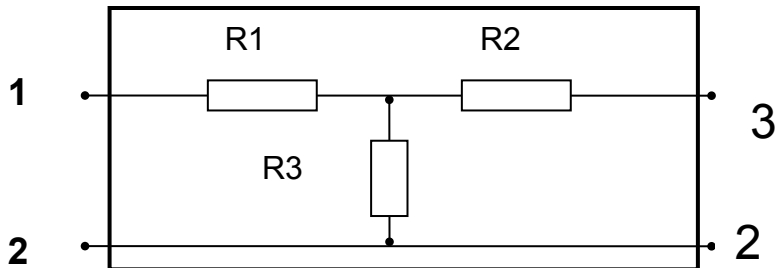
Виды измерений

1. Прямые - из опыта $Y=f(X)$, $Y=AX_{ед}$,
2. Косвенные – по известной функциональной зависимости от других, измеренных прямым методом.

$$Y=f(X_1, X_2, X_i... X_n), P=I R, \quad {}^2\rho = R \cdot S/l.$$

3. Совокупные и совместные имеют единую математическую модель: Совокупные –одноимённые, совместные - разноимённые $Y=f(X_1, X_2, .. X_n, Y_1, Y_2, .. Y_m)$, X_i – измеренные, Y_j – вычисленные величины, $n>m$. Решая систему n уравнений, m – число параметров, находят искомые

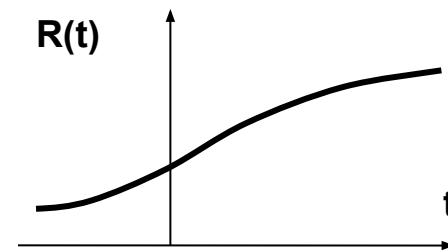
Совокупные



Система уравнений: 1). $R_{13} = R_1 + R_3$,
2). $R_{12} = R_1 + R_2$, 3). $R_{23} = R_3 + R_2$.

R_1, R_2, R_3 - искомые

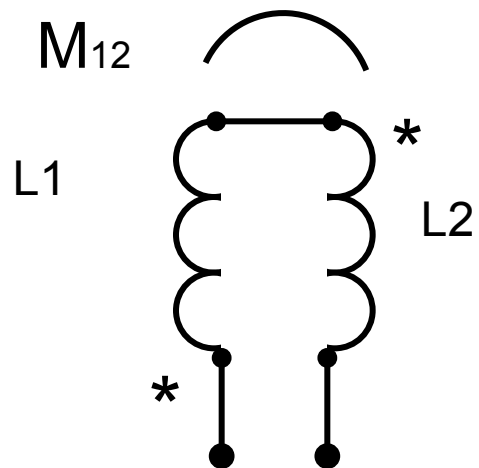
Совместные



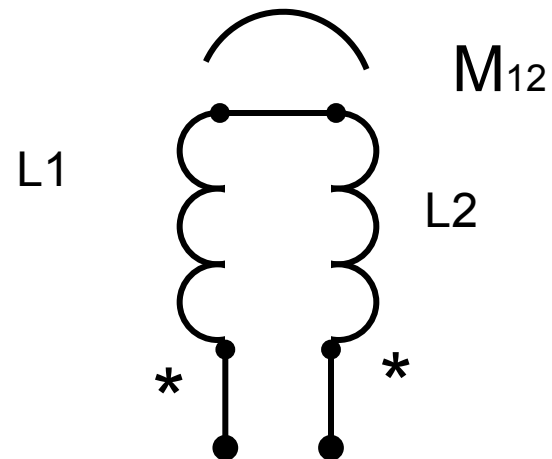
$$R_t = R_0[1+\alpha(t-t_0)+\beta(t-100)];$$

α и β - искомые параметры

Совокупные измерения



$$L_{\Sigma} = L1 + L2 + 2M_{12}$$



$$L_{\Sigma} = L1 + L2 - 2M_{12}$$

Методы и средства измерений

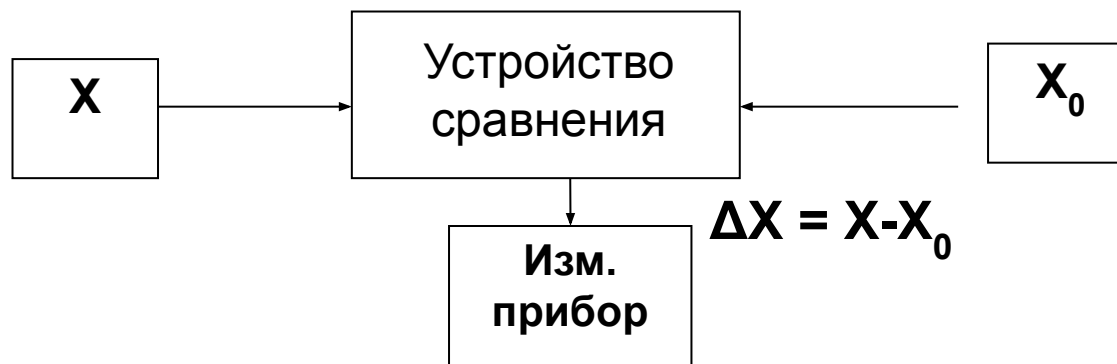
Классификация методов измерений :

Прямые:

- **Метод непосредственной оценки.**
- **Методы сравнения с мерой:**
 - *а) дифференциальный,*
 - *б)нулевой,*
 - *в) замещения,*
 - *г) метод совпадения отметок или сигналов.*

Метод сравнения

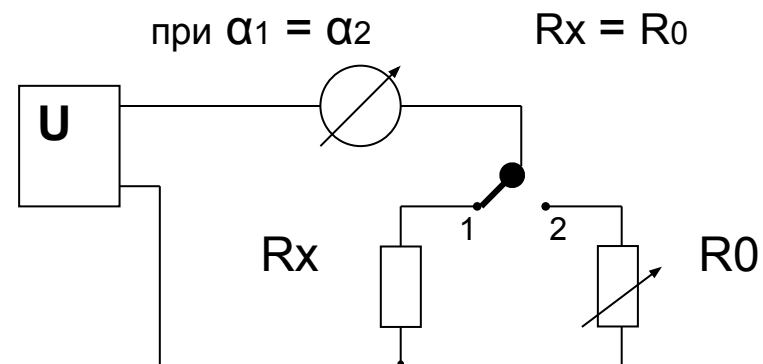
а) Дифференциальный



б) Нулевой



в) Замещения.



Устройство, принцип работы, характеристики, аналоговых СИ

Электромагнитная
энергия

$$W_{\dot{Y}} = I\Psi(\alpha) + \frac{1}{2}LI^2 + \frac{1}{2}CU^2 + M_{12}I_1I_2$$

В приборах магнитоэлектрической
системы

$$W_{\dot{Y}} = I\Psi(\alpha)$$

В приборах электромагнитной
системы

$$W_{\dot{Y}} = \frac{1}{2}LI^2$$

В приборах электродинамической
системы

$$W_{\dot{Y}} = M_{12}I_1I_2$$

Электромагнитная энергия преобразуется в силу или момент

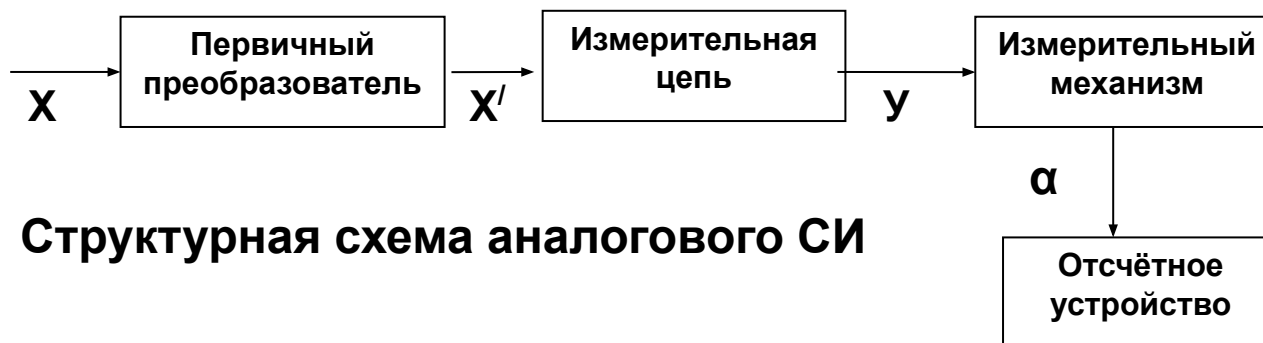
$$M = \frac{dW}{d\alpha}; \quad F = \frac{dW}{dx}.$$

Противодействующий момент $M_{пр} = K\alpha$

устанавливающий момент

$$M_{уст} = M_{вр} + M_{пр} + M_{тр} + M_{усп}$$

Устройство, принцип работы, характеристики, аналоговых средств измерений .



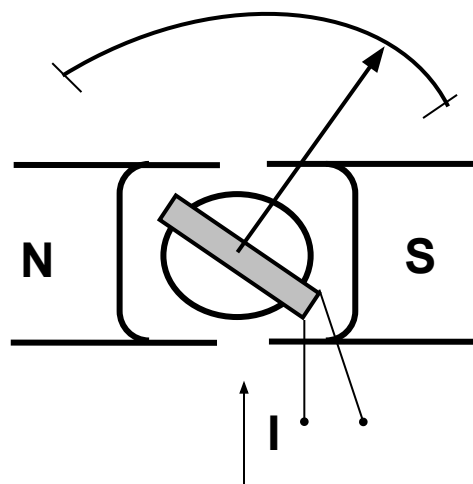
Уравнение преобразования измерительного механизма аналогового прибора.

$$M_{BP} = \frac{dW_{\dot{Y}}}{d\alpha}, \quad M_{вр} = \phi(X, Y), \quad M_{пр} = K\alpha, \quad \alpha = \frac{\dot{I}_{\hat{A}\hat{D}}}{\hat{E}} = \frac{\varphi(X, Y)}{\hat{E}}.$$

X - измеряемая величина, Y - параметры измерительного механизма,

Устройство, уравнение шкалы и характеристики приборов

магнитоэлектрической системы



$$\dot{I}_{\text{ао}} = BSWI$$

$$M_{\text{пр}} = K\alpha$$

при $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$

$$S_I = \frac{BSW}{K}$$

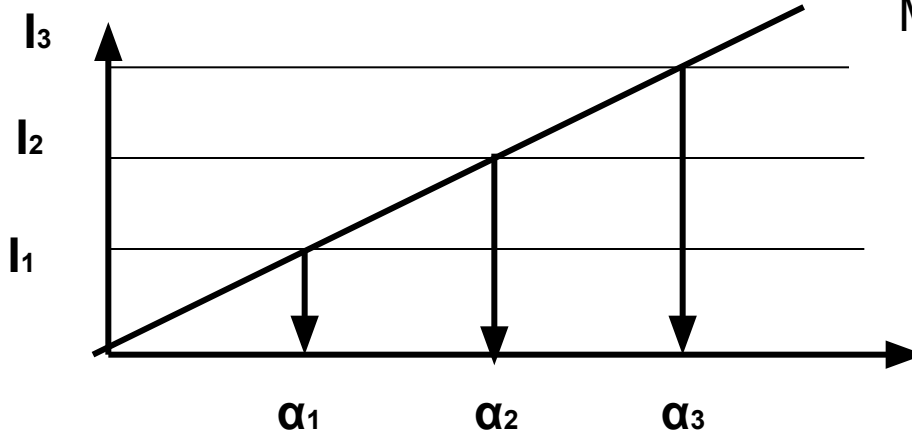
чувствительность
по току

$$S_U = \frac{BSU}{KR_{\text{в}}}$$

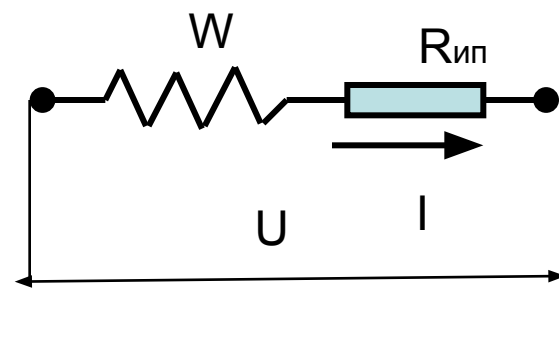
чувствительность
по напряжению

$$\alpha = \frac{BSWI}{K}$$

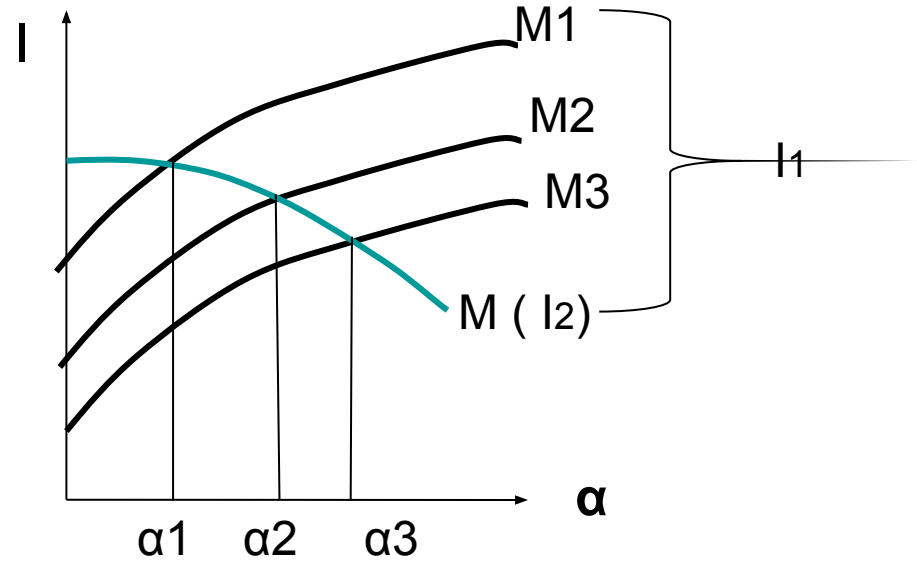
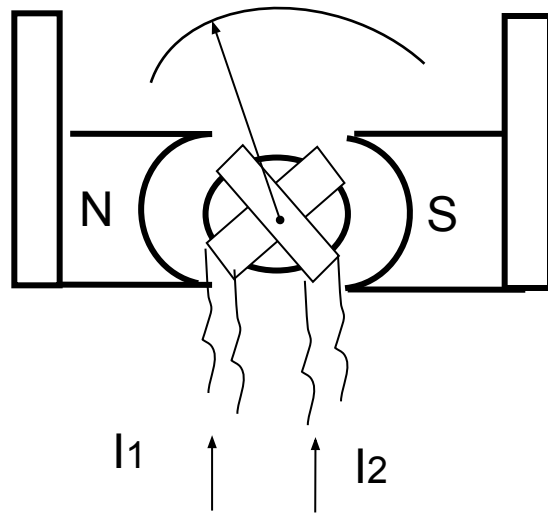
$M_{\text{вр}}$



$M_{\text{пр}}$



Логометры магнитоэлектрической системы



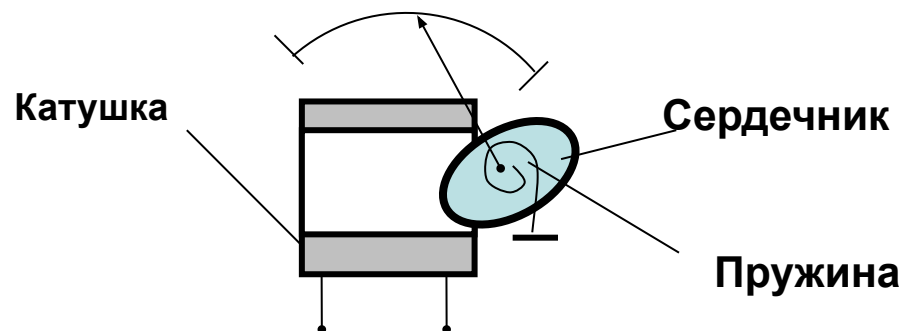
Электрокинетическая энергия рамок с током в поле постоянного магнита

$$W_1 = \phi_1(\alpha) I_1 \quad W_2 = \phi_2(\alpha) I_2,$$

Моменты, создаваемые рамками

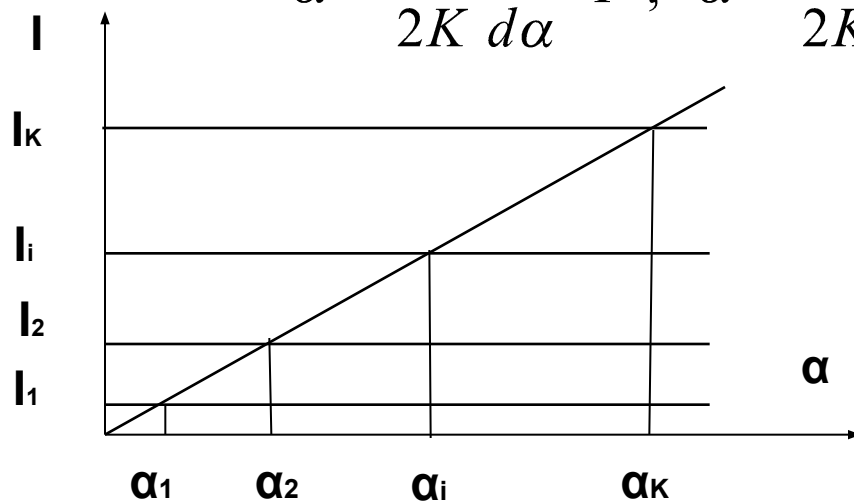
$$\dot{I}_1 = \frac{d\phi_1(\alpha)}{d\alpha} I_1, \quad \dot{I}_2 = \frac{d\phi_2(\alpha)}{d\alpha} I_2, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{d\phi_2(\alpha)}{d\alpha} / \frac{d\phi_1(\alpha)}{d\alpha} = f(\alpha), \quad \alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

Устройство, уравнение шкалы и основные характеристики приборов электромагнитной системы



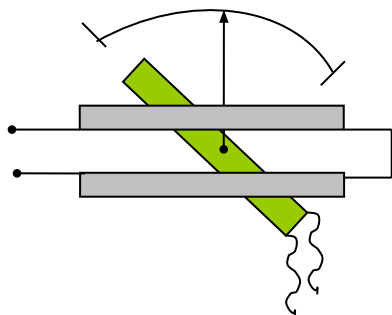
Уравнение шкалы электромагнитного прибора

$$\alpha = \frac{1}{2K} \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2; \quad \alpha = \frac{1}{2K} \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{U^2}{R_{II}^2}$$



Устройство, уравнение шкалы и основные характеристики приборов электродинамической системы

$$W_{эм} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2 \quad M_{вр} = 0,5 I_1^2 \frac{dL_1}{d\alpha} + 0,5 I_2^2 \frac{dL_2}{d\alpha} \pm I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

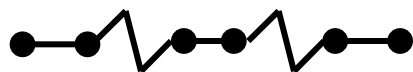
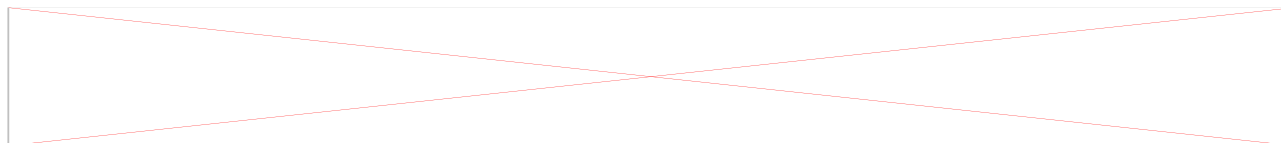


$$L_1, L_2 = \text{const}$$

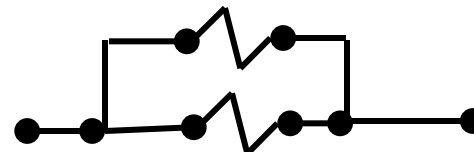
$$\text{При } M_{вр} = M_{пр} = K \cdot \alpha$$

$$\alpha = \frac{1}{K} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2$$

$$\text{При } i_1(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \phi_1), \quad i_2(t) = I_{2m} \sin(\omega t + \phi_2),$$



$$\alpha = S I_1 I_2$$

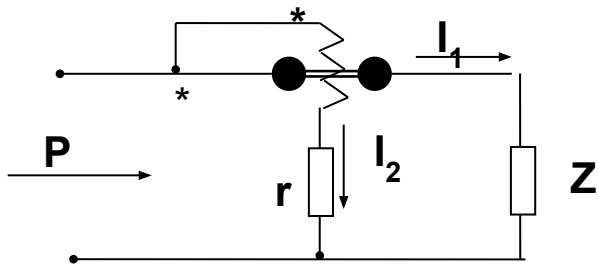


$$\alpha = S I_1 I_2 \cos \varphi_{12}$$

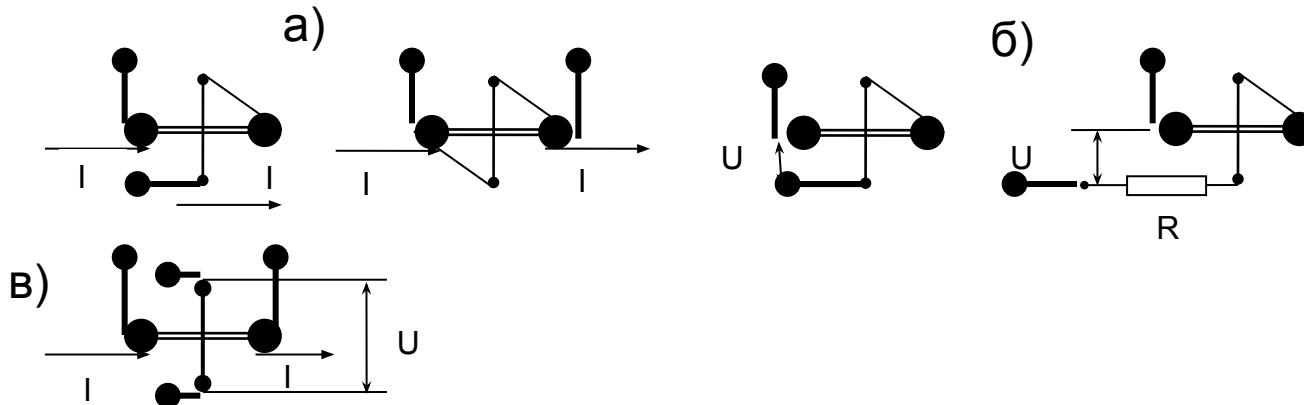
Электродинамический ваттметр

Уравнение шкалы

$$\alpha = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 \frac{U}{r}, \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{1}{k} \int_0^T u i dt$$



Соединение катушек электродинамического прибора для работы его в качестве:
а) амперметра, б) вольтметра, в) ваттметра



Счётчик активной энергии

В последовательном электромагните – ток потребителей энергии .

Магнитный поток Φ_{mi} в сердечнике пропорционален току I ,

В параллельном электромагните – ток I_u

Магнитный поток Φ_{mu} в сердечнике пропорционален напряжению U

Два магнитных потока в диске создают $M_{вр} = K \Phi_m \Phi_{mu} i \sin \psi \quad \psi = 90^\circ$

$$M_{вр} = K_1 I U \cos \phi = K_1 P$$

Тормозной момент **создаётся потоком Φ_T тормозного магнита**

$$M_T = K_2 I_{в} \Phi_T$$

$I_{в}$ – вихревые токи в диске пропорциональны $E_{в}$ и скорости вращения диска n об/мин

$$I_{в} = E_{в} / r_d$$

Устройство, уравнение шкалы, применение приборов индукционной системы

$$M_{\text{а\ddot{o}}} = Kf\hat{O}_1\hat{O}_2 \sin \varphi \approx \hat{E}fI_1I_2 \sin \varphi$$

$$M_{\text{вр}} = kf\Phi_1\Phi_2 \sin \varphi$$

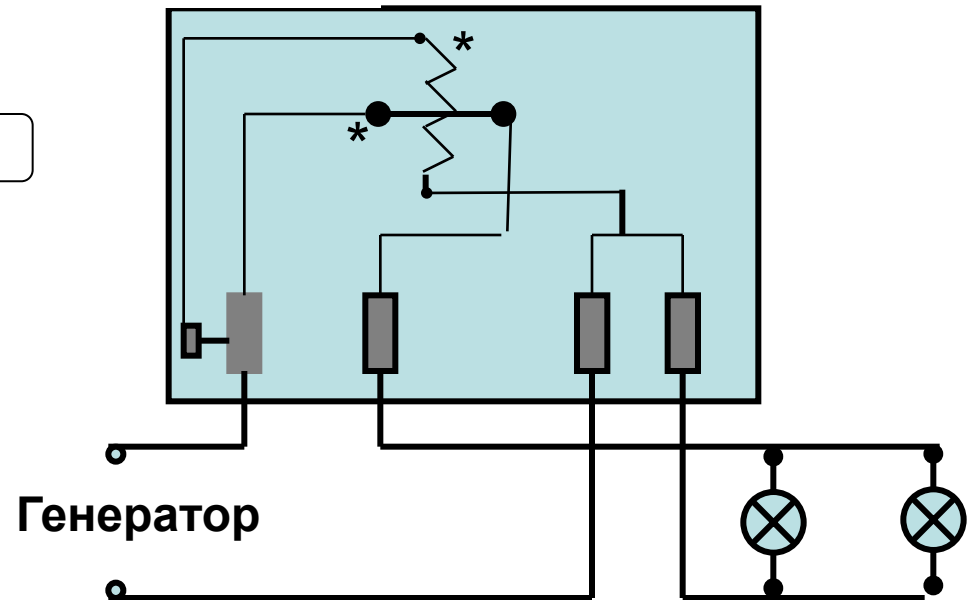
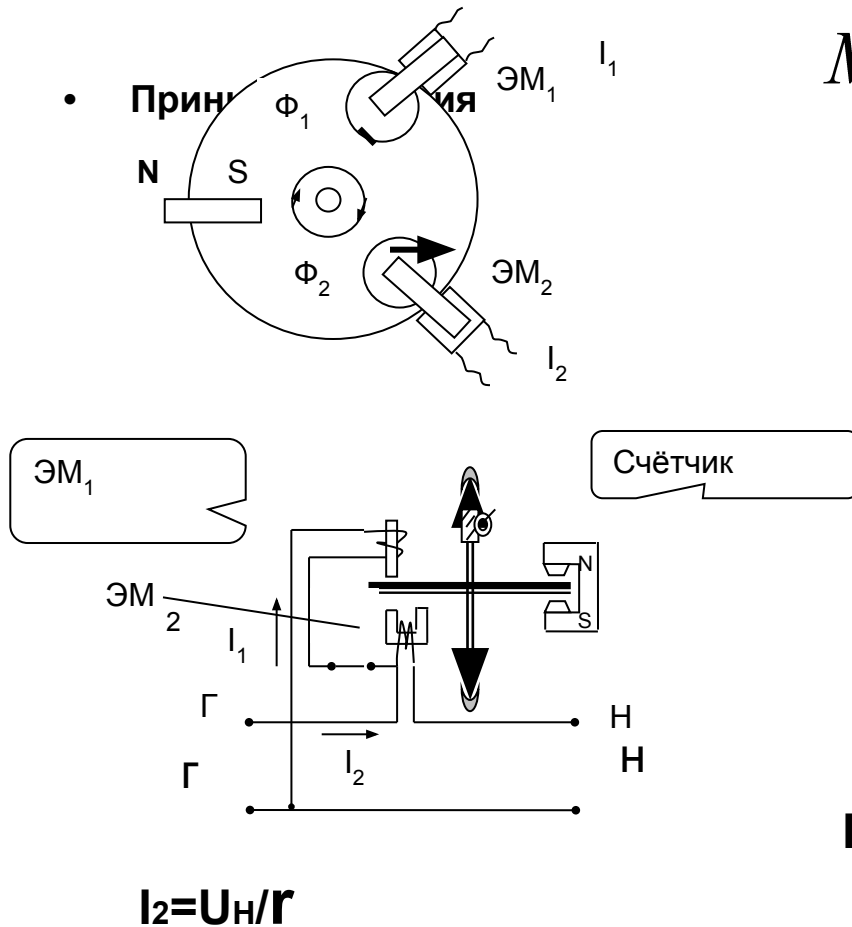


Схема включения счётчика активной энергии

Счётчик эл. энергии

$$M_{\hat{a}\hat{o}} = kf\hat{O}_U\hat{O}_I \sin \psi \quad \hat{O}_U \approx K_1 \frac{U}{Z_K} = \frac{U}{\omega L} = K \frac{U}{f}$$

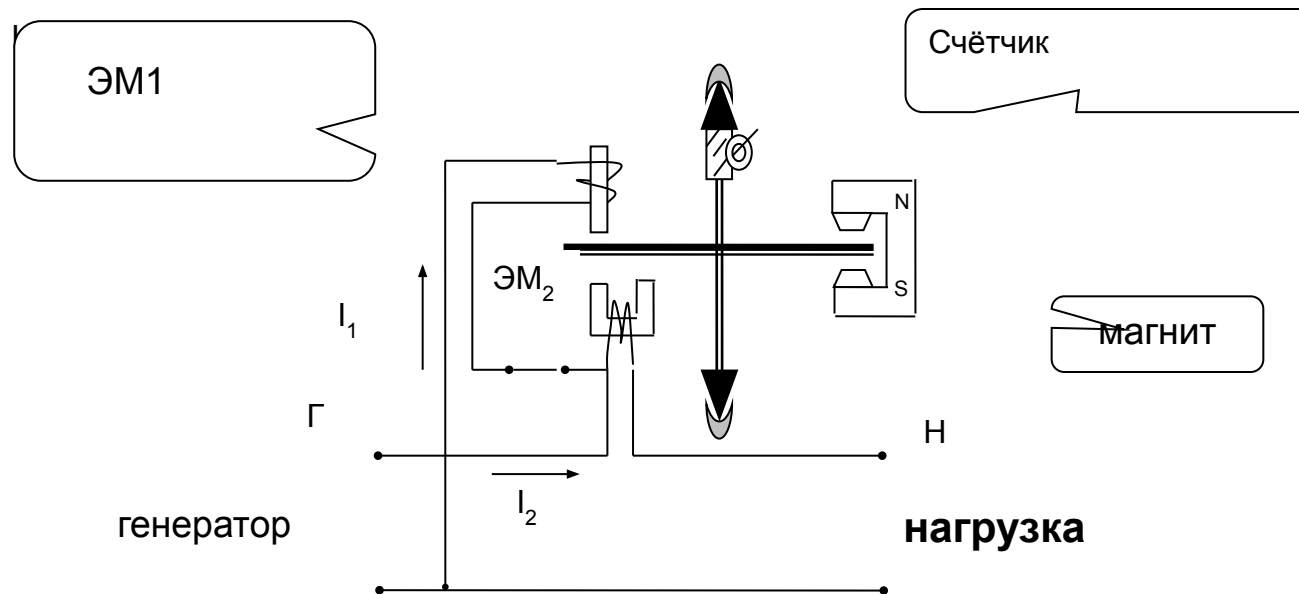
$$\hat{O}_I = KI \rightarrow \dot{I}_{\hat{a}\hat{o}} = \hat{e}UI \sin \psi = KP \quad \sin \psi = \cos \varphi$$

$$M_{\hat{O}\hat{I}\hat{D}\hat{I}} = k\hat{O}^2 \frac{d\alpha}{dt} = C \frac{d\alpha}{dt}$$

$$KP = C \frac{d\alpha}{dt} \quad K \int_{t1}^{t2} P dt = C \int_{t1}^{t2} d\alpha \quad \int_{t1}^{t2} d\alpha = 2\pi N \quad \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{o} \hat{i} \hat{a}$$

$$\hat{o} \hat{i} \hat{a} \hat{a} \hat{a} \quad P dt = W \quad KW = CN \quad W = K^{\dagger} N \quad C = \frac{\hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{o} \hat{i} \hat{a}}{\hat{e} \hat{a} \hat{o} \div \hat{a} \hat{n}}$$

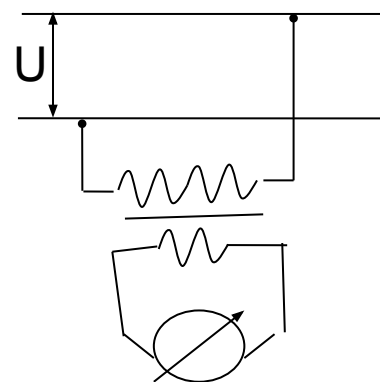
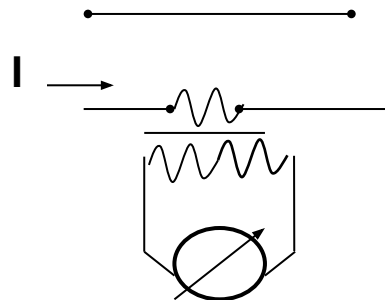
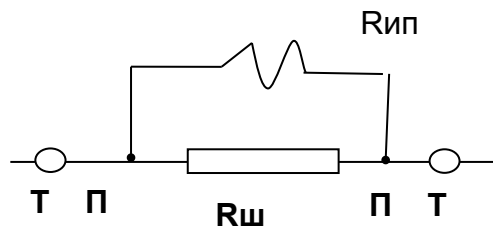
Схема включения счётчика активной энергии



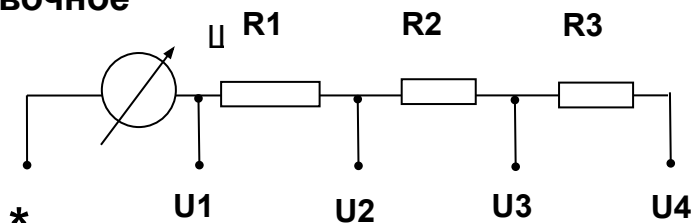
Измерение тока и напряжения аналоговыми приборами

Измерительные преобразователи амперметров и вольтметров

Шунт



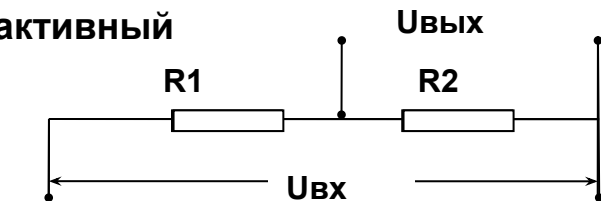
R добавочное



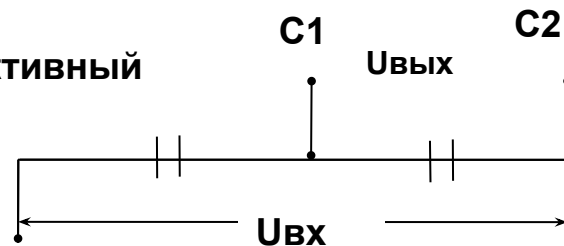
трансформаторы тока и напряжения

Делители напряжения

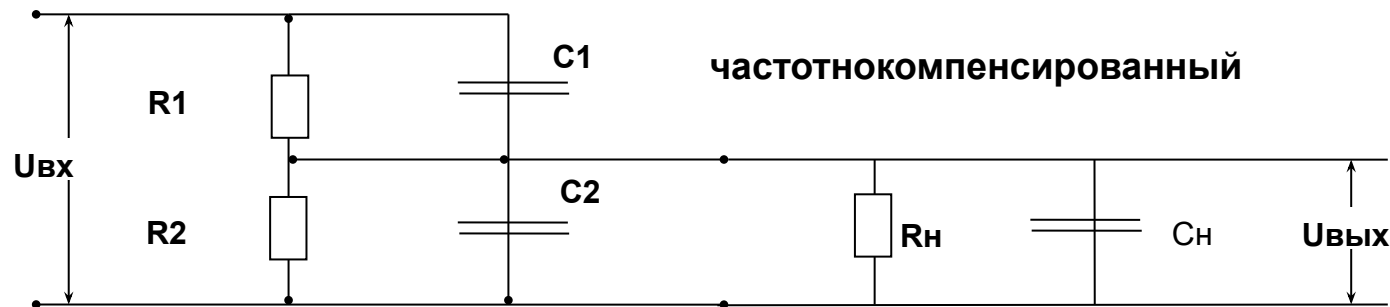
активный



реактивный

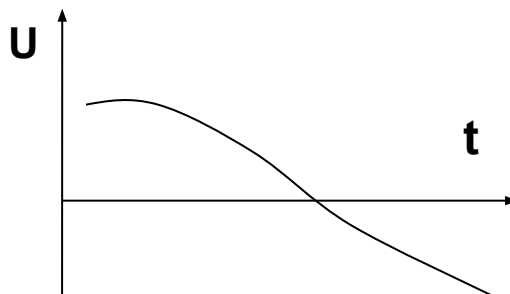


частотнокомпенсированный

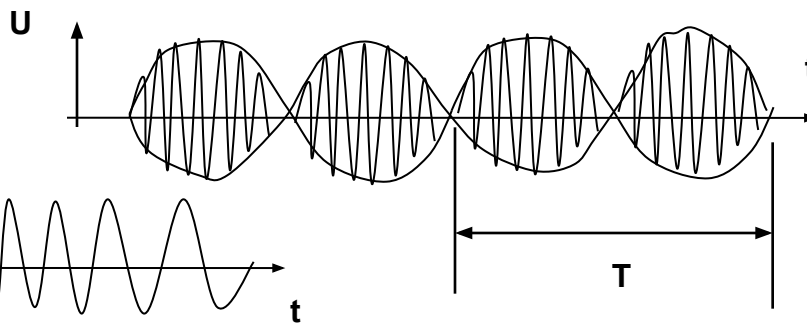
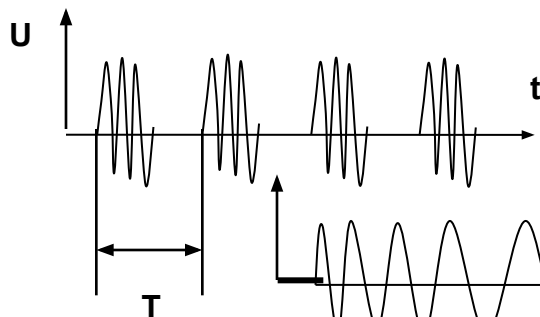
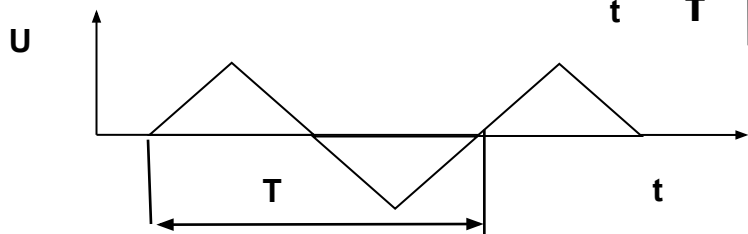
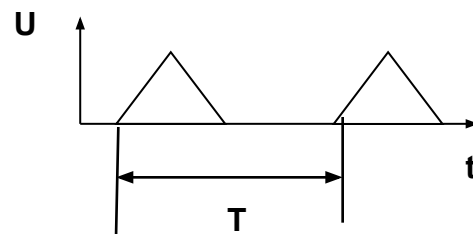
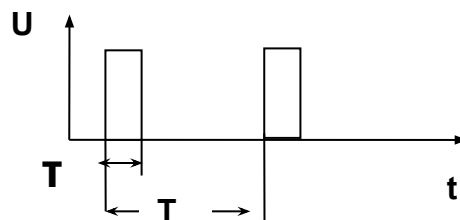
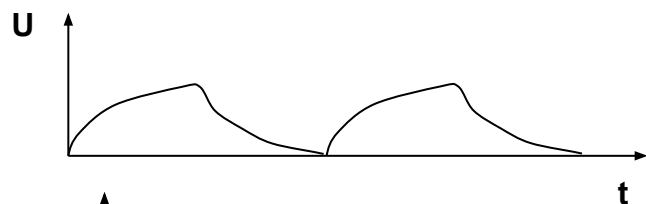


Виды измерительных сигналов.

Сигналы постоянного тока



Периодические сигналы:



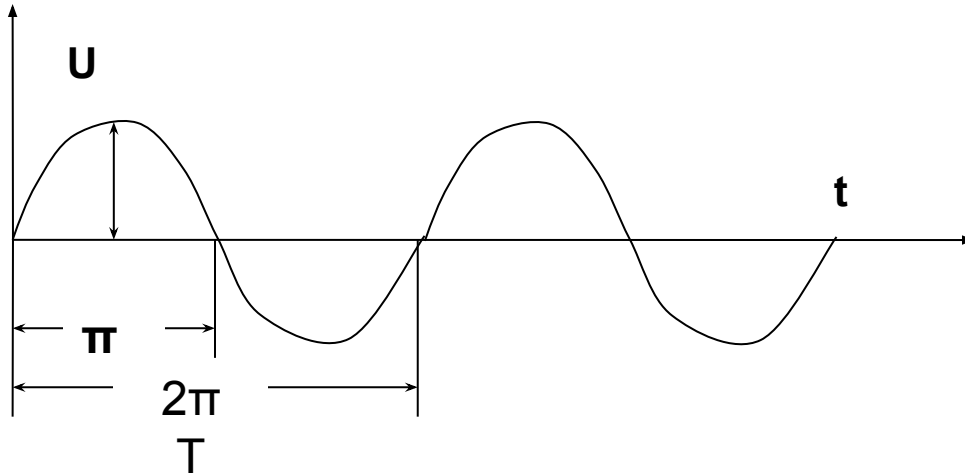
видео

Радио

Виды измерительных сигналов.

Синусоидальные (гармонические) сигналы

$$u = U_m \sin(2\pi f t + \phi).$$



Несинусоидальные сигналы

$$u = U_0 + \sum_{K=1}^n U_{mk} \sin(\omega t + \varphi_K).$$

к - гармоники

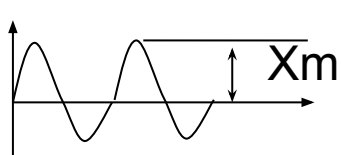
Интегральные оценки периодических сигналов

$$U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = U_0, \quad U_{CPB} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt},$$

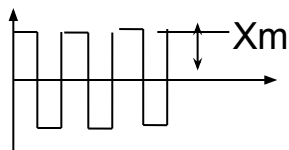
Для несинусоидального сигнала

$$U = \sqrt{\sum_{K=1}^n U_K^2}$$

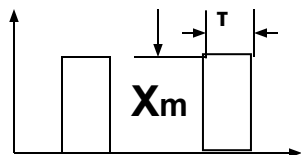
Таблица интегральных характеристик сигналов



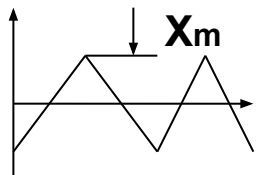
$$X_{CB} = \frac{2X_m}{\pi}, \quad X = \frac{X_m}{\sqrt{2}}, \quad X = 0,71X_m, \quad X_{CB} = 0,64X_m, \quad X = 1,11X_{CB}$$



$$X_{CB} = X_m, \quad X = X_m$$



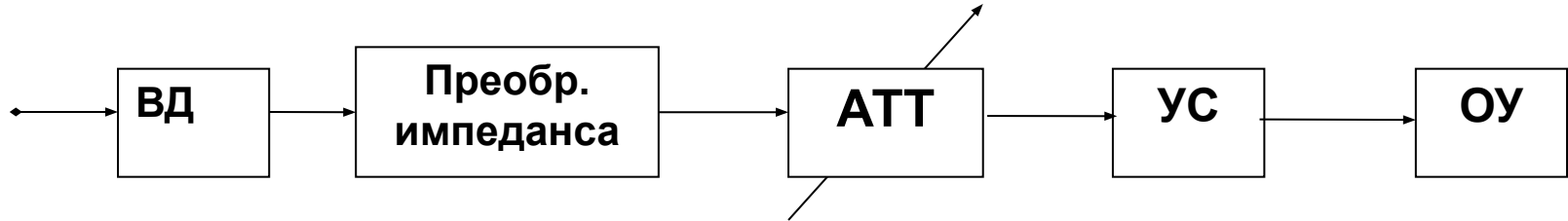
$$X_C = \frac{\tau}{T} \tilde{O}_m, \quad X = \sqrt{\frac{\tau}{T}} X_m$$



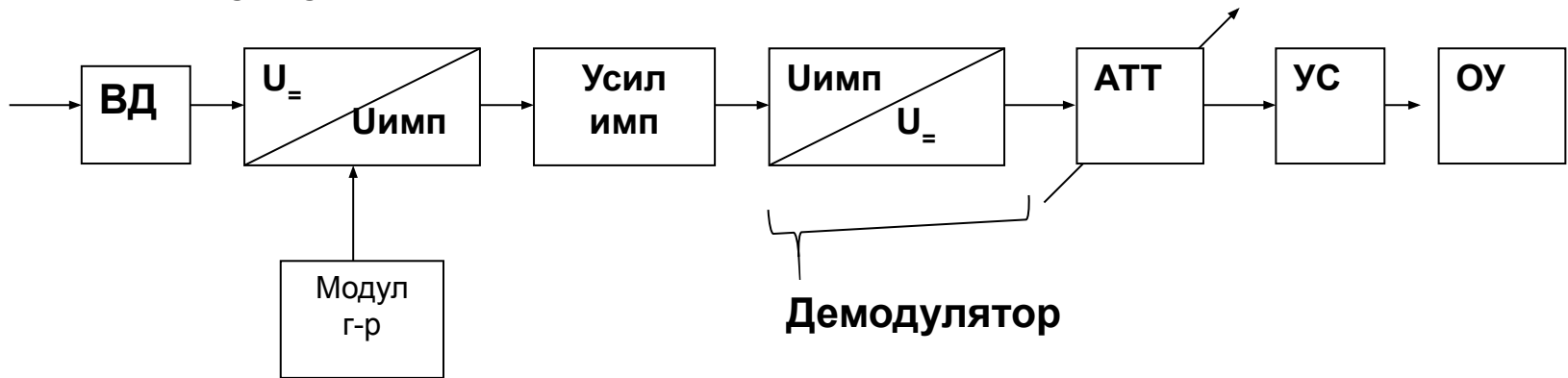
$$X_{CB} = 0,5X_m, \quad X = \frac{X_m}{\sqrt{3}}, \quad X = 0,58X_m$$

Структурные схемы вольтметров

Структурная схема вольтметра постоянного тока. (В2)



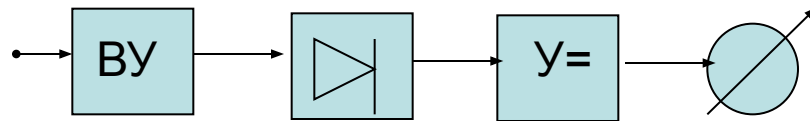
Структурная схема милливольтметра постоянного тока



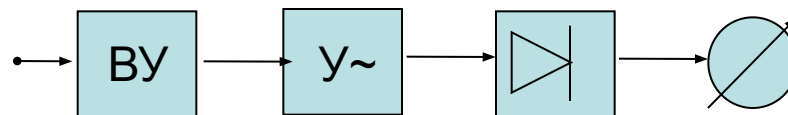
Электронные вольтметры переменного напряжения

структурные схемы электронных вольтметров

вольтметр типа входное устройство - детектор – усилитель - измеритель;

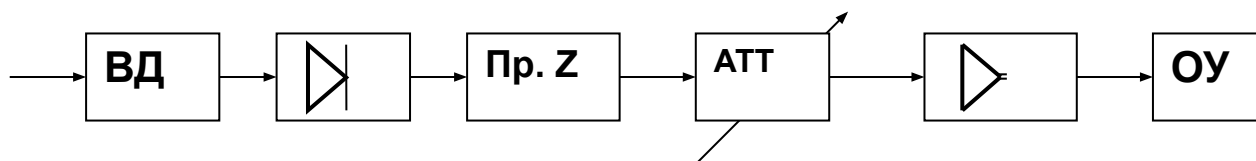


вольтметр типа входное устройство - усилитель – детектор – измеритель

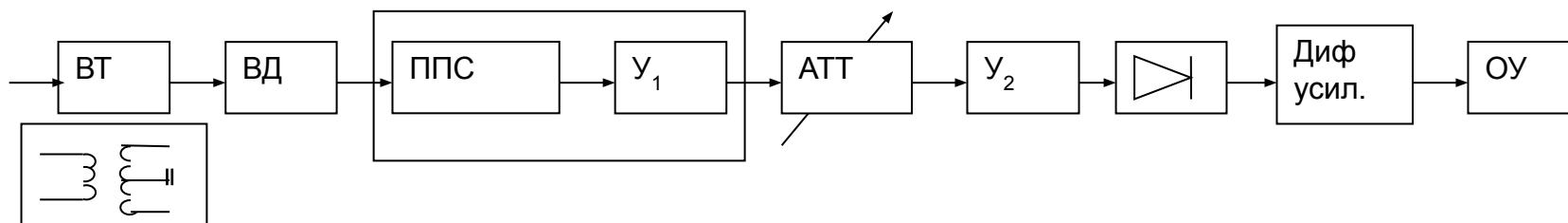


Вольтметры переменного тока (ВЗ)

Структурная схема вольтметра типа ВЗ



Милливольтметры переменного тока

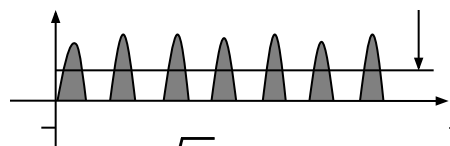
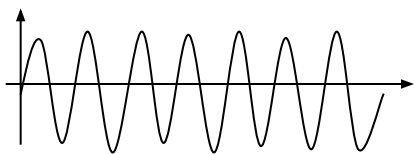
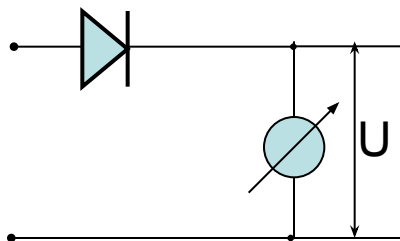


Детекторы средневывпрямленного значения напряжения

для гармонического сигнала

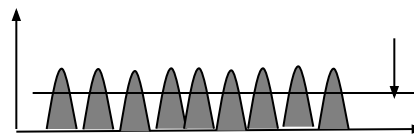
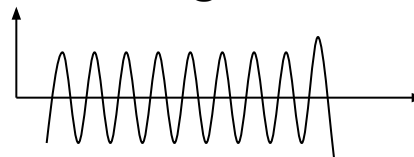
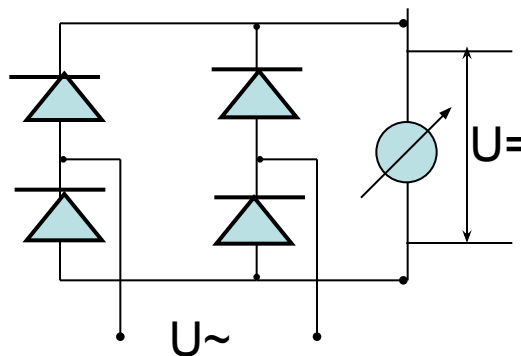
$$I_{\tilde{n}\hat{a}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}I}{\pi},$$

откуда
$$I = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot I_{\tilde{n}\hat{a}} = 1,11 \cdot I_{\tilde{n}\hat{a}}$$



U_{CB}

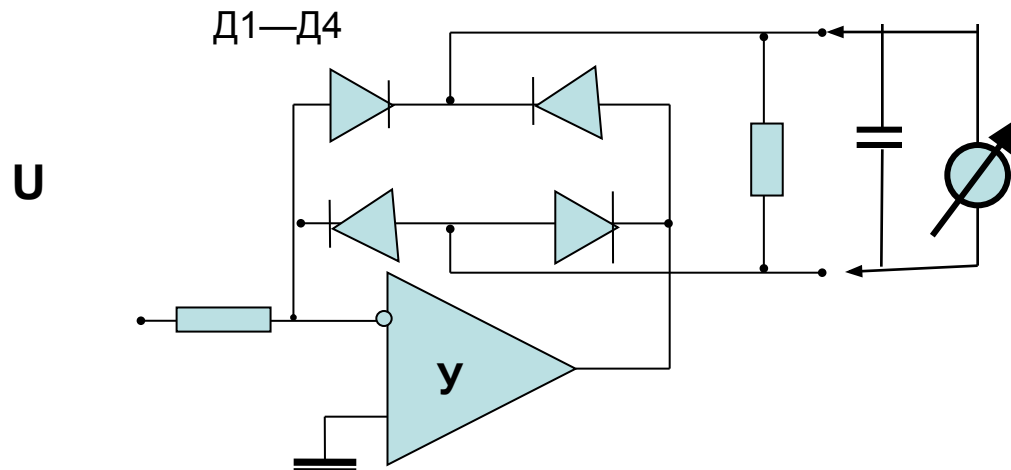
$$U_{\tilde{A}} = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} = 0,45U$$



$$U_{\tilde{A}} = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} = 0,9U$$

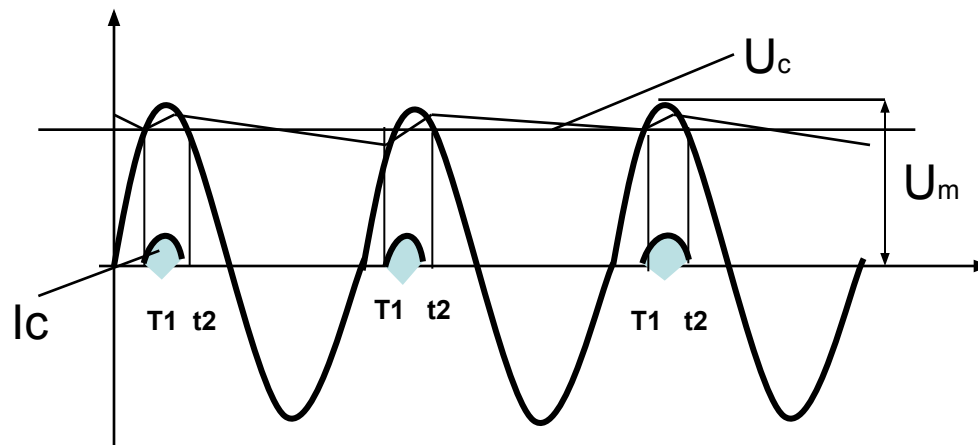
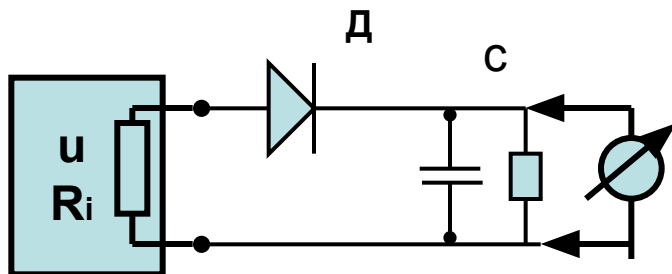
U_{CB}

Активные преобразователи средневывпрямленного значения напряжения



детекторы амплитудных вольтметров.

Детектор с открытым входом



$$T_{зар} = (R_i + R_D)C \quad T_{раз} = RC \quad \text{за интервал } t_2 - t_1$$

$$T_{зар} < 1/f_B \quad T_{раз} > 1/f_H \quad T_{зар} < T_{раз} \quad U_{пик} = U_m \cos \theta$$

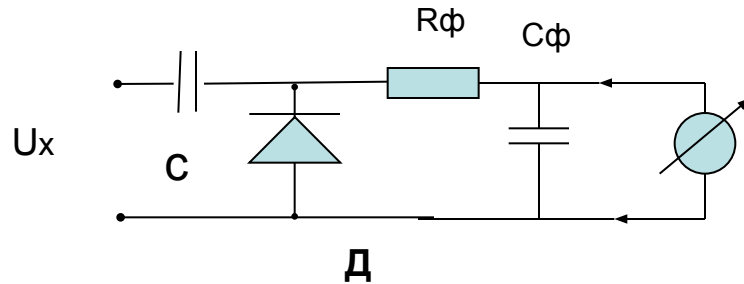
θ - угол осечки тока диода

$$\theta = \sqrt[3]{3\pi(R_i + R_{\ddot{A}})/R_H}$$

$$R_{вху} = 10 \text{ Мом}, R_D = 1 \text{ кОм}$$

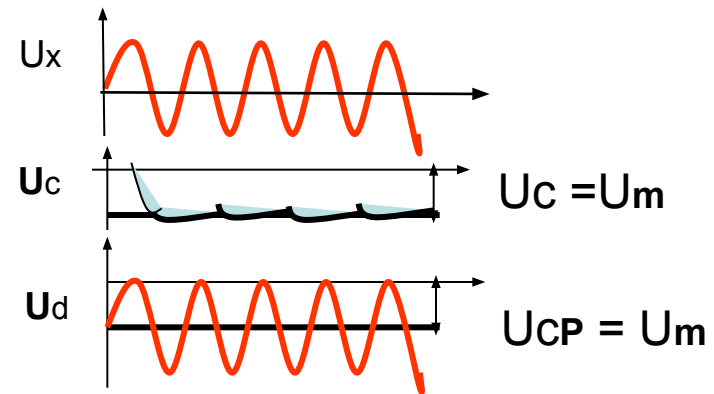
$$\theta \approx 0,1 \text{ град} \quad \cos \theta = 0,99 \quad U_{пик} = 0,99 U_m$$

Амплитудный детектор с закрытым входом



Процесс преобразования переменного напряжения в постоянное аналогичен

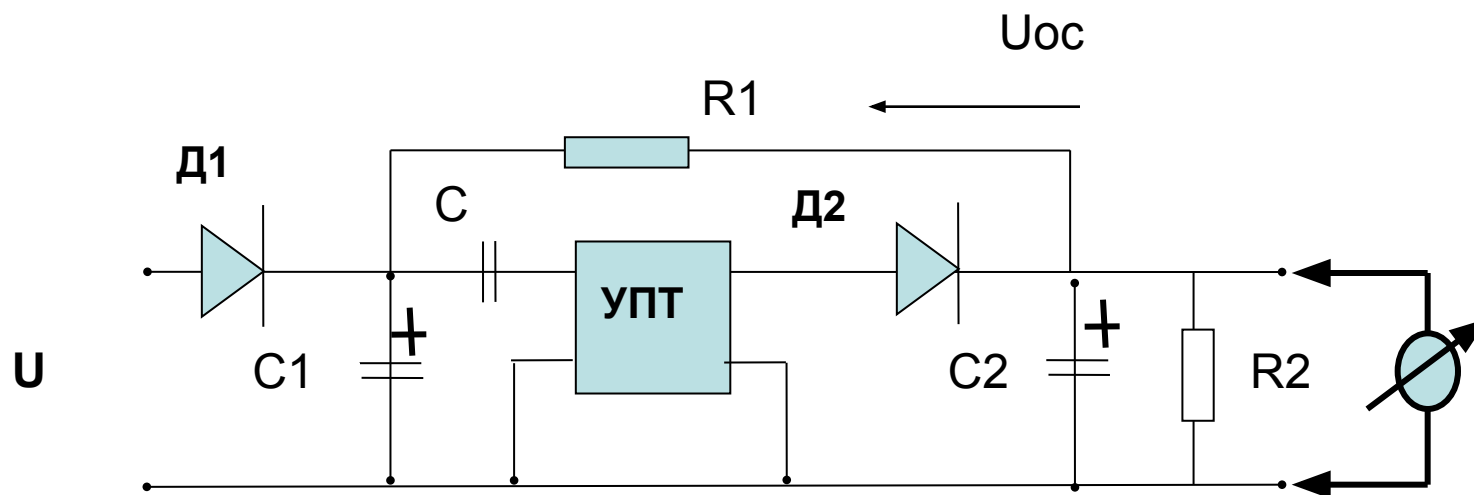
Отличие в наличии переменной составляющей, которую надо фильтровать



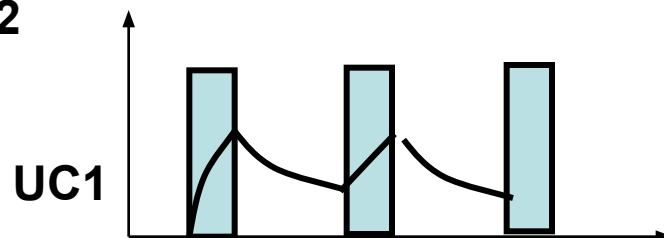
$$U_{\tilde{o}} = U_m \sin \omega t, \quad U_c = U_m$$

$$U_d = U_x - U_c = U_m \sin \omega t - U_m.$$

Автокомпенсационные вольтметры



$C1 < C2$



Принцип автокомпенсации

- Измеряемое напряжение преобразуется компенсирующее
- Входной импульс через диод заряжает конденсатор $C1$ до значения $U_{C1} \sim U_{\text{пик}}$ за счёт малой $T_3 = R_d C1 \sim T_{\text{имп}}$
- Переменная составляющая U_c усиливается и через диод заряжает конденсатор $C2$, которое через резистор R поступает на конденсатор $C1$ в качестве компенсирующего. При этом уменьшается до нуля переменная составляющая.
- Напряжение U_{C2} - измеряется

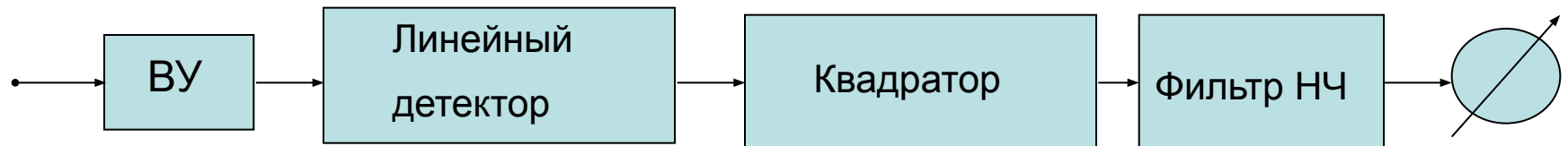
Преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения (ПСКЗ).

Детектор среднеквадратического значения напряжения

$$i = au + bu^2, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt}, \quad u = u(t) = U_m \sin \omega t,$$

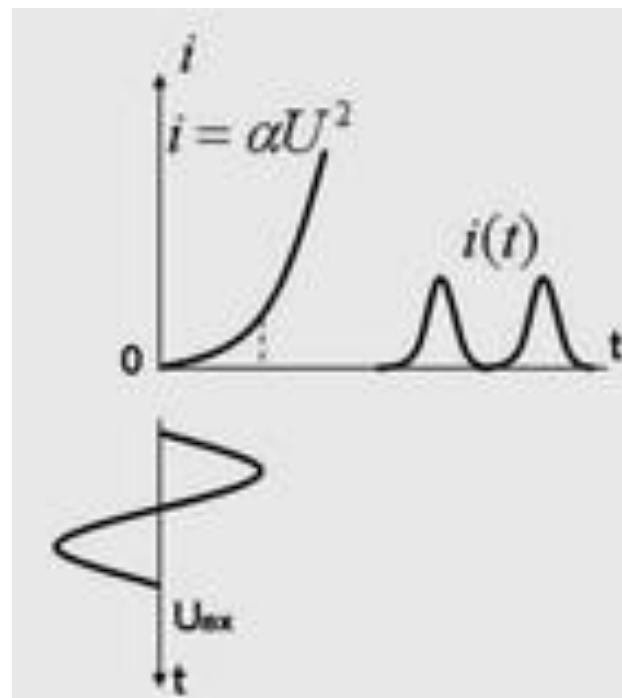
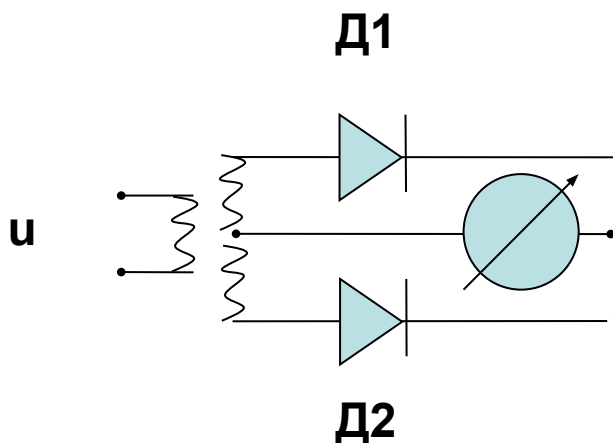
$$i = a \cdot U_m \sin \omega t + bU_m^2 \sin^2 \omega t = a \cdot U_m \sin \omega t + bU_m^2 (1 - \cos 2\omega t).$$

Структурная схема вольтметра СКЗ

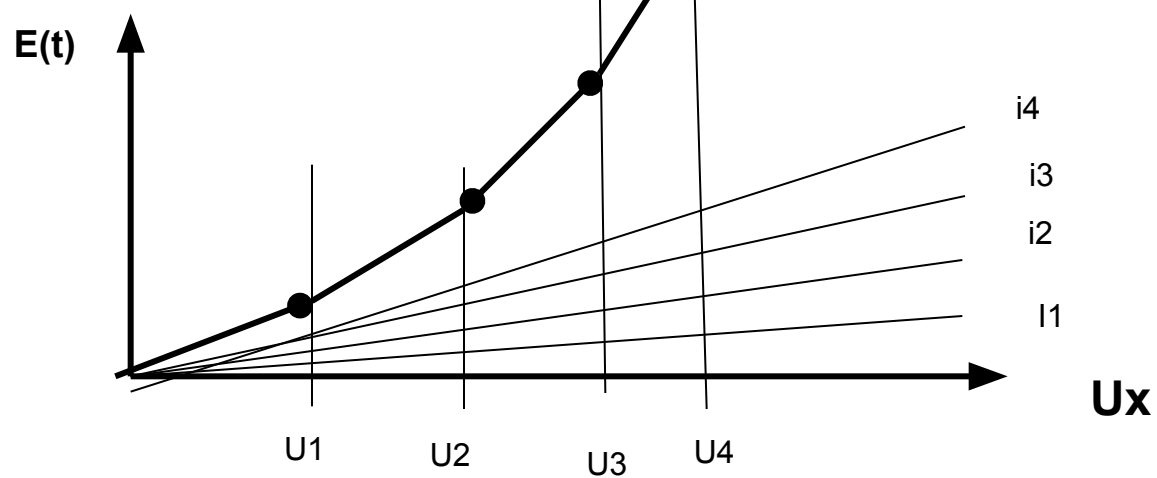
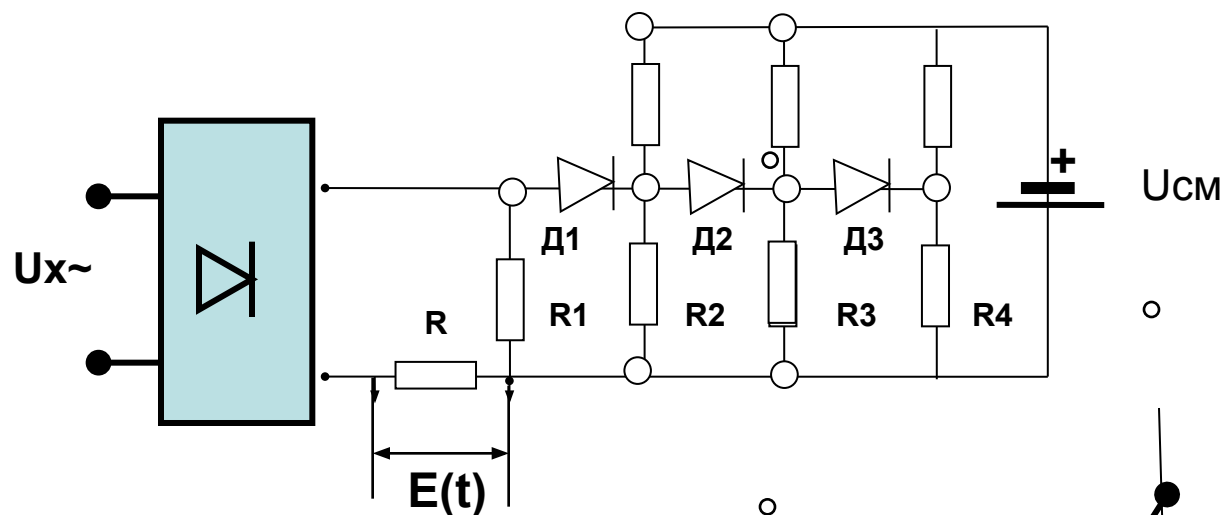


Виды преобразователей СКЗ с квадратичной ФП.

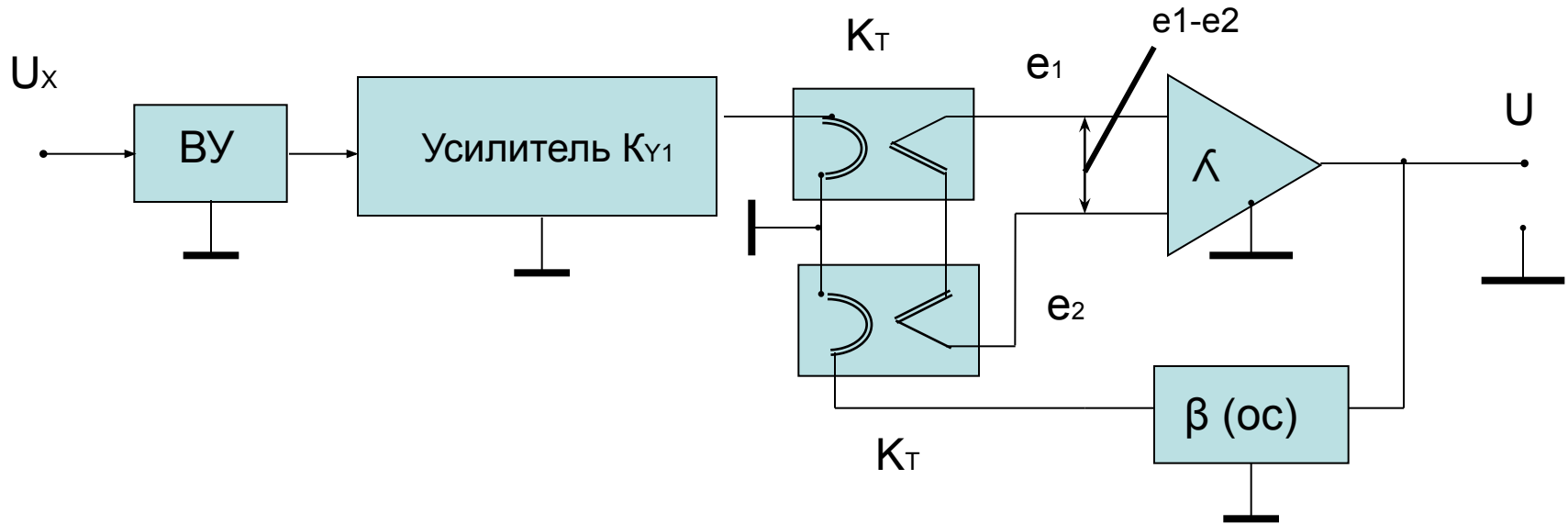
а) с квадратичными преобразователями по мгновенным значениям, в которых используются элементы с естественными нелинейными вольтамперными характеристиками;



Квадраторы с линейной сегментной (кусочной) аппроксимацией



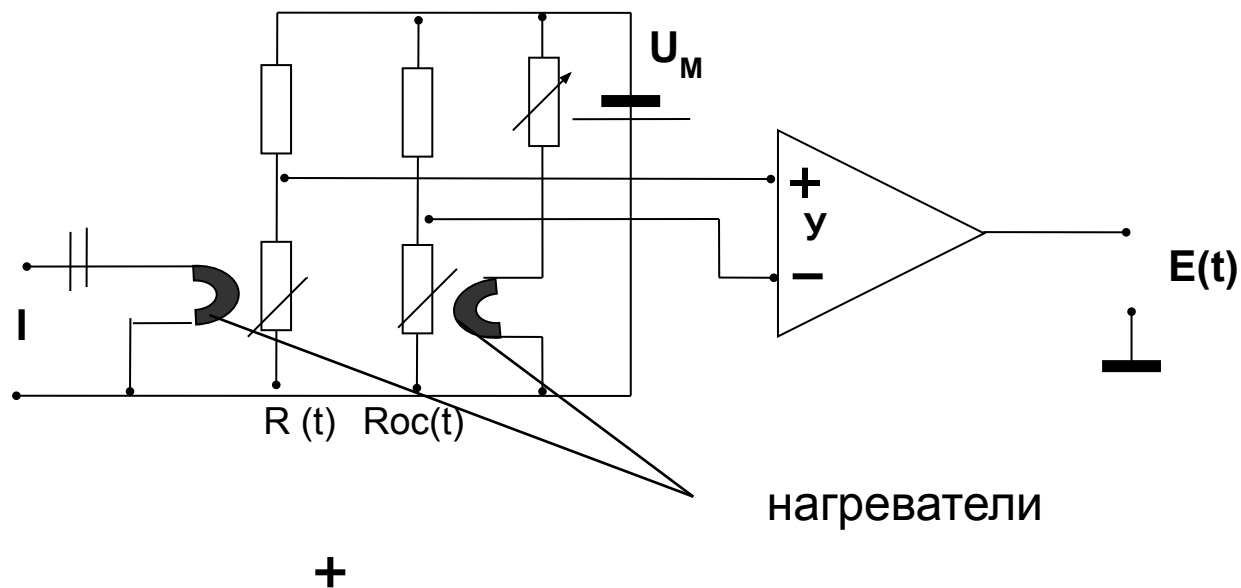
Линейный преобразователь СКЗ



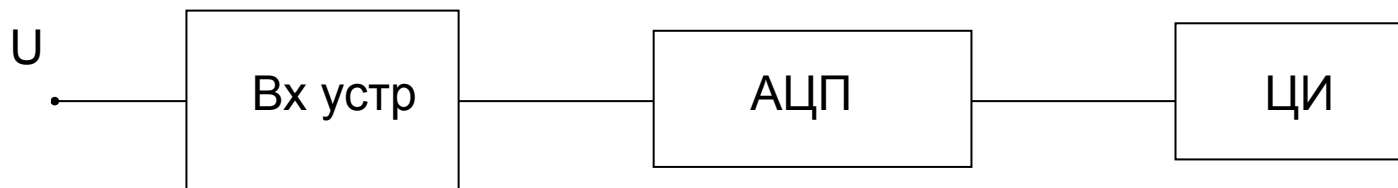
$$e_1 = \alpha_1 U_x^2, \quad e_2 = \alpha_2 (\beta U)^2 \quad U = k(e_1 - e_2)$$

$$U = \frac{1}{\beta} U \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$$

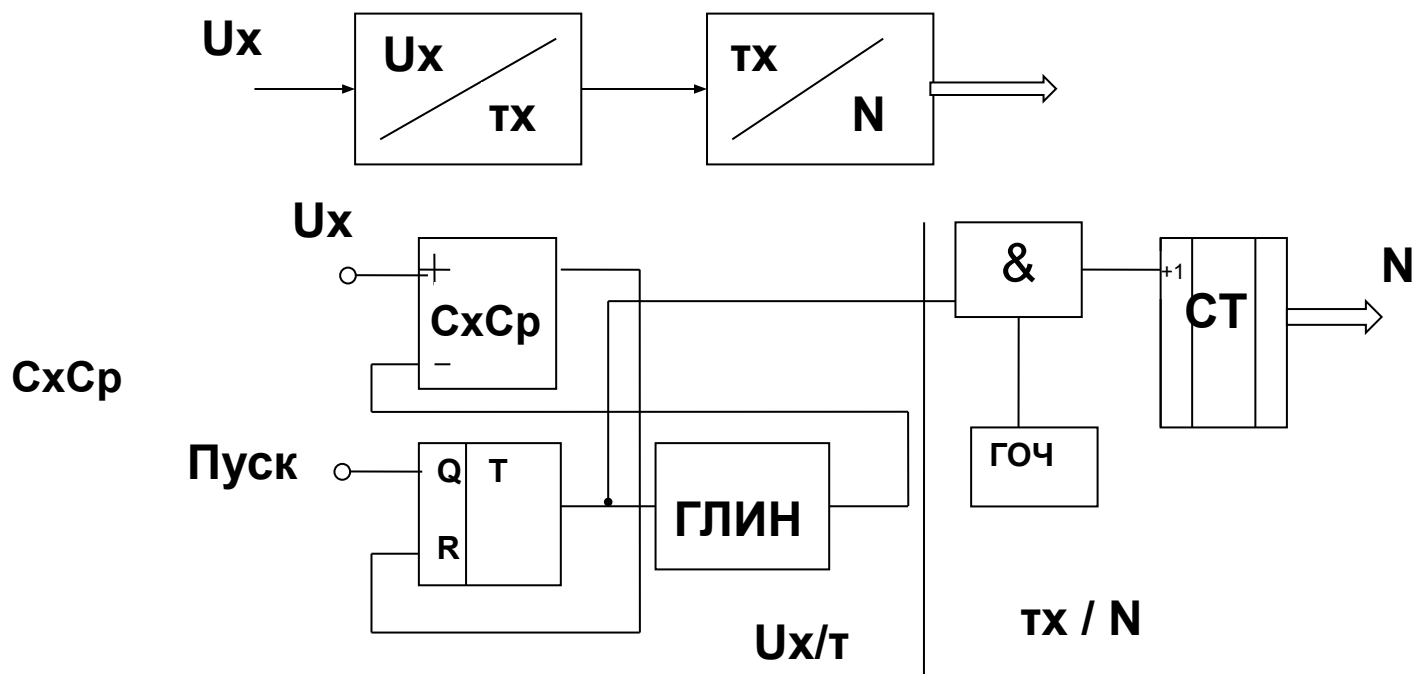
С промежуточным преобразованием электрической энергии в тепловую



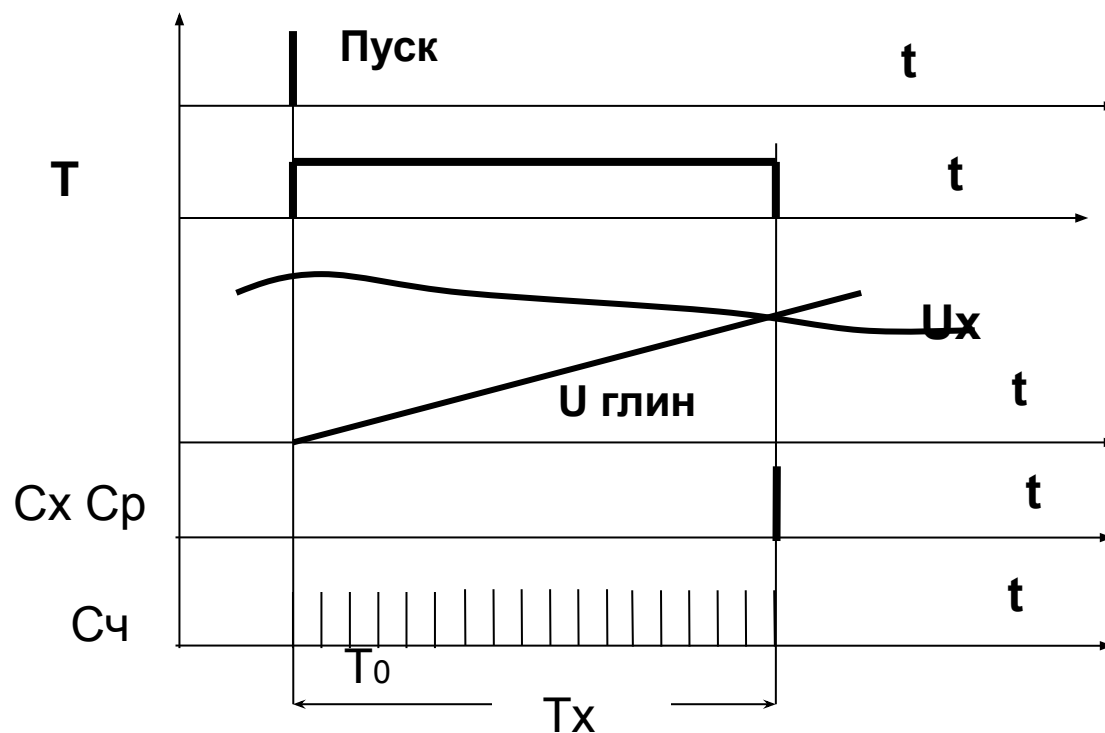
Цифровые электронные вольтметры



Цифровые вольтметры с времяимпульсным преобразованием



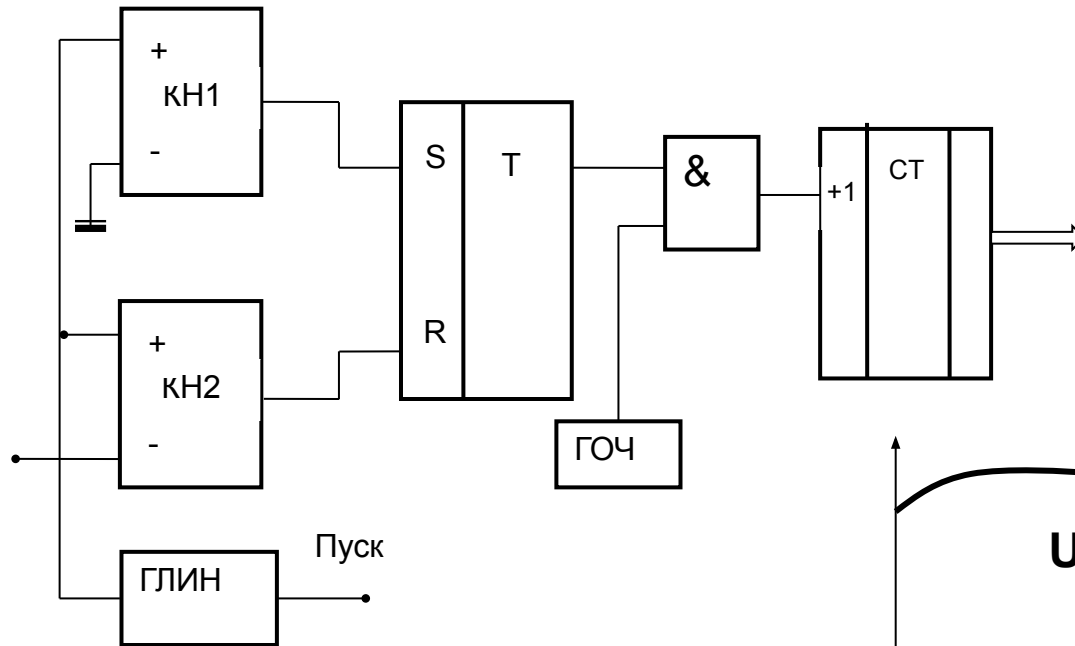
Цифровые электронные вольтметры



$$U_x = \operatorname{tg} \alpha \dot{O}_o = \frac{dU_o}{dt} \dot{O}_x.$$

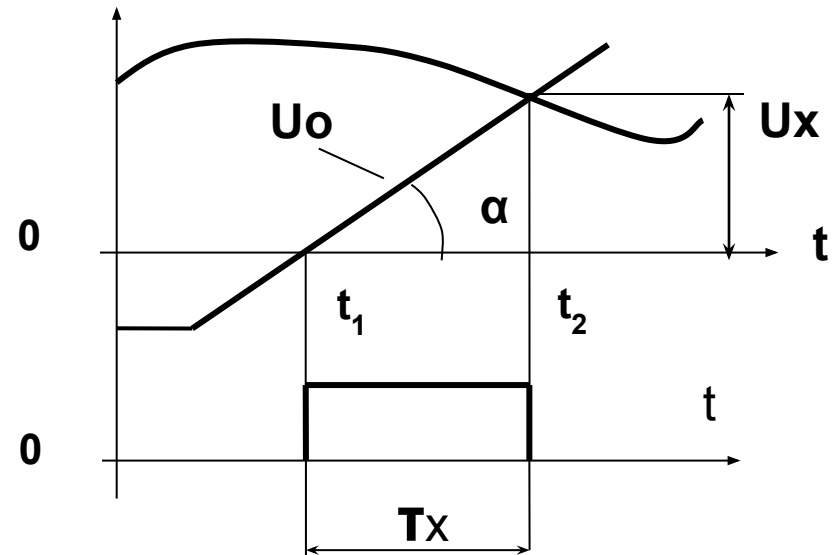
$$N = f_o \frac{U_x}{\operatorname{tg} \alpha} = f_o \cdot \dot{O}_x.$$

Схема двухкомпараторного АЦП.



$$U_x = \operatorname{tg} \alpha (t_2 - t_1) = \frac{dU_o}{dt} \tau_x.$$

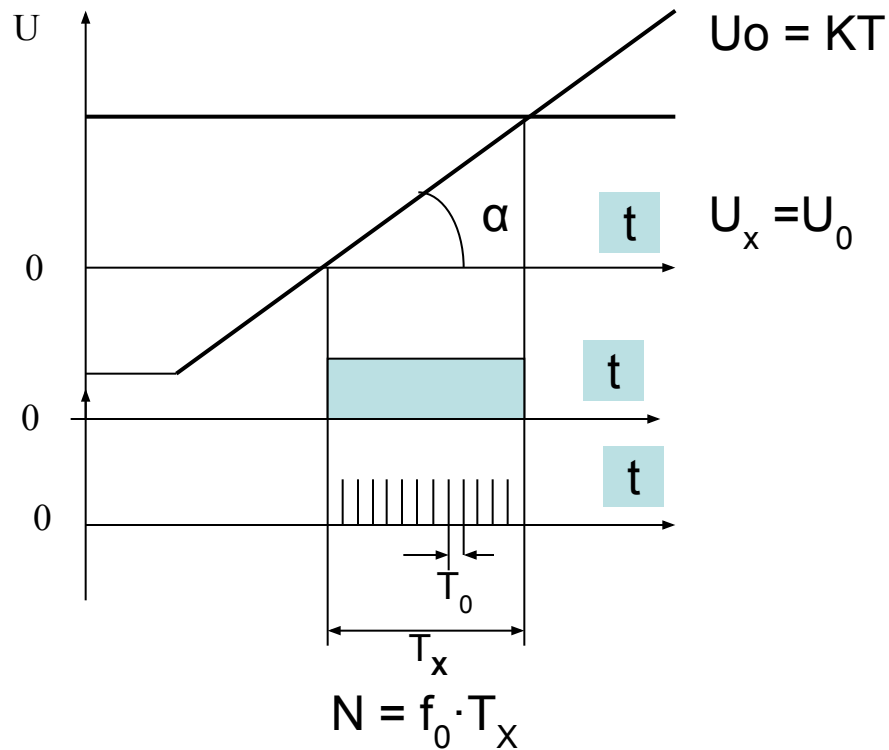
$$N = f_o \frac{U_x}{\operatorname{tg} \alpha} = f_o \cdot \tau_x.$$



Цифровые электронные вольтметры

$$U_x = \operatorname{tg} \alpha \dot{O}_0 = \frac{dU_0}{dt} \dot{O}_x.$$

$$N = f_0 \frac{U_x}{\operatorname{tg} \alpha} = f_0 \cdot \dot{O}_x.$$

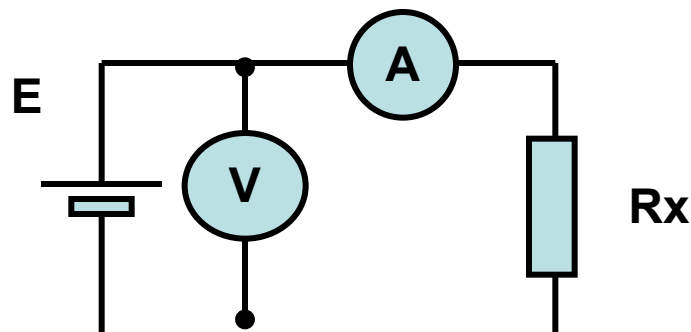
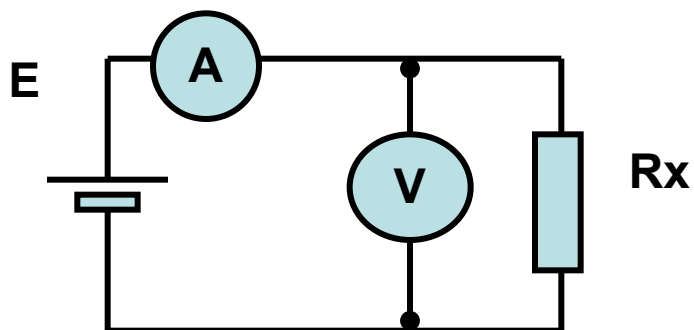


Измерение параметров цепей

Классификация методов измерения параметров цепей.

- Метод амперметра и вольтметра,
- Метод непосредственного измерения,
- Мостовой метод для измерения активных и реактивных параметров,
- Резонансный метод, резонансный с замещением,
- Метод преобразования параметра в эквивалентный ток и напряжение,
- Метод дискретного преобразования параметра, цифровой метод.

Метод амперметра - вольтметра

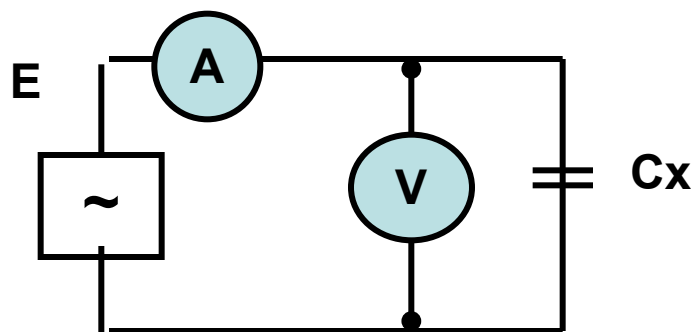


$$I_A = I_V + I_R \quad R = \frac{U_V}{I_V + I_R}$$

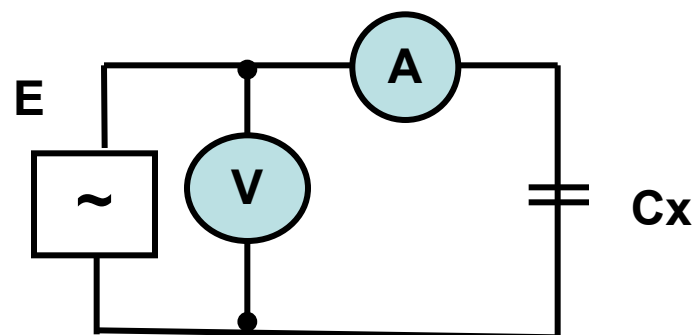
$$R_x \ll R_v$$

$$U_V = I(R_A + R_x) \quad R = R_A + R_x$$

$$R_x \gg R_A$$

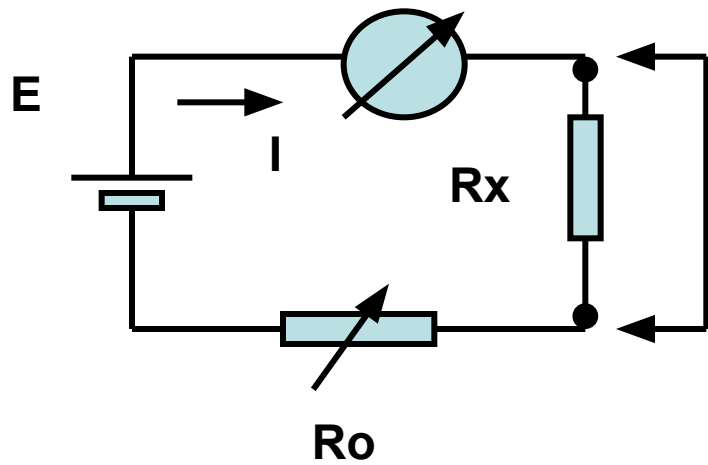


C_x большого
номинала ($X_c < R_v$)

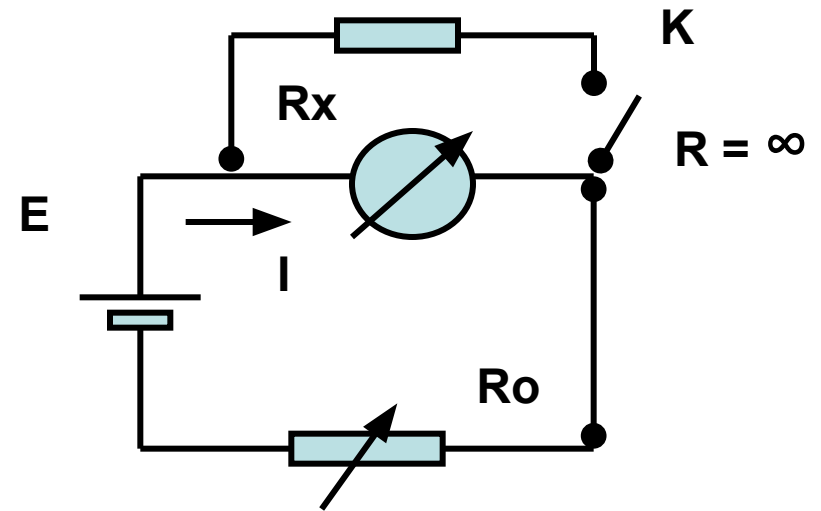
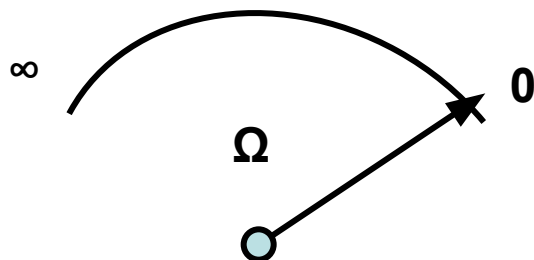


C_x малого
номинала ($X_c > R_A$)

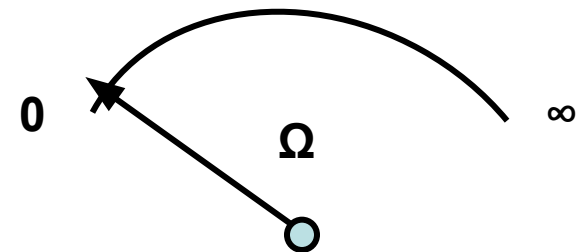
Метод непосредственного измерения сопротивления



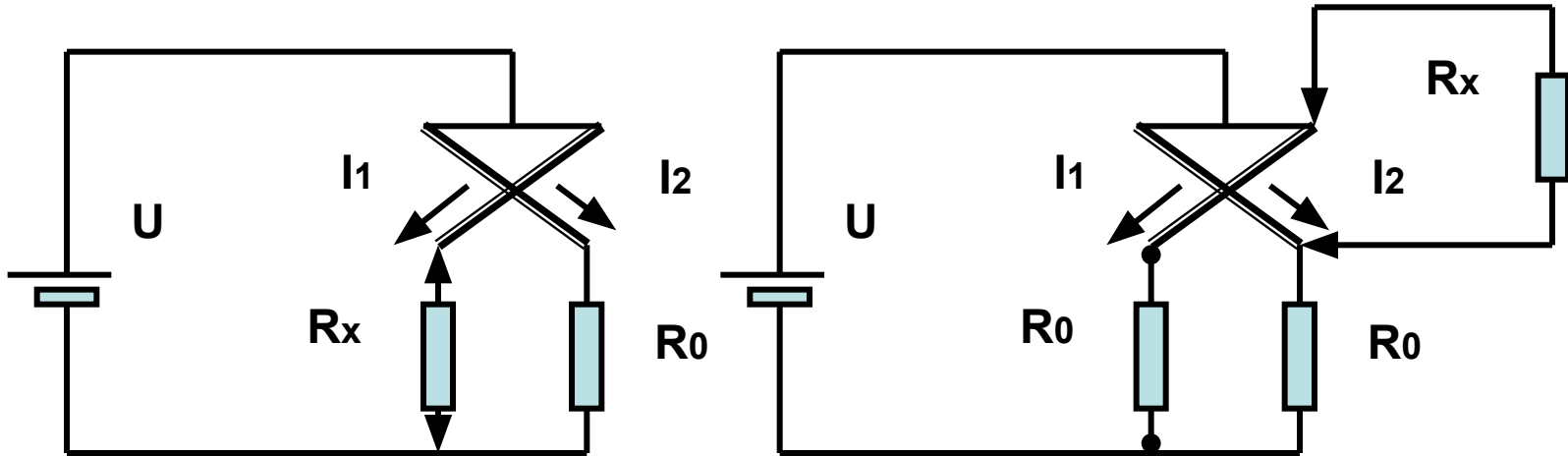
$R = 0$



$R = \infty$

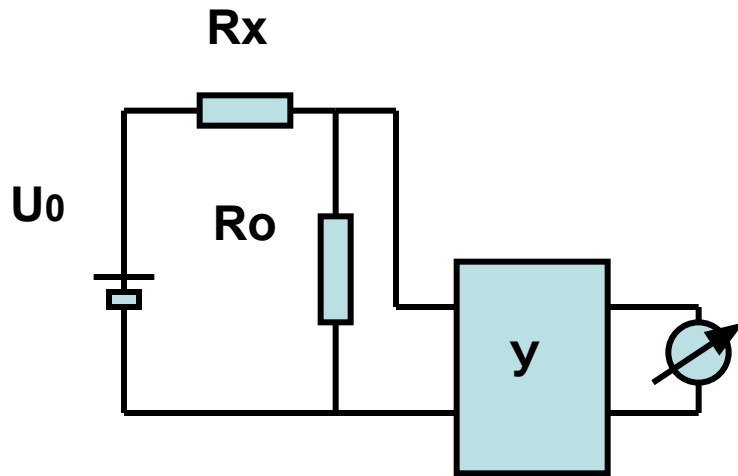


Омметр на основе логометра

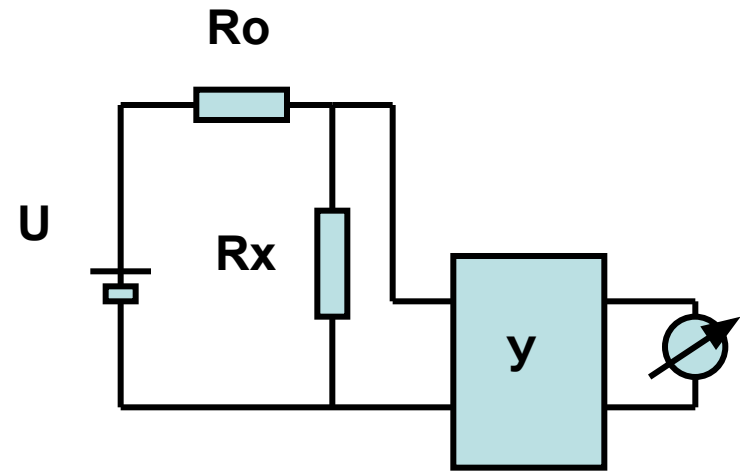


$$\alpha = K \frac{I_1}{I_2} = K \frac{R_x}{R_0}$$

Электронные омметры



$$R_x = \left[K \frac{U_o}{U_{\hat{U} \hat{o}}} - 1 \right] R_o$$



$$R_x \left[\frac{R_o}{K \frac{U_o}{U_{\hat{U} \hat{o}}} - 1} \right]$$

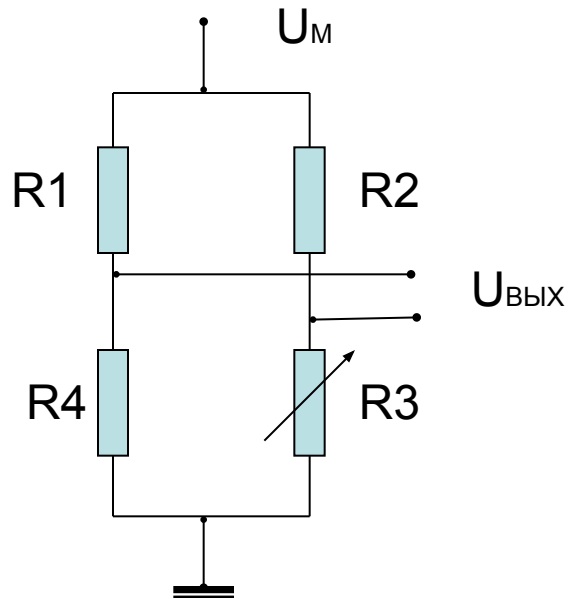
Мосты постоянного тока

Условие равновесия мостов постоянного тока

$$R1 \cdot R3 = R2 \cdot R4,$$

где $R1, R2, R3, R4$ – сопротивления плеч моста.

$R1/R2$ – плечи отношения, (масштабные), $R3$ – плечо сравнения.

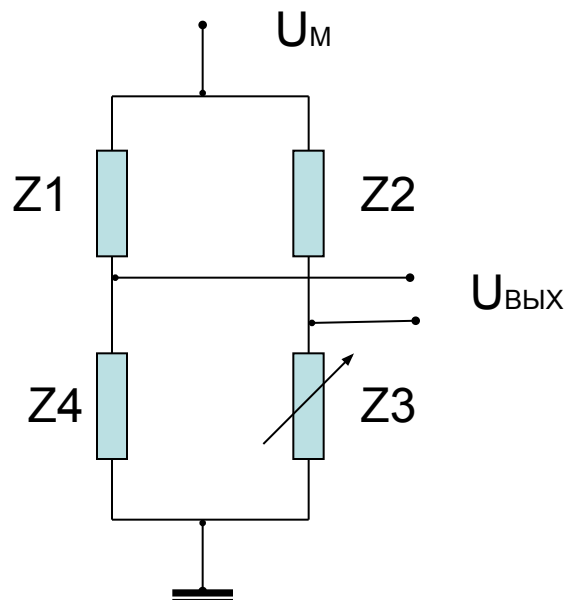


Одинарный мост

При $R4 = R_x$,

$$R_x = R3 \frac{R1}{R2}$$

Мосты переменного тока

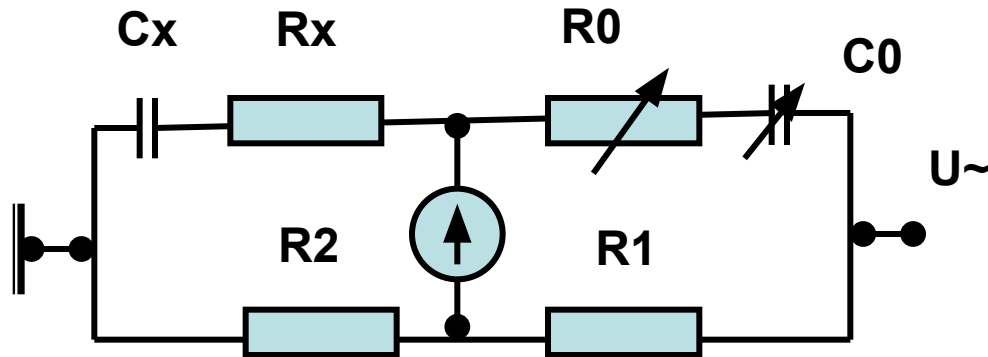


Баланс моста

$$\vec{Z} = Z \cdot e^{i\varphi}, \quad \vec{Z}_1 \cdot \vec{Z}_3 = \vec{Z}_2 \cdot \vec{Z}_4$$

$$a) \quad Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4, \quad b) \quad \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4.$$

Измерение ёмкости и угла потерь.



Полное сопротивление конденсатора

$$Z = r_c - j \frac{1}{\omega C} \quad \text{tg} \delta = \omega r_c C \quad (\text{і і ñ ě ä â î â ò ò ä ě ü í à Ÿ} \quad \text{ñ õ ã ì à} \quad \text{ç à ì à ù à í è Ÿ})$$

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_c C}$$

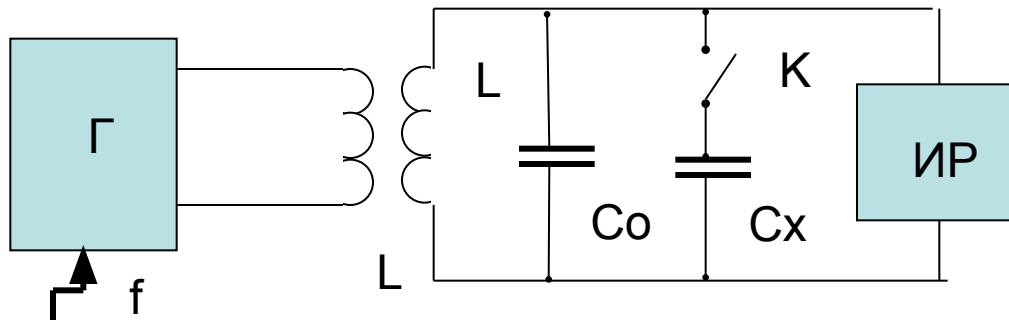
$$C_x = C_0 \frac{R_1}{R_2} \quad r_x = R_0 \frac{R_2}{R_1}$$

Резонансный метод измерения параметров цепей

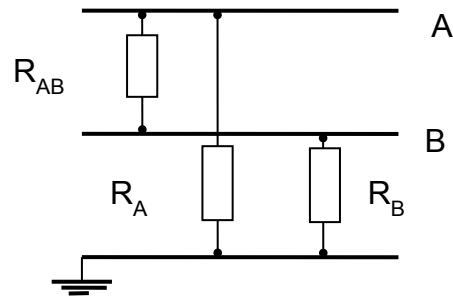
Резонансная частота $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, при $C = C_x$ $C_x = \left(\frac{1}{\omega_p} \right)^2 \cdot \frac{1}{L}$.

метод замещения в сочетании с резонансным методом.

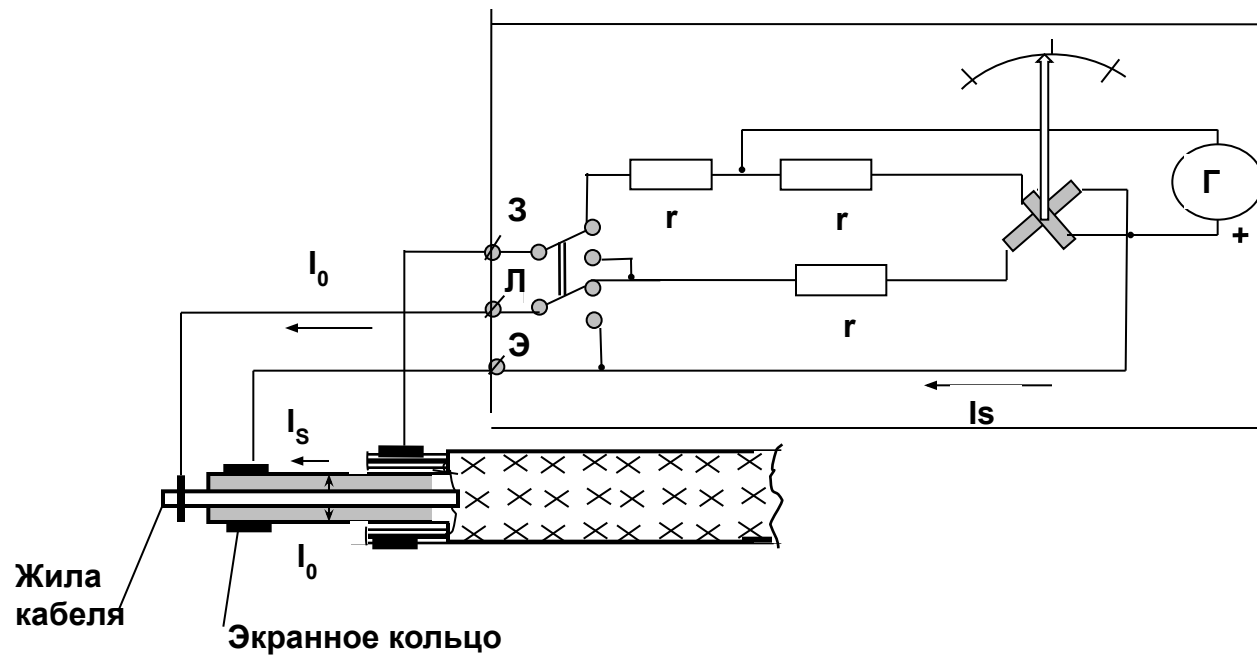
1) $\omega_0 = 1/\sqrt{L(C_o^I + C_p)}$ 2) $\omega_0 = 1/\sqrt{L(C_o^{II} + C_x + C_p)}$, $C_o^I + C_p = C_o^{II} + C_p + C_x \cdot C_x = C_o^I - C_o^{II}$



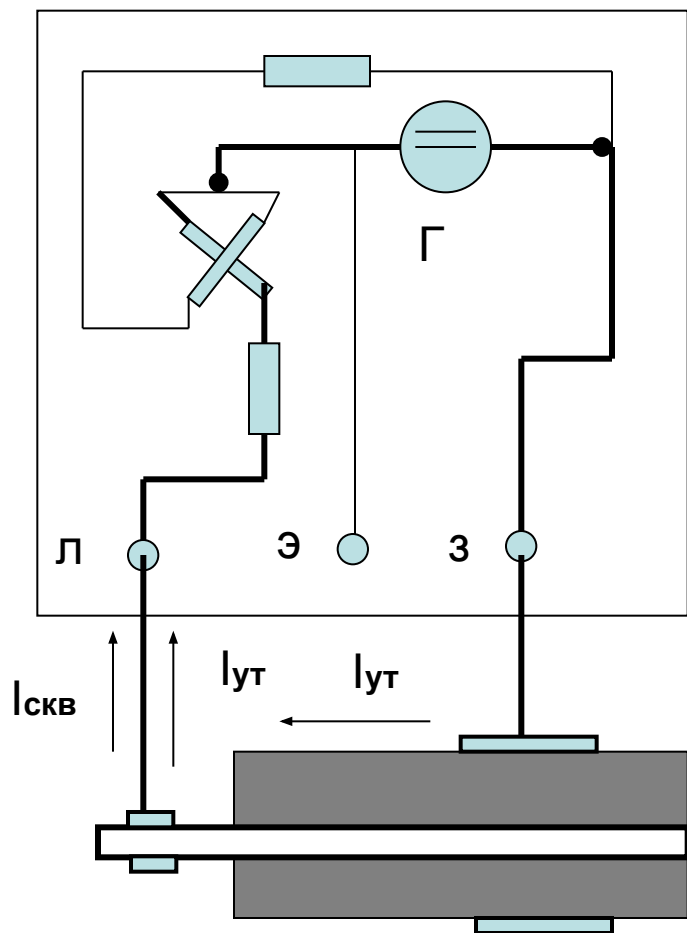
Измерение сопротивления изоляции



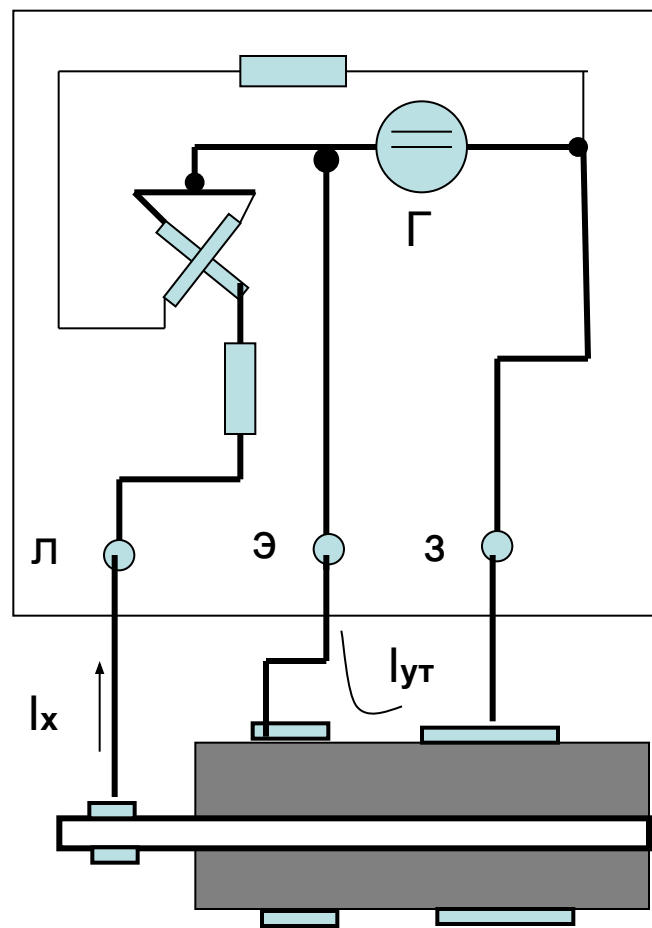
Эквивалентная схема двухпроводной сети.



Измерение сопротивления изоляции кабеля

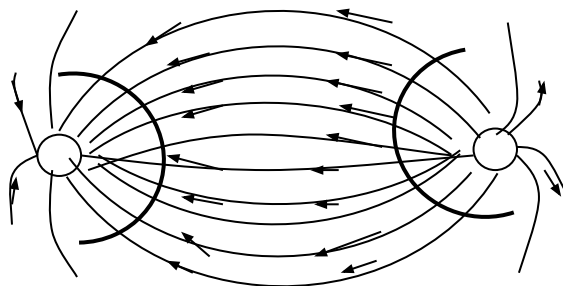


$R_{\text{утечки}}$ большое



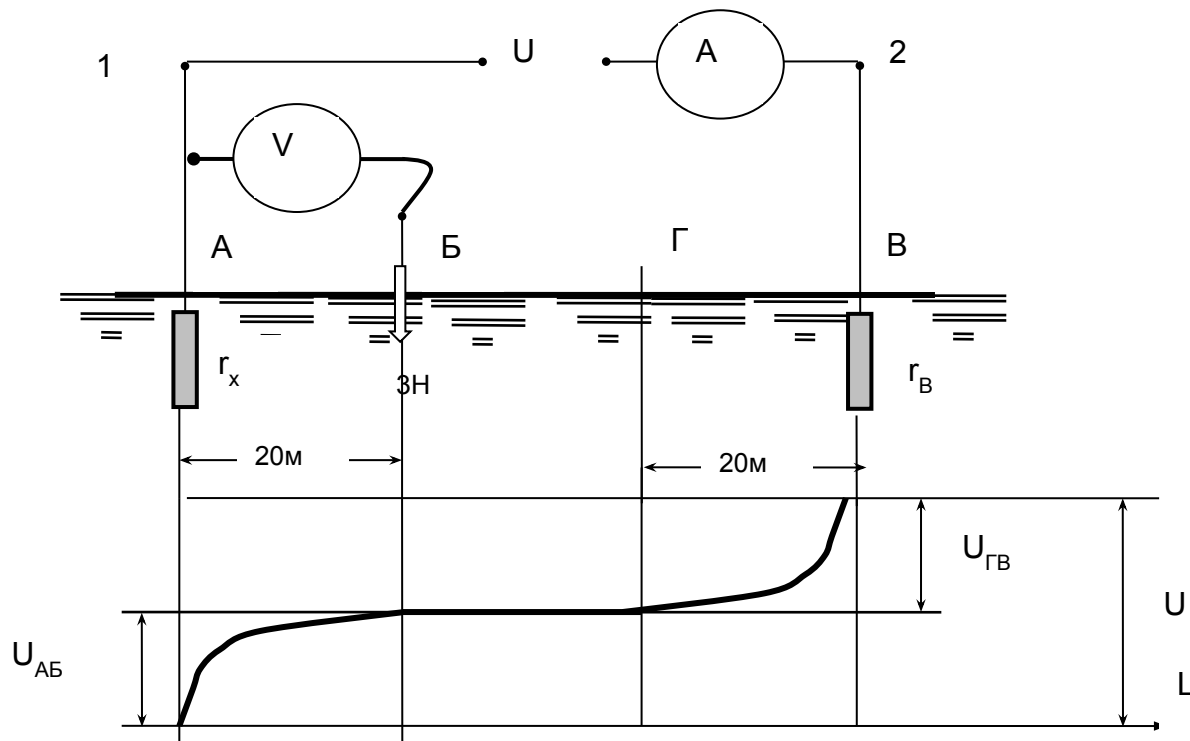
$R_{\text{утечки}}$ малое

Схема прохождения токов в земле между двумя электродами



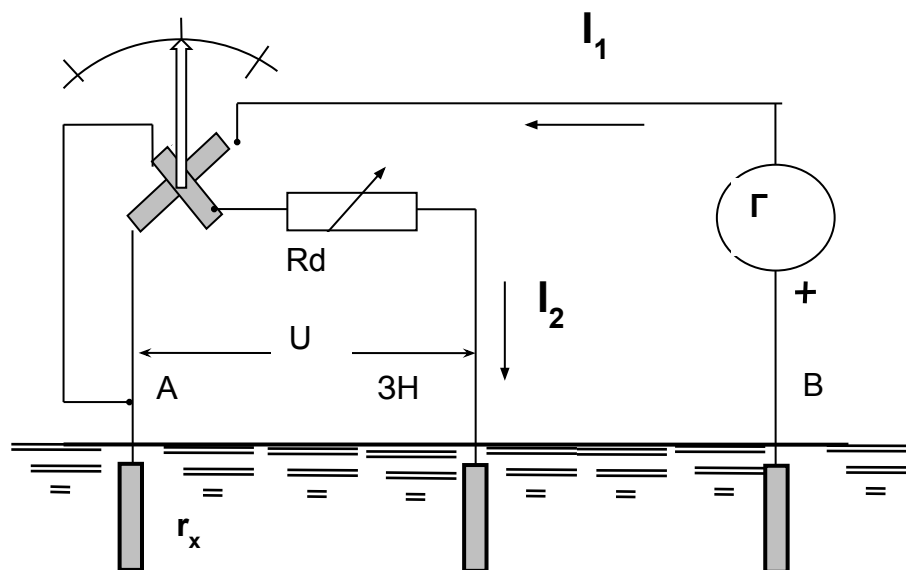
Плотность тока по мере удаления от первого электрода уменьшается, достигая на некотором расстоянии (около 20 м) нуля. Таким образом, вблизи электрода сопротивление току увеличивается. По мере приближения ко второму электроду сопротивление и, соответственно, падение напряжения увеличиваются.

Измерение сопротивлений заземлителей



Распределение потенциалов между электродами на поверхности земли.

метод измерения сопротивления заземления с помощью прибора на основе логометра типа МС-07



Падение напряжения на участке цепи между зондом и заземлителем от тока I_2 равно падению напряжения на измеряемом сопротивлении от тока I_1 .

$$I_2 \cdot (r_2 + r_d + r_{\Gamma}) = I_1 r_x$$

Метод логометра

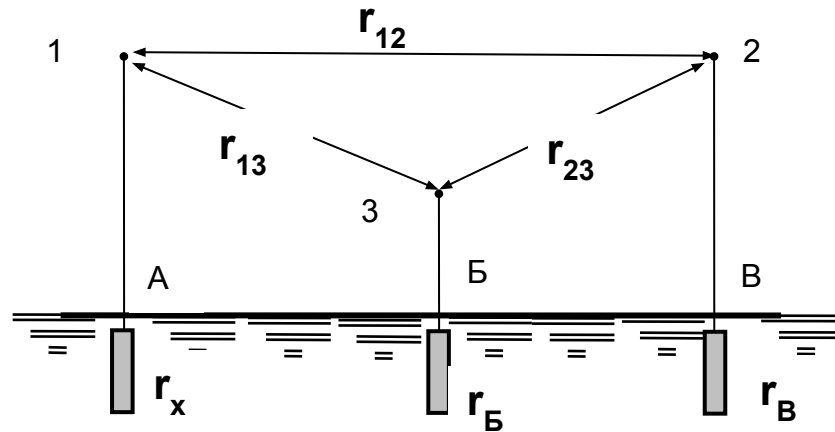
$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{I_1}{\frac{I_1 r_x}{r_2 + r_d + r_{\text{д}}}}\right) = F\left(\frac{r_2 + r_d + r_{\text{д}}}{r_x}\right) = F\left(\frac{K}{r_x}\right),$$

где: r_x – сопротивление заземлителя

$r_{\text{д}}$ – сопротивление зонда (приняв его пренебрежимо малым)

$K = (r_2 + r_d + r_{\text{д}})$ - градуировочное сопротивление в цепи второй рамки

Измерение сопротивления заземлений методом трёх электродов

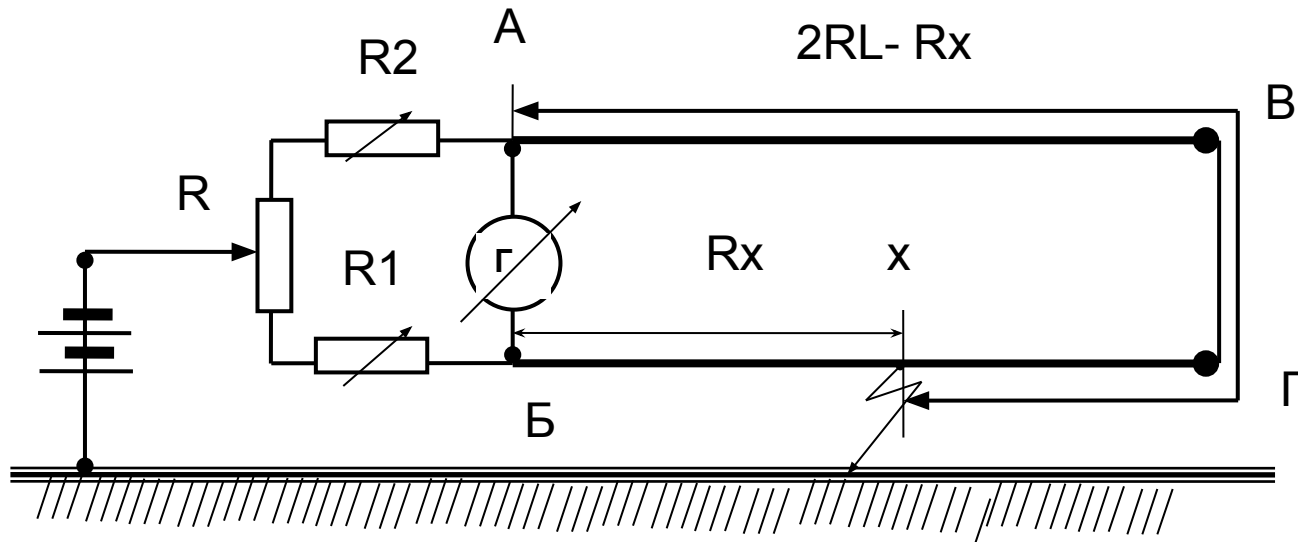


Б и В вспомогательные электроды, имеющие сопротивления r_a , r_b , идентичные измеряемому. r_x

$$r_{12} = r_x + r_B; r_{13} = r_x + r_Б; r_{23} = r_B + r_Б$$

$$r_x = \frac{r_{12} + r_{13} - r_{23}}{2}$$

Определение места повреждения изоляции мостовым методом



При балансировке моста с помощью реохорда R и резисторов R_1 , R_2

$$\frac{R_1}{R_2} = k = \frac{R_x}{2R_L - R_x}, \quad \text{откуда} \quad R_x = 2R_L \frac{k}{1+k}$$

При известном значении удельного сопротивления жилы кабеля ρ , сечения S расстояние от точки Б до места повреждения изоляции X

$$L_x = R_x \frac{S}{\rho} \qquad \rho \frac{L_x}{S} = 2\rho \frac{L}{S} \frac{k}{1+k} \qquad L_x = 2L \frac{k}{1+k}$$

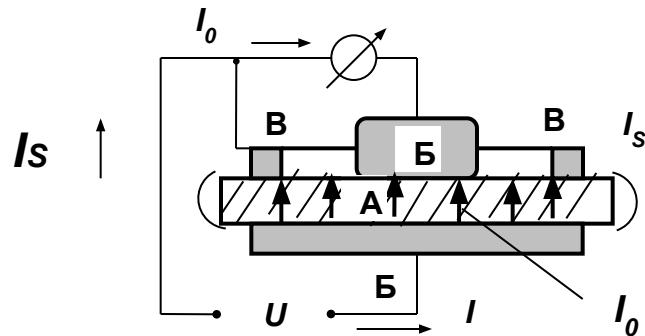
Определение места повреждения изоляции мостовым методом

При одинаковом сечении кабеля по всей длине, в формулу для определения **R_x** вместо **R_x** и **RL** можно представить их через длину, сечение, и удельное сопротивление. Тогда получим

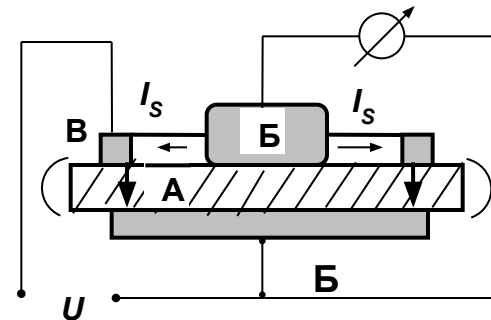
$$\rho \frac{L_x}{S} = 2\rho \frac{L}{S} \frac{k}{1+k}$$

$$L_x = 2L \frac{k}{1+k}$$

Измерение поверхностного и объёмного сопротивлений диэлектрика.



Измерение
объёмного
сопротивления



Измерение
поверхностного
сопротивления

Методы измерения частоты

Основные соотношения

$$f = C/\lambda; f = 1/T,$$

где f – частота (Гц), C – скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме ($C \approx 2,9976 \cdot 10^8$ м/с),
 λ – длина волны, (м) – расстояние между ближайшими точками колебательного процесса, находящимися в одинаковой фазе колебаний,
 T – период колебаний, (с) – интервал времени, за который происходит полная смена фазы колебаний в одной точке пространства.

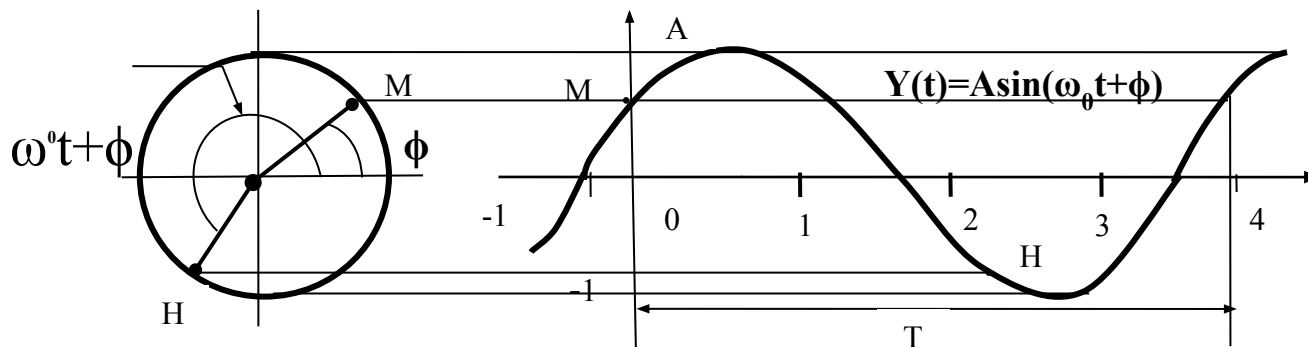
Методы измерения частоты

Основные соотношения

$$f = C/\lambda; f = 1/T,$$

где f – частота (Гц), C – скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме ($C \approx 2,9976 \cdot 10^8$ м/с),
 λ – длина волны, (м) – расстояние между ближайшими точками колебательного процесса, находящимися в одинаковой фазе колебаний,

T – период колебаний, (с) – интервал времени, за который происходит полная смена фазы колебаний в одной точке пространства.



№ поло сы	Диапазон частот	Диапазон длин волн	Обозначение по частоте	Обозначение по длине волны
1	2	3	4	5
4	3 – 30 кГц	100 – 10 км	ОНЧ очень низкие	СДВ сверхдлинные
5	30 – 300 кГц	10 – 1 км	НЧ низкие	ДВ длинные
6	300 – 3000 кГц	1000 -100 м	СЧ средние	СВ средние
7	3 – 30 МГц	100 – 10 м	ВЧ высокие	КВ короткие
8	30 – 300 МГц	10 – 1 м	ОВЧ очень высокие	УКВ ультракороткие
9	300 – 3000 МГц	100 – 10 см	УВЧ ультравысокие	ДЦМВ дециметровые
10	3 – 30 ГГц	10 – 1 см	СВЧ сверхвысокие	СМВ сантиметровые
11	30 – 300 ГГц	10 – 1 мм	КВЧ крайне высокие	ММВ миллиметровые
12	300 – 3000 ГГц	1 – 0,1 мм	-	СММВ субмиллиметровые

Измерение частоты

$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda = \frac{C}{f} \quad f = \frac{C}{\lambda}$$

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) = U_m \sin \varphi(t)$$

φ_0 - начальная фаза $\varphi(t) = \sin(\omega t + \varphi_0)$ - полная, текущая, мгновенная фаза

ω – угловая, циклическая частота $\omega = 2\pi f$ – частота изменения фазы

Спектр частот: НЧ и ВЧ

НЧ – инфранизкие – ниже 20 Гц; звуковые -20 – 20кГц; УЗВ ÷ 20 ÷ 200 кГц

ВЧ – 200 ÷ 30 МГц; УВЧ - 30 ÷ 300 МГц; СВЧ – выше 300 МГц

Мгновенное значение частоты $f(t) = f_n + kf_0 t + \Delta f(t)$

f_n – частота в тех документации, $kf_0 t$ временной дрейф, $\Delta f(t)$ – случайный дрейф

Измерение частоты

Классификация, наименование и обозначение, приборов для измерения частоты

- Ч1 – стандарты частоты и времени,
- Ч2 - частотомеры резонансные,
- Ч3 – частотомеры электронносчётные,
- Ч4 – частотомеры гетеродинные, емкостные, мостовые,
- Ч5 – синхронизаторы частоты,
- Ч6 – синтезаторы частоты,
- Ч7 – приёмники сигналов эталонных частот,
- Ч9 – преобразователи частоты.

Методы измерения частоты

1 - методы сравнения с образцовой частотой:

а) сличения на основе нулевых биений

б) гетеродинный в)- осциллографический

2 - функциональные методы:

а) резонансный б) мостовой в) спектральные

3 - генераторные: а)перезаряда конденсатора;

Преобразования временного интервала в напряжение

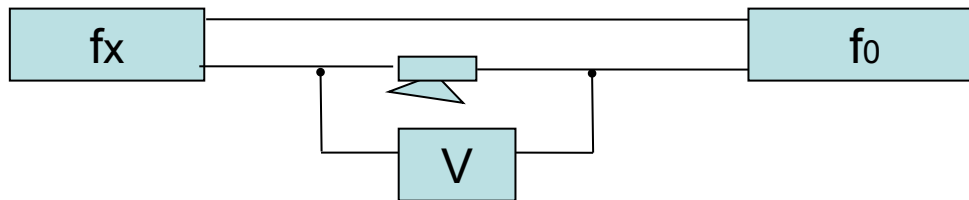
4 –дискретного счёта (цифровой)

Методы измерения частоты

- Методы сравнения
- Функциональные методы
- Методы дискретного счёта
- Генераторные методы

Метод сравнения с известной частотой.

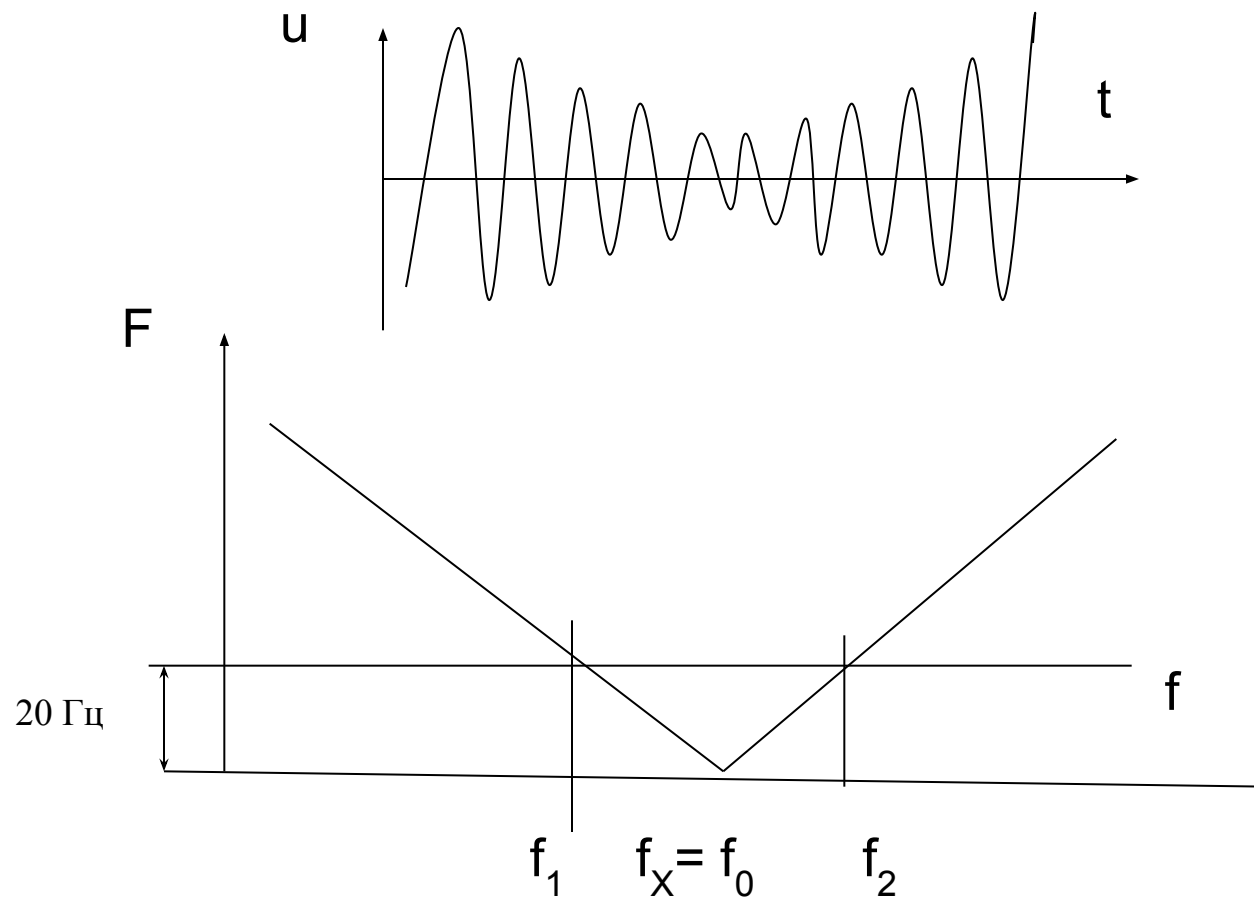
- Метод нулевых (звуковых) биений



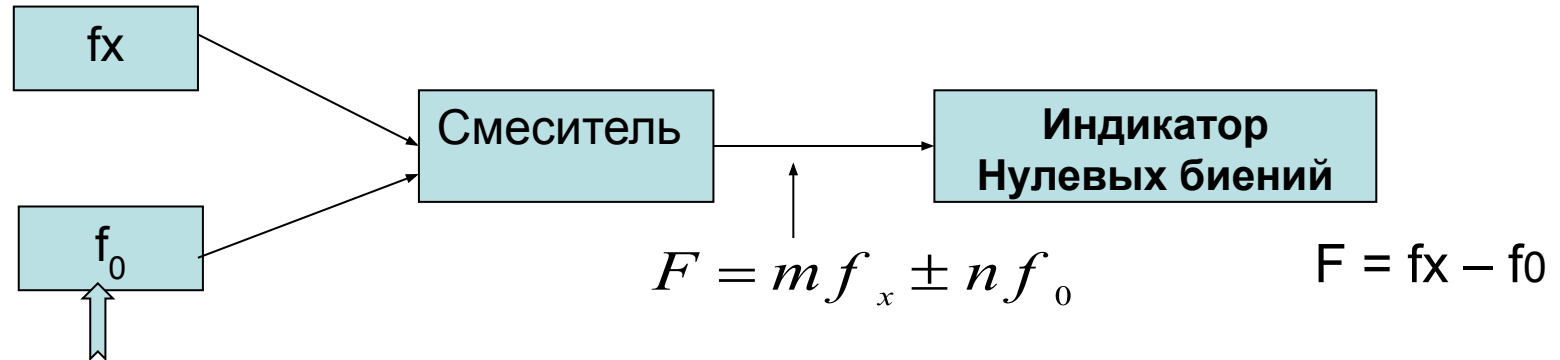
При $f_1 = U_{m1}\sin\omega_1t$ и $f_2 = U_{m2}\sin\omega_2t$
образуется сложное амплитудно-модулированное колебание

$F = f_1 - f_2$ с амплитудой в пределах от $U_{m1} - U_{m2}$ до $U_{m1} + U_{m2}$

Нулевые биения



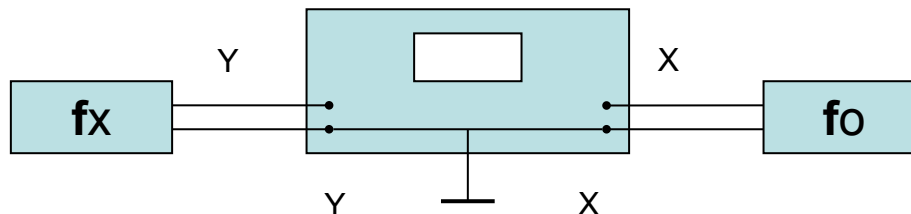
Гетеродинный метод



при $m = n = 1$, $F = f_x - f_0$, $f_x = f_0 + F$, где F – частота биений

Погрешность $\delta = \pm \sqrt{\delta_{\sigma \dot{e}}^2 + \delta_0^2 + \delta_{\dot{e} \dot{i} \ddot{a}}^2}$

Осциллографический метод

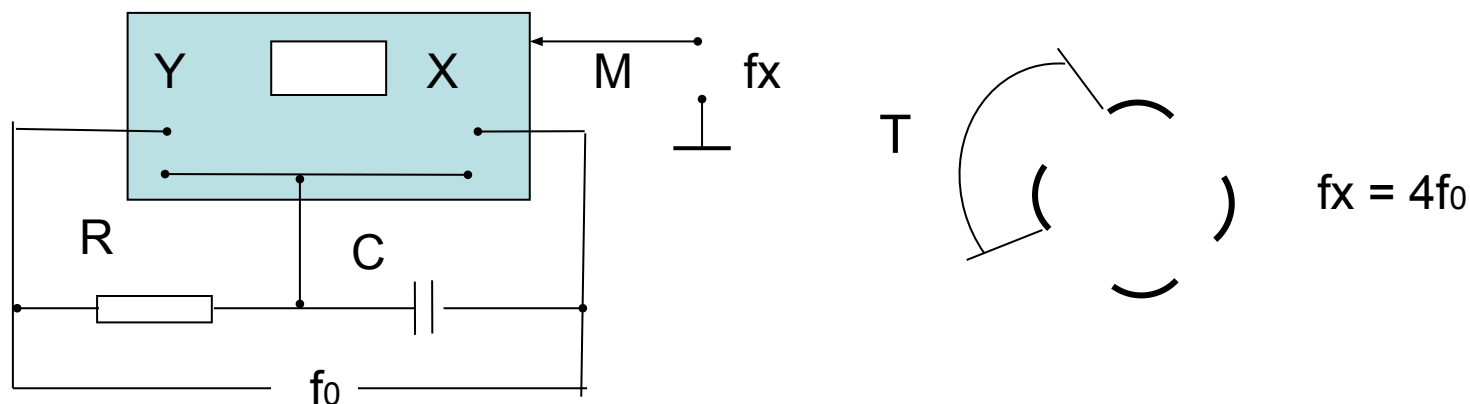


Сдвиг фаз сигналов Fx и Fo					
Fx:fo	0	$\pi/2$	π	$3/2\pi$	2π
1					
2					
3					

$$F_{\text{верт}} \cdot N_{\text{верт}} = f_{\text{гор}} \cdot N_{\text{гор}},$$

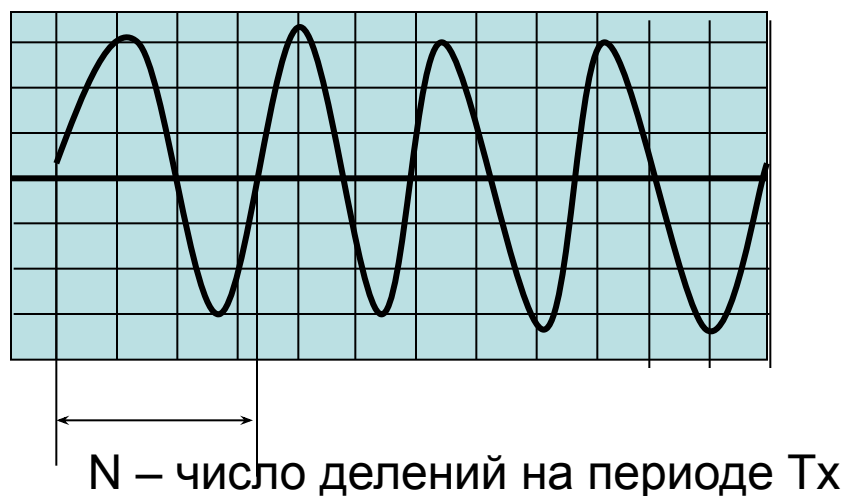
$$f_x = f_0 \frac{N_{\tilde{a}i\delta}}{N_{\hat{a}\hat{a}\hat{\delta}\hat{\delta}}}$$

Метод круговой развёртки и яркостной модуляции

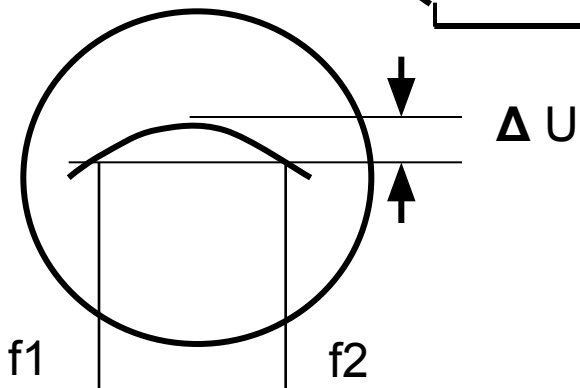
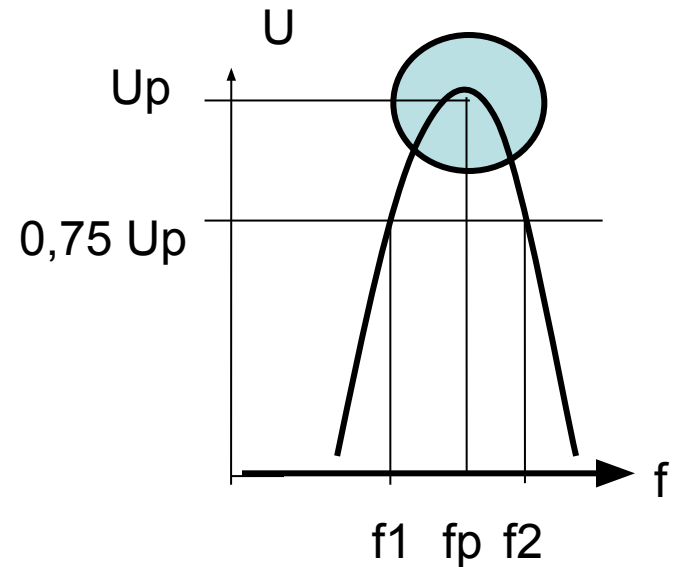
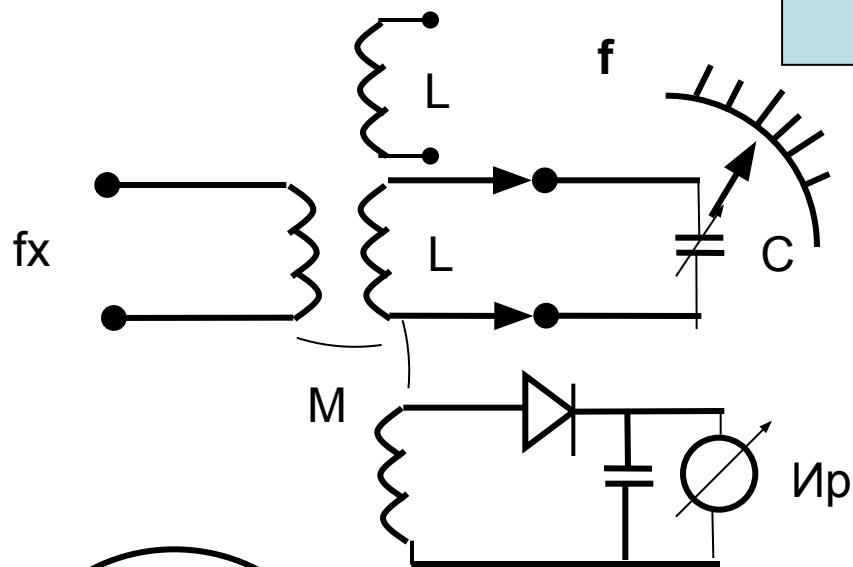
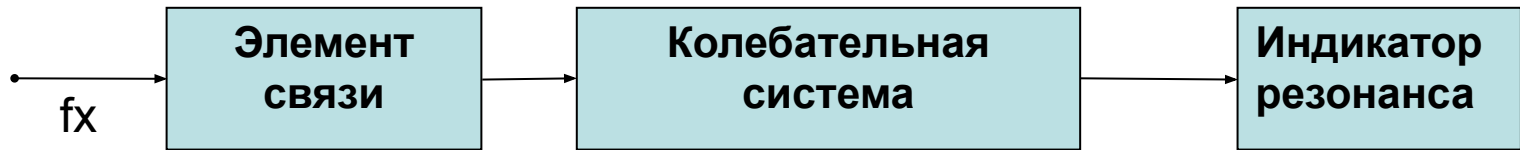


Метод сравнения с частотой развёртки осциллографа

$T_x = N K_p$, $f_x = 1/T_x$. K_p – коэффициент развёртки время на деление

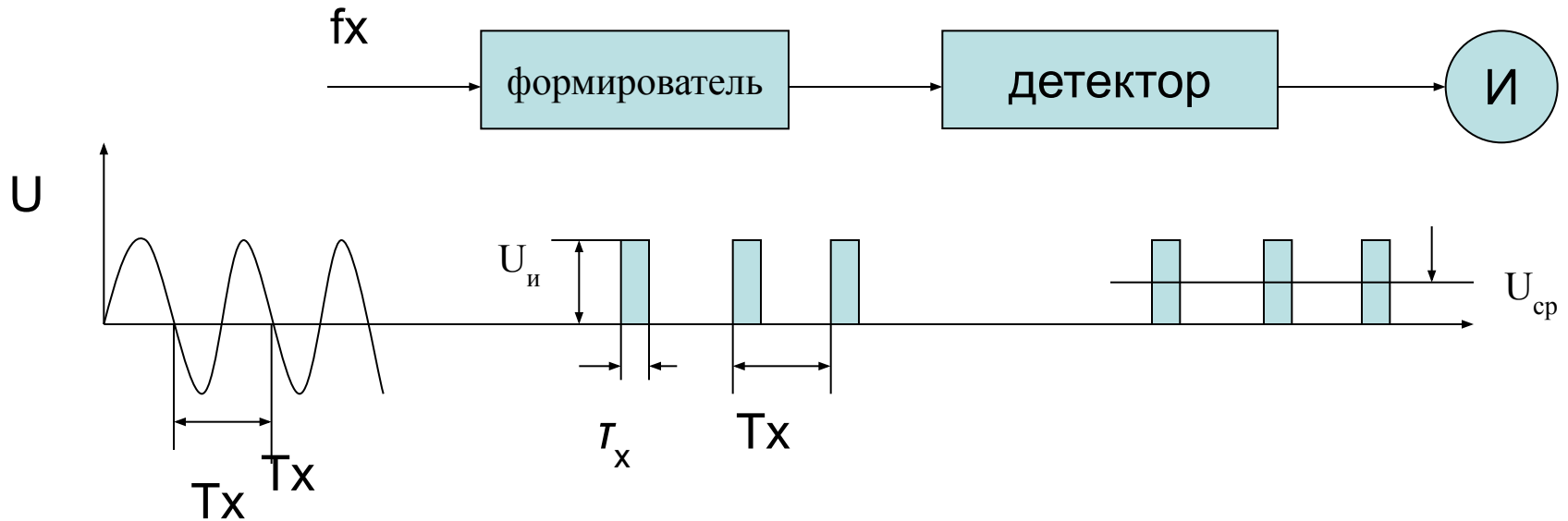


Резонансный метод измерения частоты



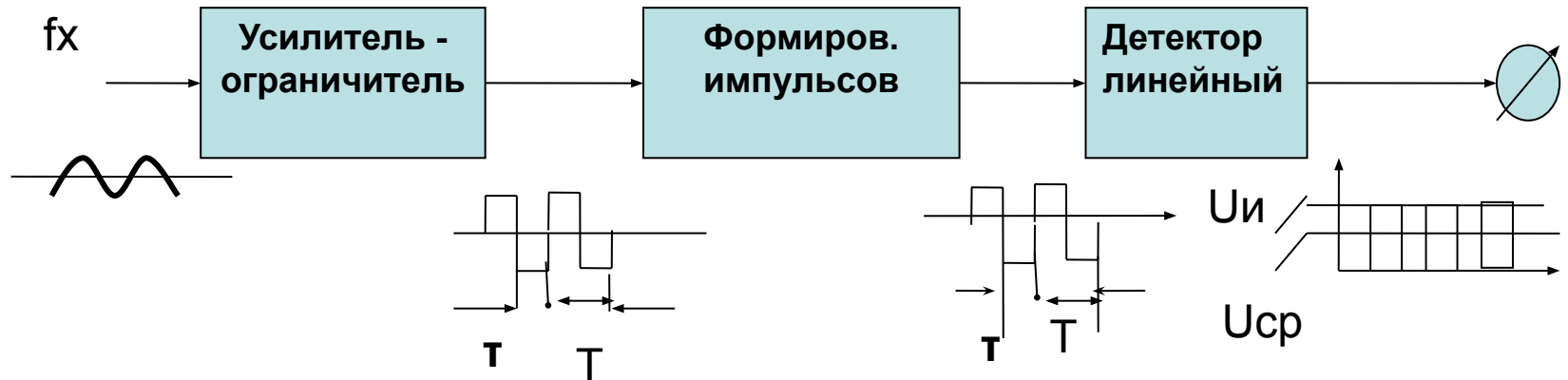
$$f_p = 0,5 (f_1 + f_2)$$

Генераторные методы



$$U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \frac{\tau}{T_x} U_{и} = \tau U_{и} f_x$$

ГЕНЕРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ



$$U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \frac{\tau}{T_X} U_{И} = \tau U_{И} f_X$$

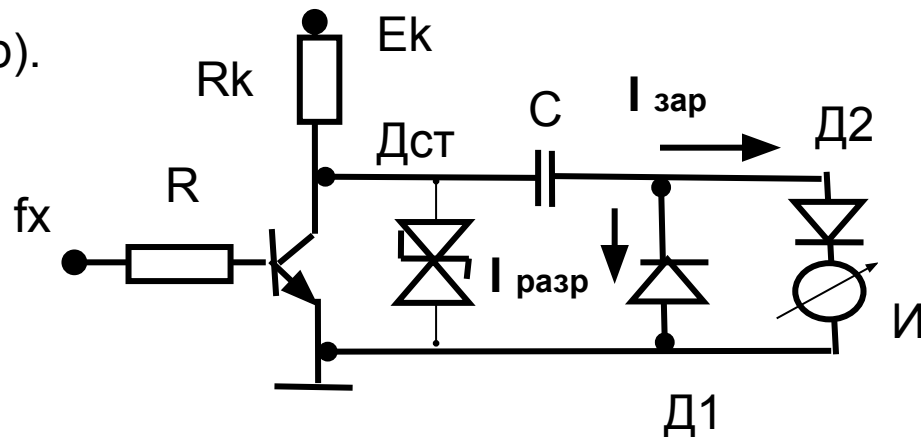
Схема конденсаторного частотомера

$$f_X = 1/C(U_{зар} - U_{разр}).$$

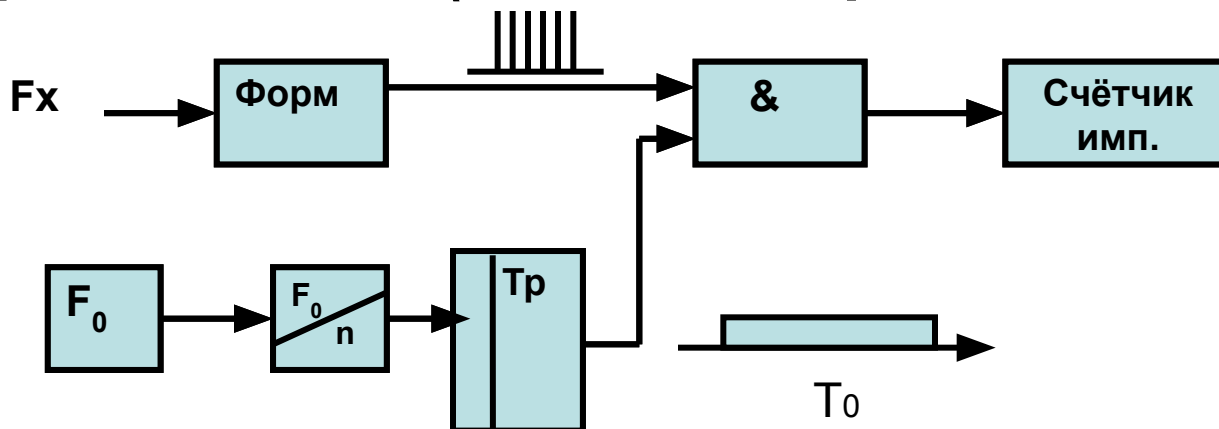
$$q = CU, \text{ - за период}$$

$$i_{зар} = q/T = CU \cdot f$$

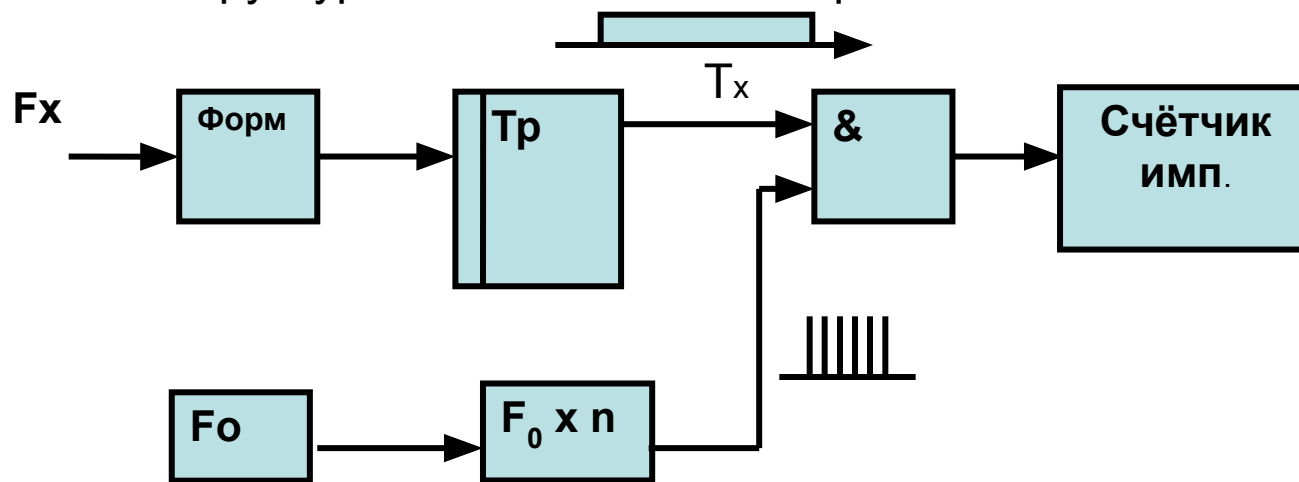
$$f = i/CU$$



Цифровой метод (метод дискретного счёта)

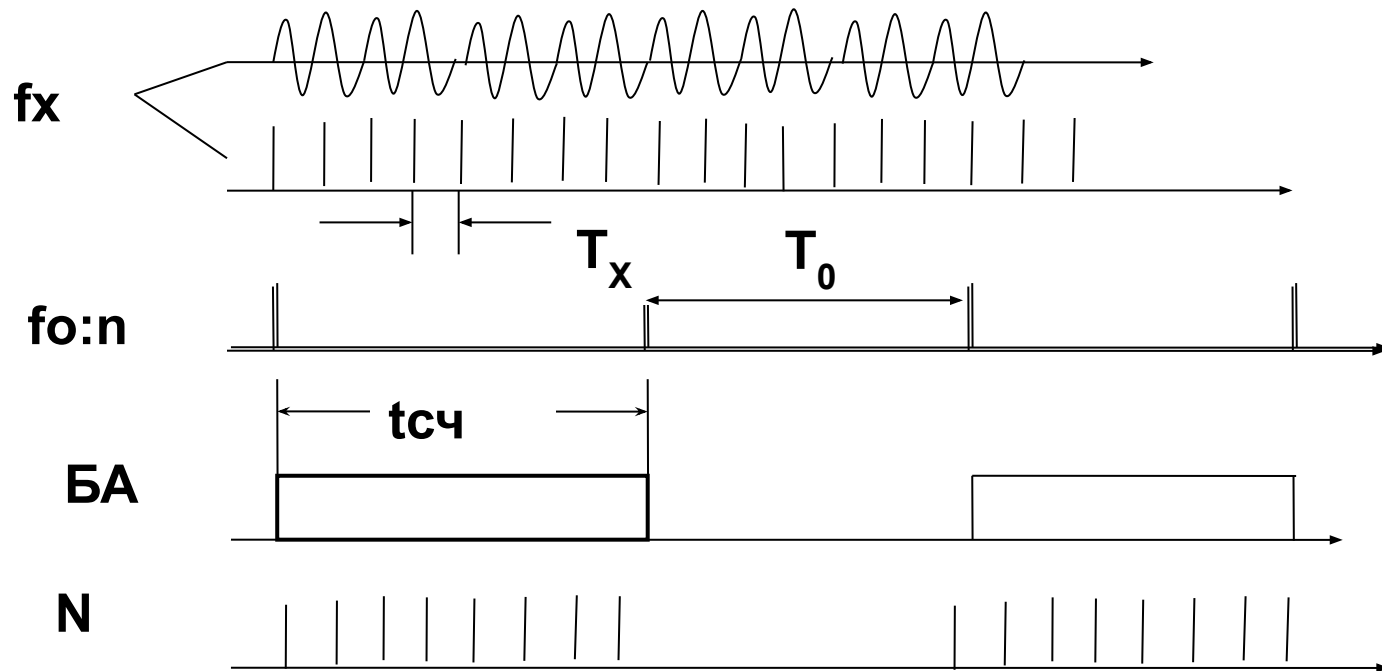


Структурная схема частотомера



Структурная схема периодомера

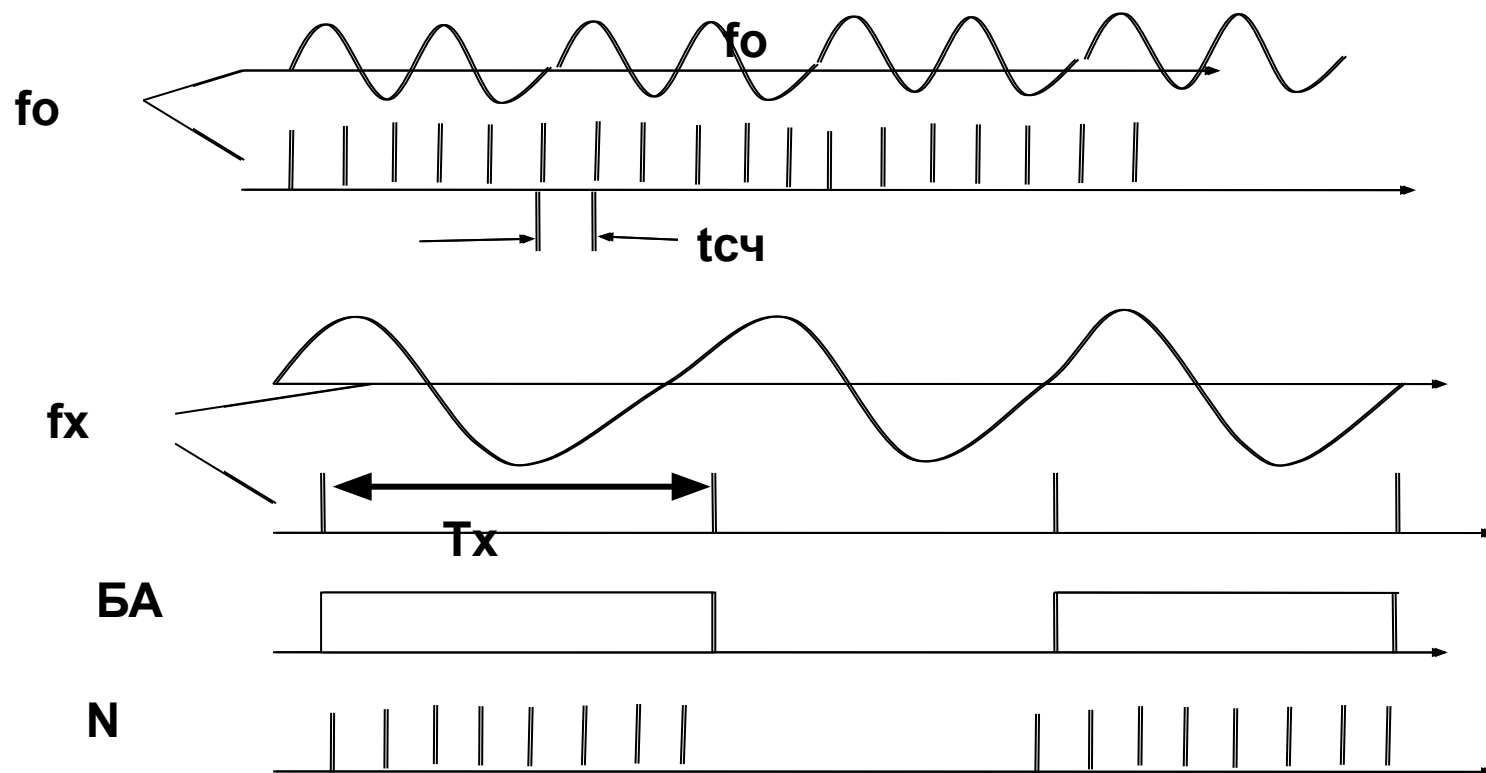
ЭСЧ в режиме измерения частоты



$$NT_x = T_0 \quad \frac{N}{f_x} = T_0 \quad f_x = Nf_0$$

$$f_x = \frac{N}{t_{\text{сч}}} = \frac{N}{n} f_0$$

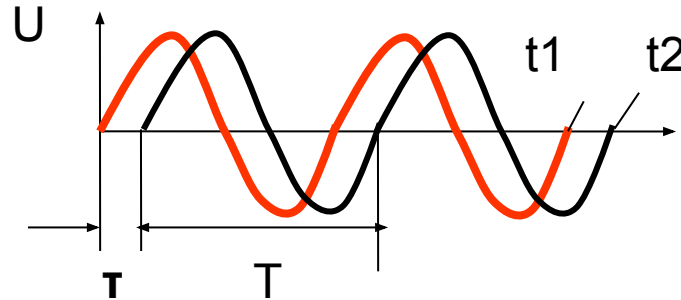
ЭСЧ в режиме измерения периода



$$t_m = \frac{1}{f_{\text{сч}}} = \frac{1}{K f_0}.$$

$$T_x = N t_m = \frac{N}{f_{\text{сч}}} = N \frac{T_0}{K}.$$

Методы измерения фазовых сдвигов



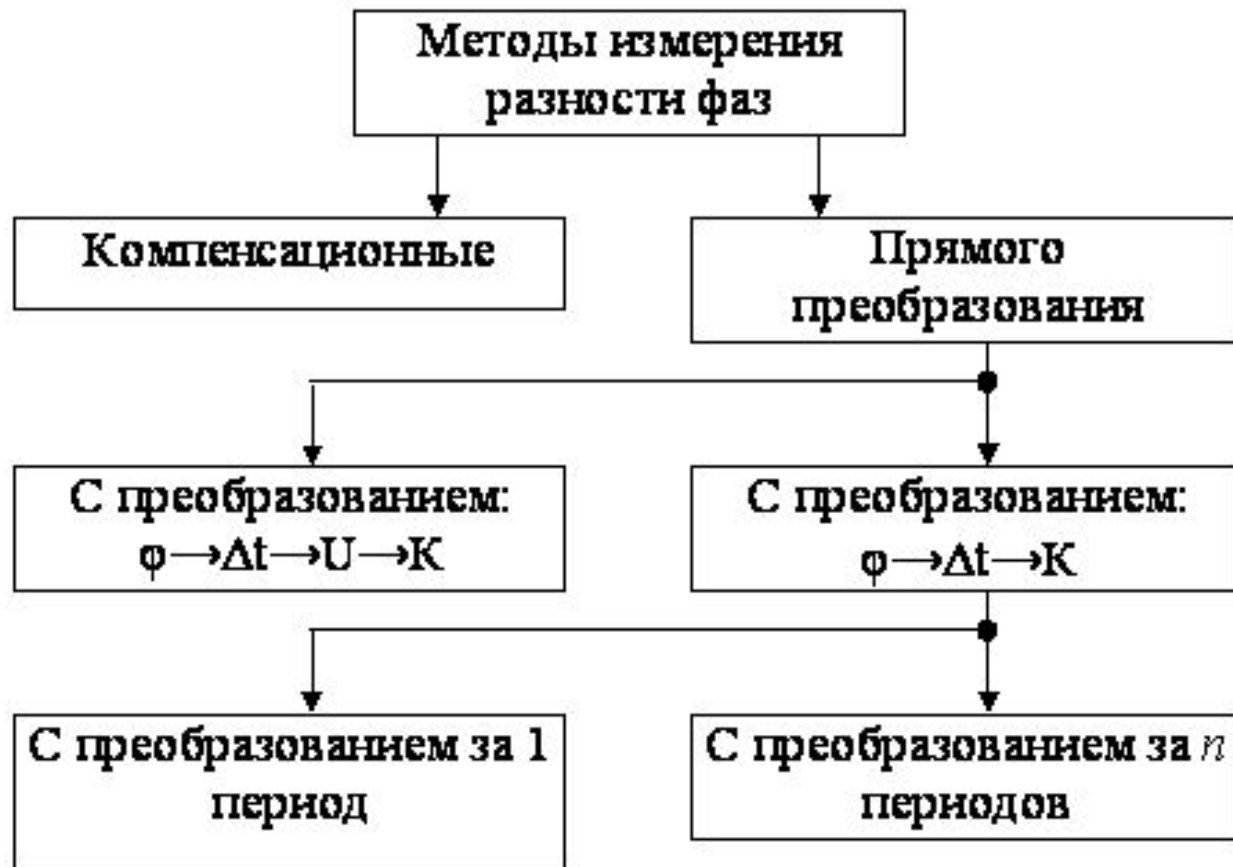
- Для двух гармонических сигналов при одинаковой частоте
- $u_1 = U_m \sin(\omega t_1 + \phi_1)$, $u_2 = U_m \sin(\omega t_2 + \phi_2)$ $\omega_1 = \omega_2 = \omega$,
- приняв $\phi_2 = 0$, получим
- $\omega t_1 + \phi - \omega t_2 = \phi$, $\phi = \omega(t_1 - t_2) = 2\pi/T \cdot (t_1 - t_2)$. $\phi = 2\pi \Delta t / T$

методы измерения фазовых сдвигов

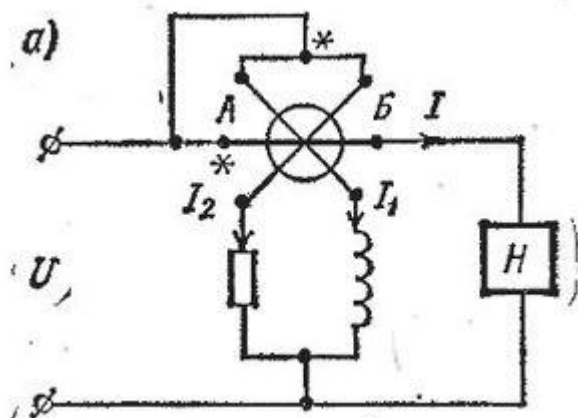
- осциллографический,
- с преобразованием во временной интервал,
- цифровой
- компенсационный,

Измерение фазы

Классификация методов измерения фазы



Логометрический фазометр



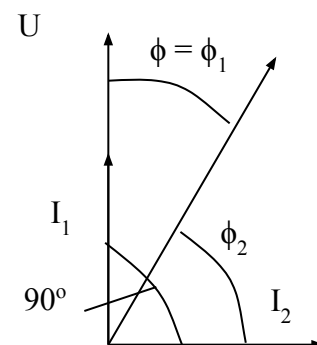
где ψ_1, ψ_2 — углы сдвига фаз между токами в неподвижной катушке и токами I_1, I_2 соответственно в подвижных катушках;

$$M_1 = c_1 I I_1 \cos \psi_1 f_1(\alpha)$$

$$M_2 = c_2 I I_2 \cos \psi_2 f_2(\alpha)$$

$$c_1 I I_1 \cos \psi_1 f_1(\alpha) = c_2 I I_2 \cos \psi_2 f_2(\alpha)$$

$$\frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} = \frac{c_1 f_1(\alpha)}{c_2 f_2(\alpha)} = f_3(\alpha)$$



$$\cos \phi_2 = \cos (90 - \phi_1), \phi_1 = \phi, f_3(\alpha) = \operatorname{tg} \phi.$$

Осциллографический метод

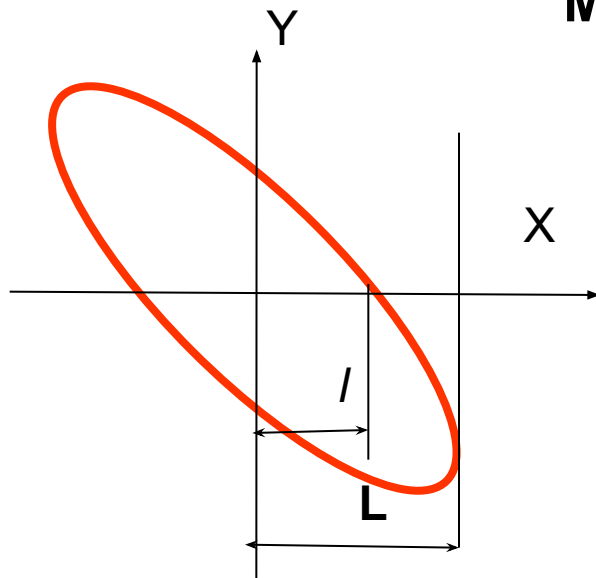
- Разновидности:

Метод эллипса,

Метод двухканального осциллографа,

Метод круговой развёртки и яркостной модуляции

Метод эллипса



$$U_m = L$$

$$U_x = l$$

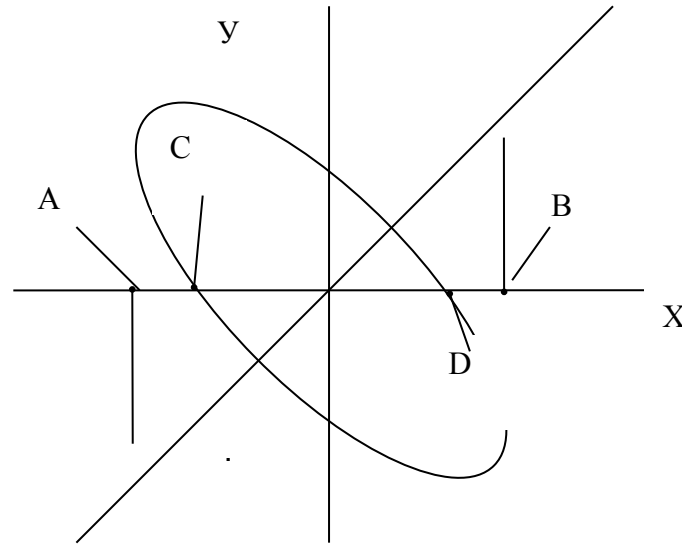
$$U_y = U_m \sin \omega t$$

$$U_x = U_m \sin (\omega t + \phi)$$

$$\text{При } U_y = 0 \quad U_x = U_m \sin \phi = l$$

$$\sin \phi = \frac{l}{L}, \quad \phi = \arcsin \frac{l}{L}$$

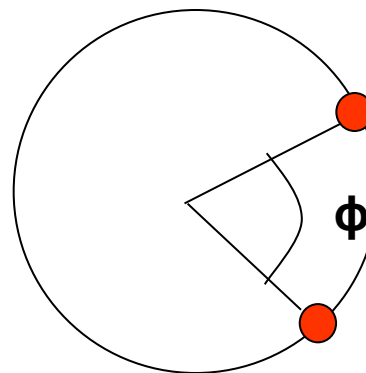
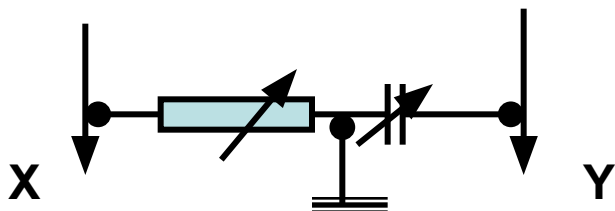
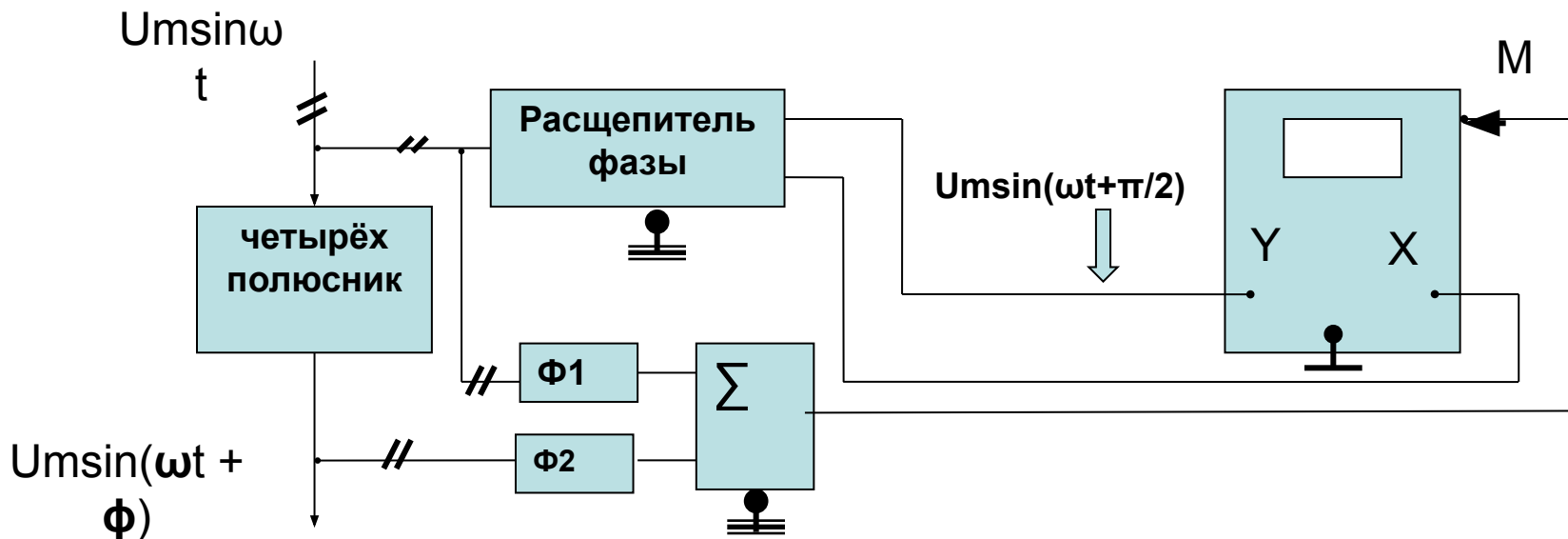
Измерение фазы



$$A-B; = 2S_X U_{m2} \quad C-D = 2S_X U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\sin \varphi = \frac{l}{L}, \quad \varphi = \arcsin \frac{l}{L} \quad C-D = l \quad A-B = L$$

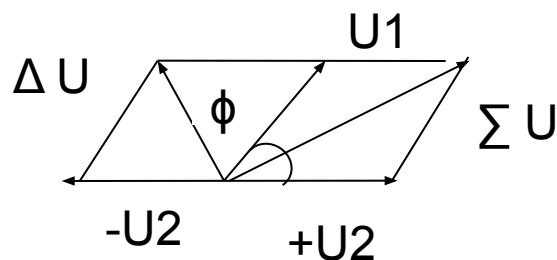
Метод яркостной модуляции и круговой развёртки



Электронные методы измерения фазовых сдвигов

Метод суммы и разности напряжений

$$U_{\Sigma}^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos \varphi \quad \varphi = \arccos \left[\frac{U_{\Sigma}^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1 U_2} \right].$$

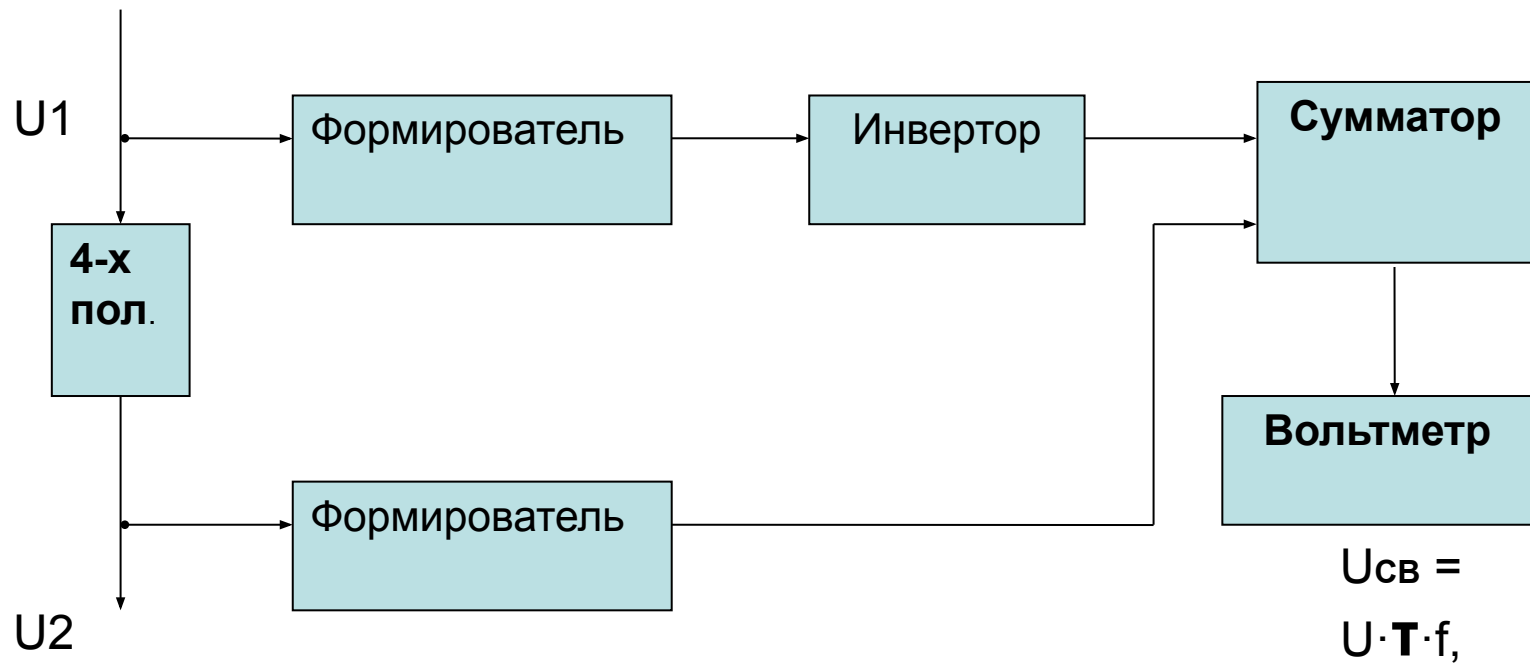


При $U_1 = U_2$ $U_{\Sigma}^2 = 2U^2 (1 + \cos \varphi) = 4U^2 \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right)$ $\varphi = 2 \arccos \left(\frac{U_{\Sigma}}{2U} \right)$

при использовании разности значений напряжений

$$U_{\Delta}^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \varphi \quad \varphi = 2 \arcsin \left(\frac{U_{\Delta}}{2U} \right)$$

Измерение фазы методом сложения импульсов.



Временные диаграммы метода суммы и разности напряжений

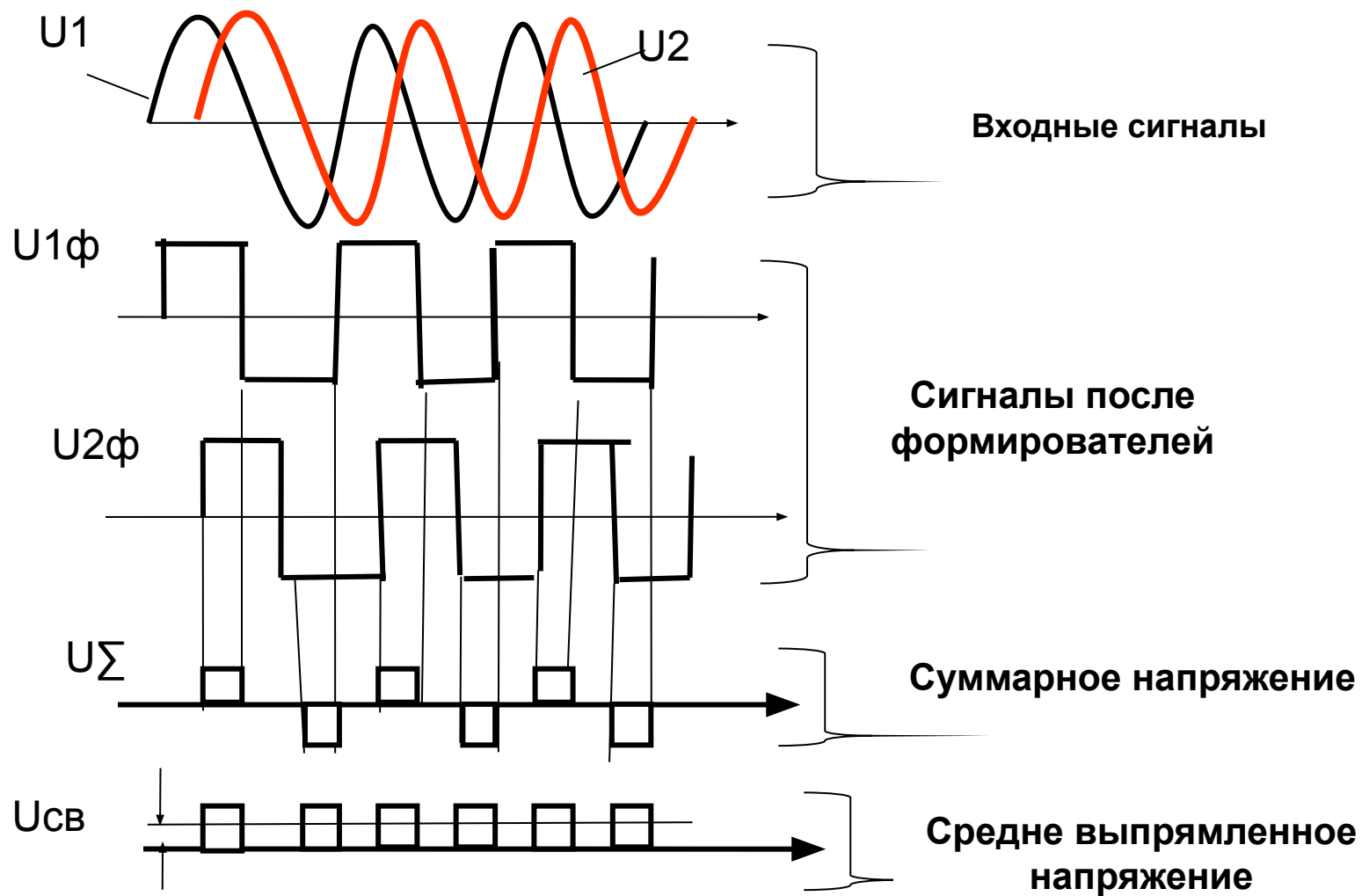
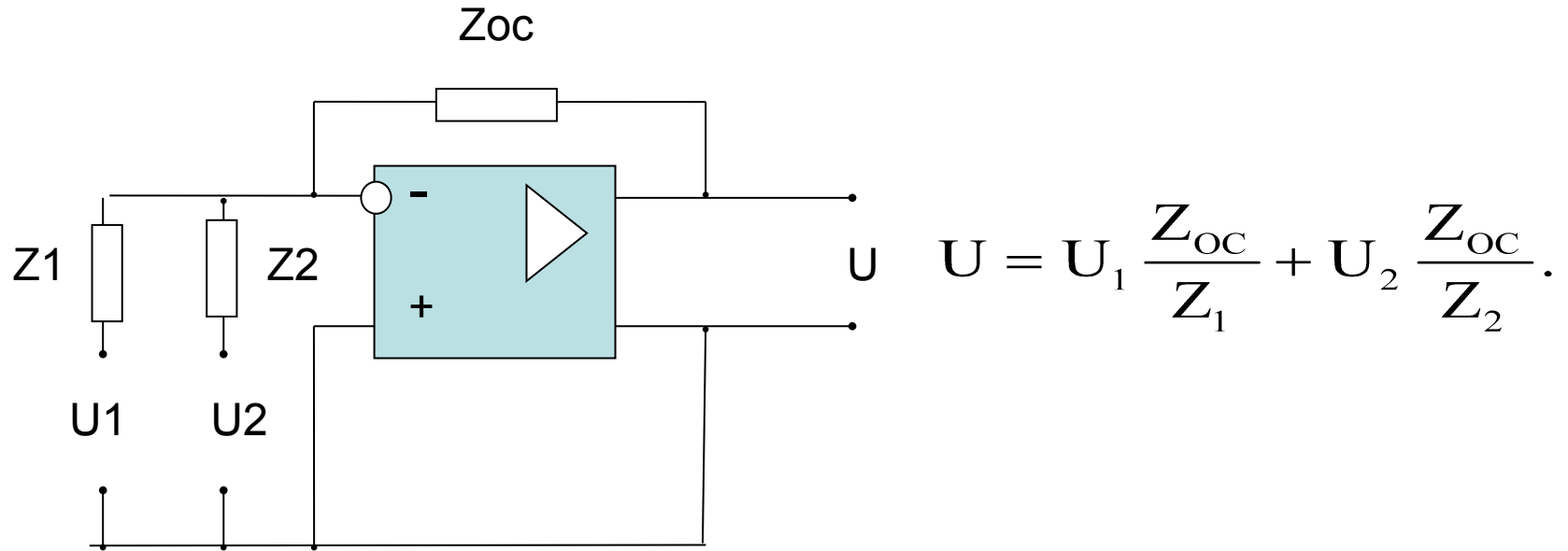


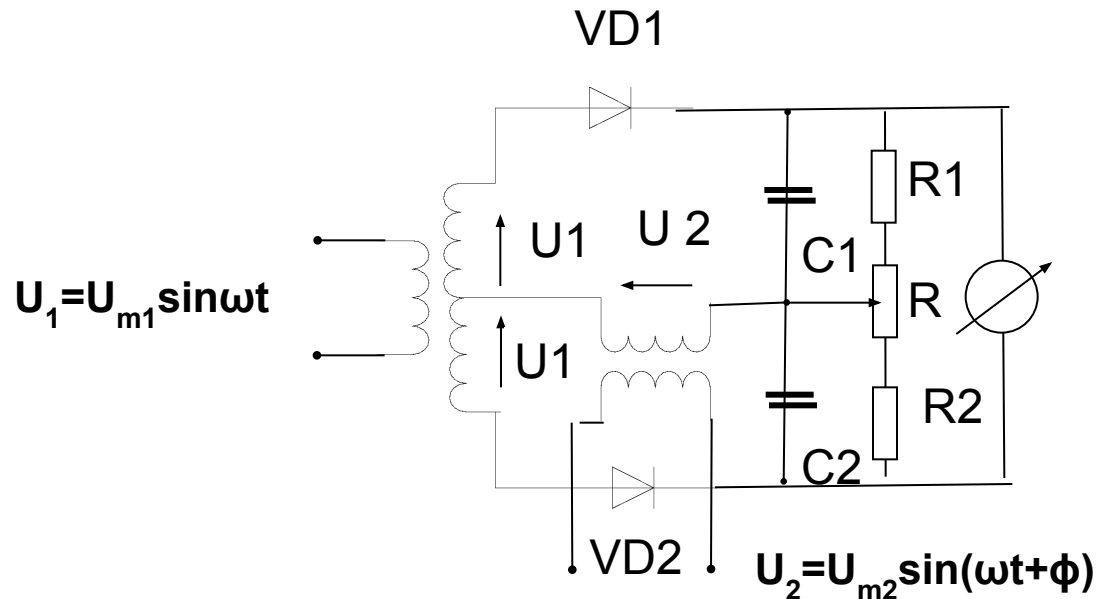
Схема суммирования на операционном усилителе



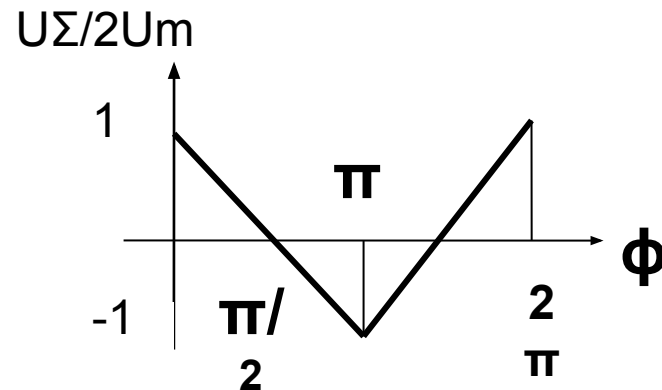
При $Z_1 = Z_2 = Z$

$$U = U_1 \frac{Z_{oc}}{Z} + U_2 \frac{Z_{oc}}{Z} = \frac{Z_{oc}}{Z} (U_1 + U_2)$$

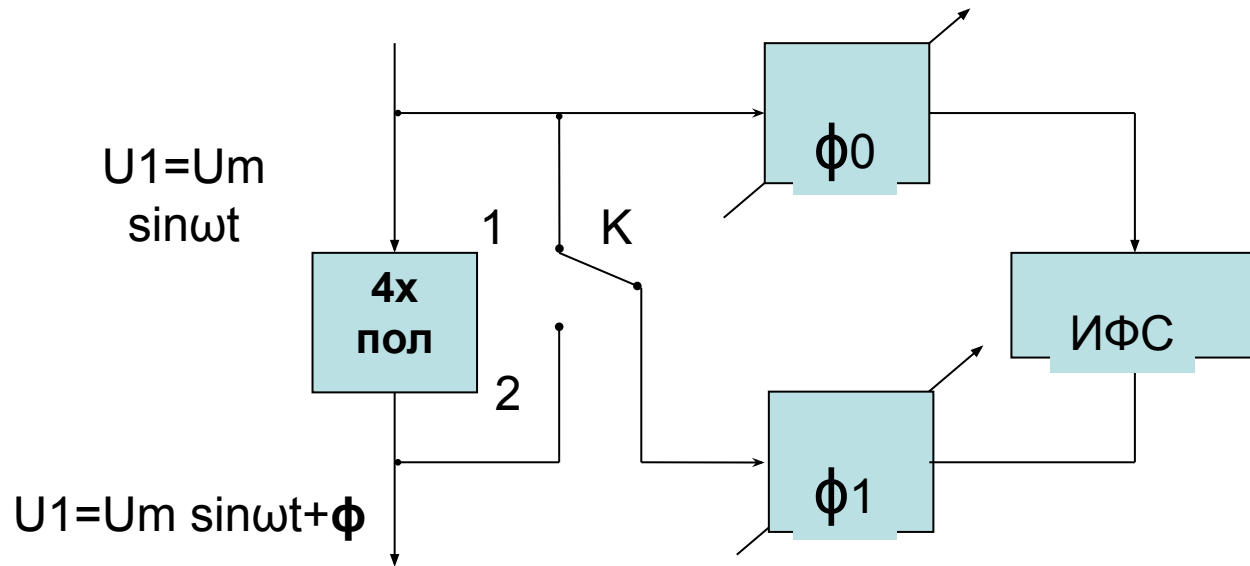
Метод балансного фазового детектора.



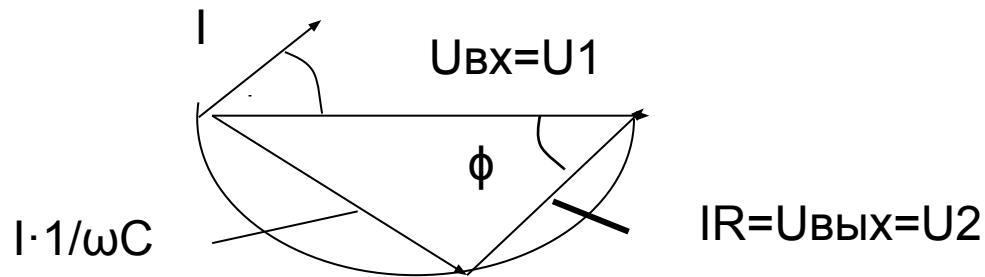
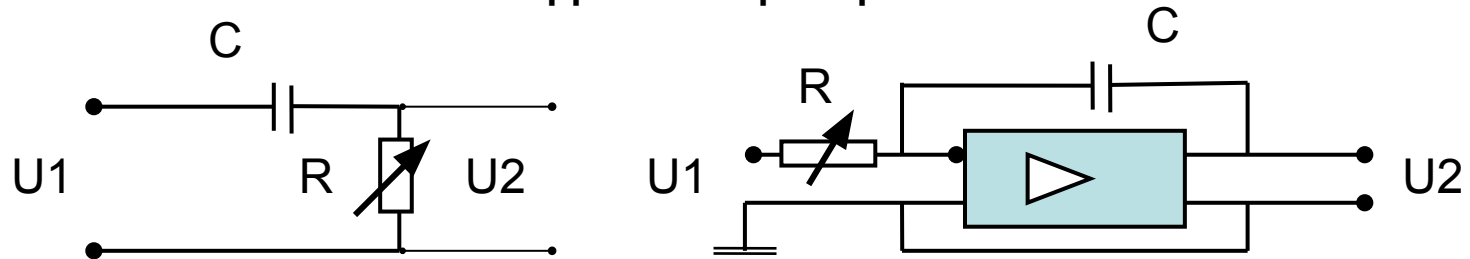
$$U_{C1} = 2U_m \cos\left(-\frac{\varphi}{2}\right); \quad U_{C2} = 2U_m \sin\left(-\frac{\varphi}{2}\right). \quad U_{\Sigma} = 2U_m \left[\cos \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} \right].$$



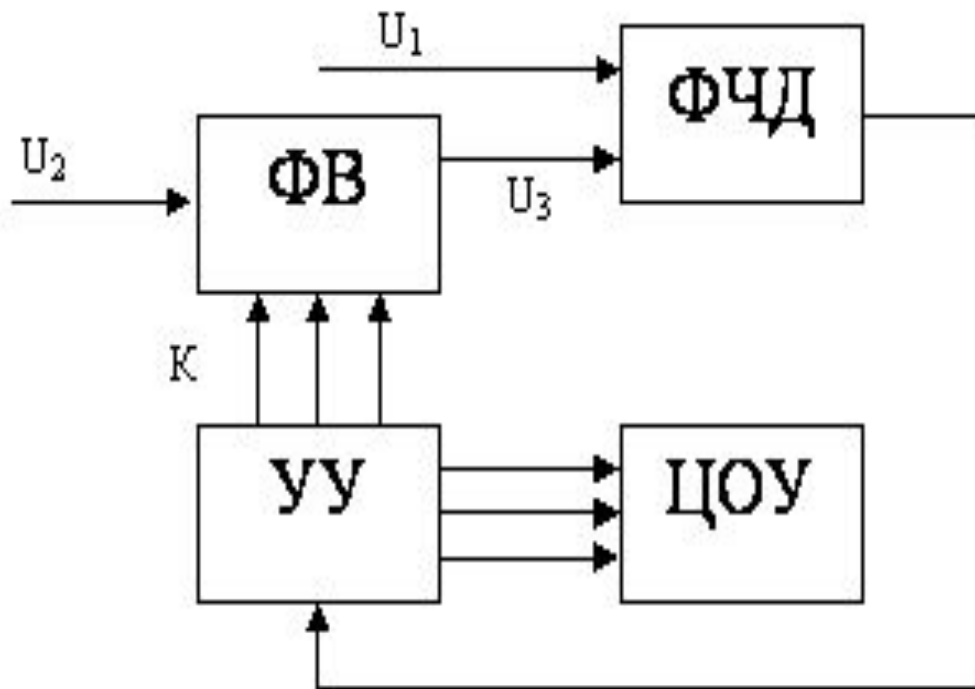
Компенсационный метод измерения сдвига фаз



Фазосдвигающие цепи

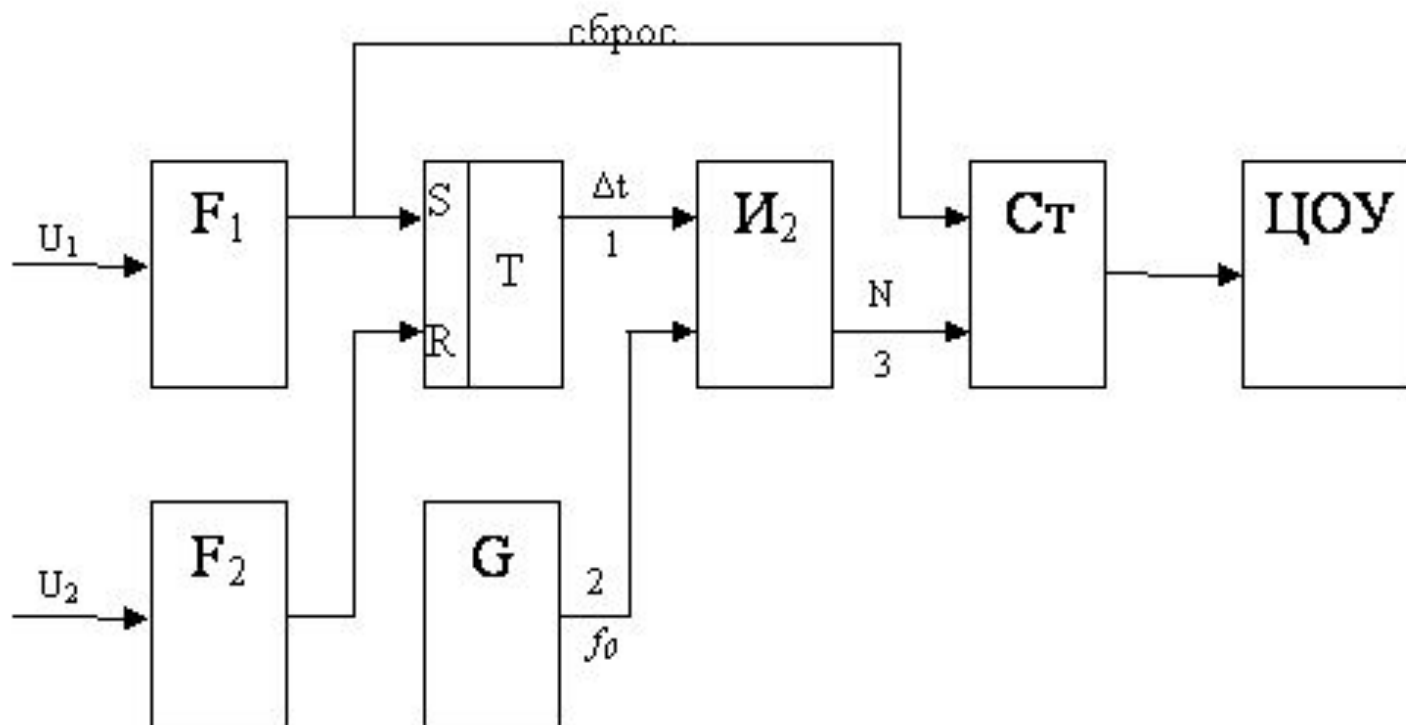


Компенсационный метод.

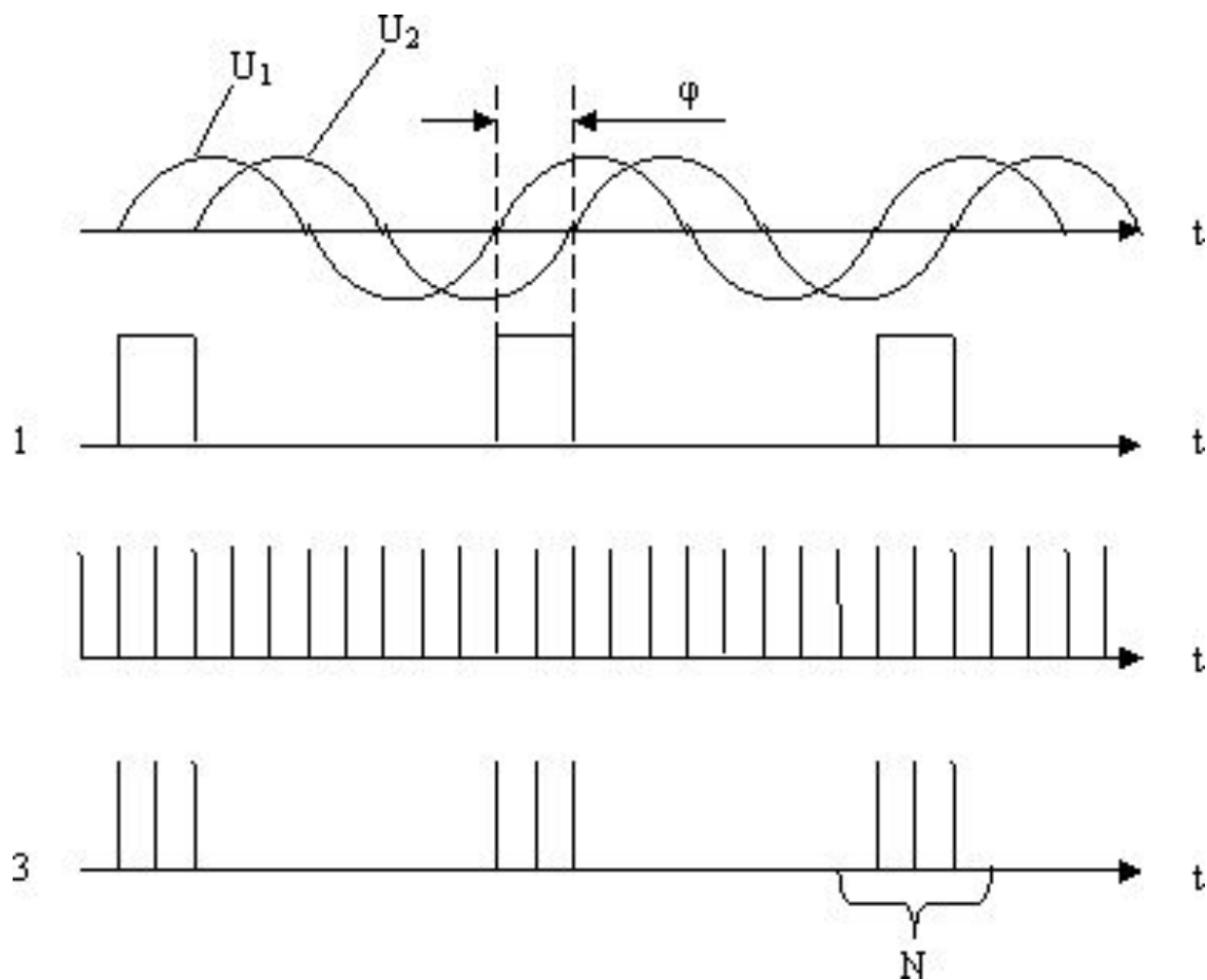


ФЧД – фазочувствительный детектор; ФВ – фазовращатель

Фазометры прямого преобразования.



временная диаграмма сигналов



длительность прямоугольных импульсов

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi}{2\pi f} \quad N = \frac{\Delta t}{T_0} = \Delta t \cdot f_0$$

$$N = \frac{f_0 \cdot \varphi}{2\pi f} (\text{рад}) \quad N = \frac{f_0 \cdot \varphi}{360 f} (\text{град})$$

при измерении Δt получим число импульсов:

$$N_{\Delta t} = \Delta t \cdot f_0 = \frac{\varphi \cdot f_0}{360 \cdot f} = \frac{\varphi}{360} \cdot T \cdot f_0$$

измеряется период T.

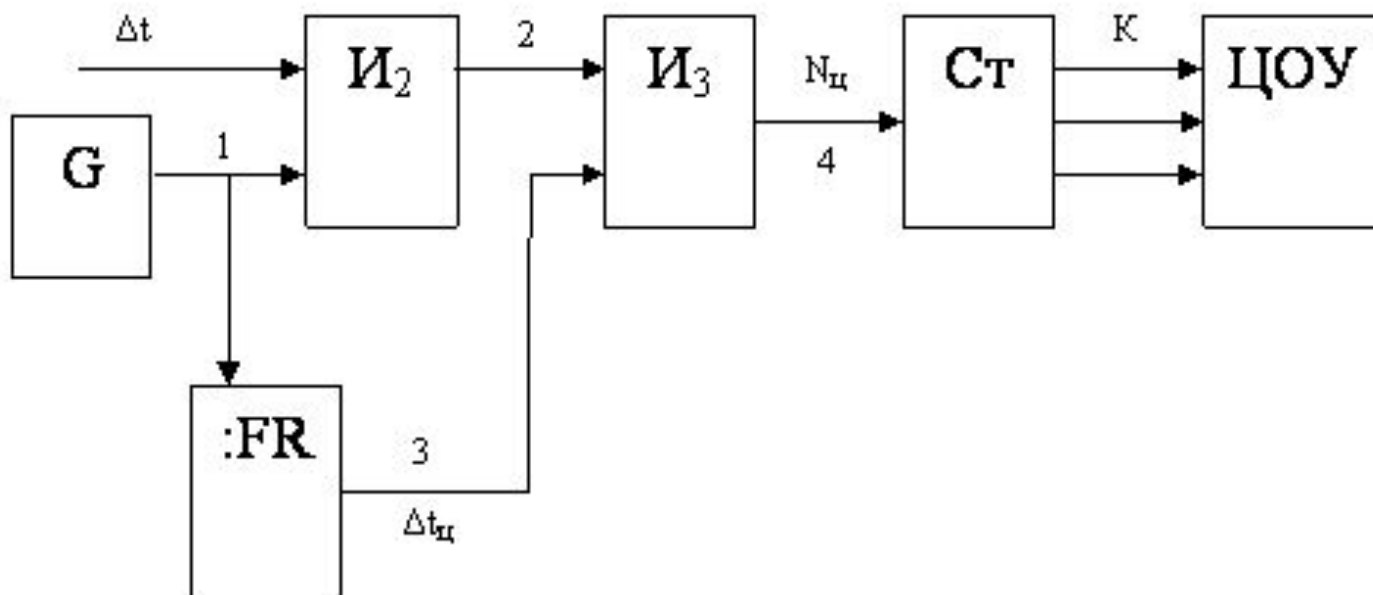
При измерении T получим число

$$N_{\Delta t} = \Delta t \cdot f_0 = \frac{\varphi \cdot f_0}{360 \cdot f} = \frac{\varphi}{360} \cdot T \cdot f_0$$

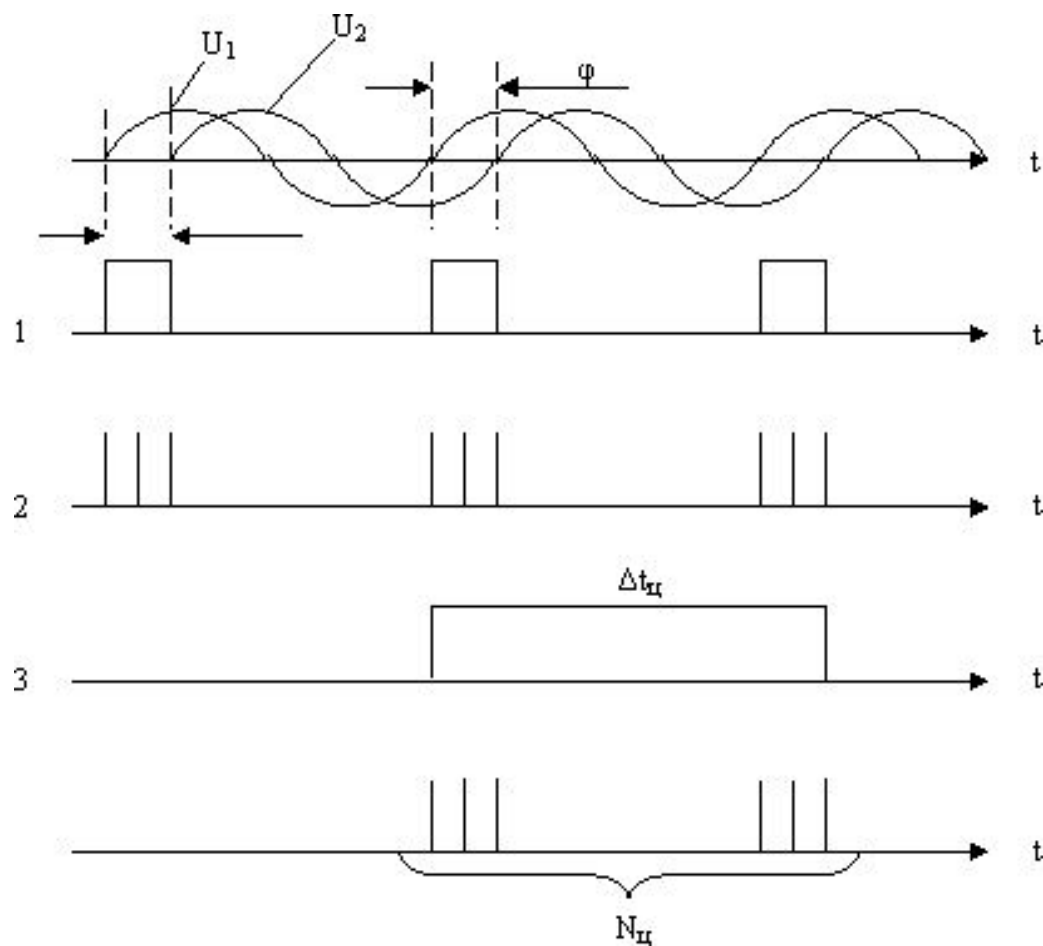
$$N_T = T \cdot f_0 = \frac{T}{T_0} \quad N_{\Delta t} = \frac{\varphi}{360} \cdot N_T \quad \varphi = 360 \cdot \frac{N_{\Delta t}}{N_T}$$

Фазометры с измерением за много периодов.

Структурная схема



временная диаграмма сигналов



на счётчик поступают пачки импульсов

$$N = f_0 \cdot \frac{\varphi}{2\pi f} \qquad N = \frac{f \cdot \varphi}{360 \cdot f}$$

пачки проходят в течение интервала $\Delta t_{\text{ц}}$

$$\Delta t_{\text{ц}} = \frac{KT_0}{2} = \frac{K}{2f_0}$$

количество пачек импульсов:

$$m = \frac{\Delta t_{\text{ц}}}{T} = \Delta t_{\text{ц}} \cdot f \qquad m = \frac{K \cdot f}{2 \cdot f_0}$$

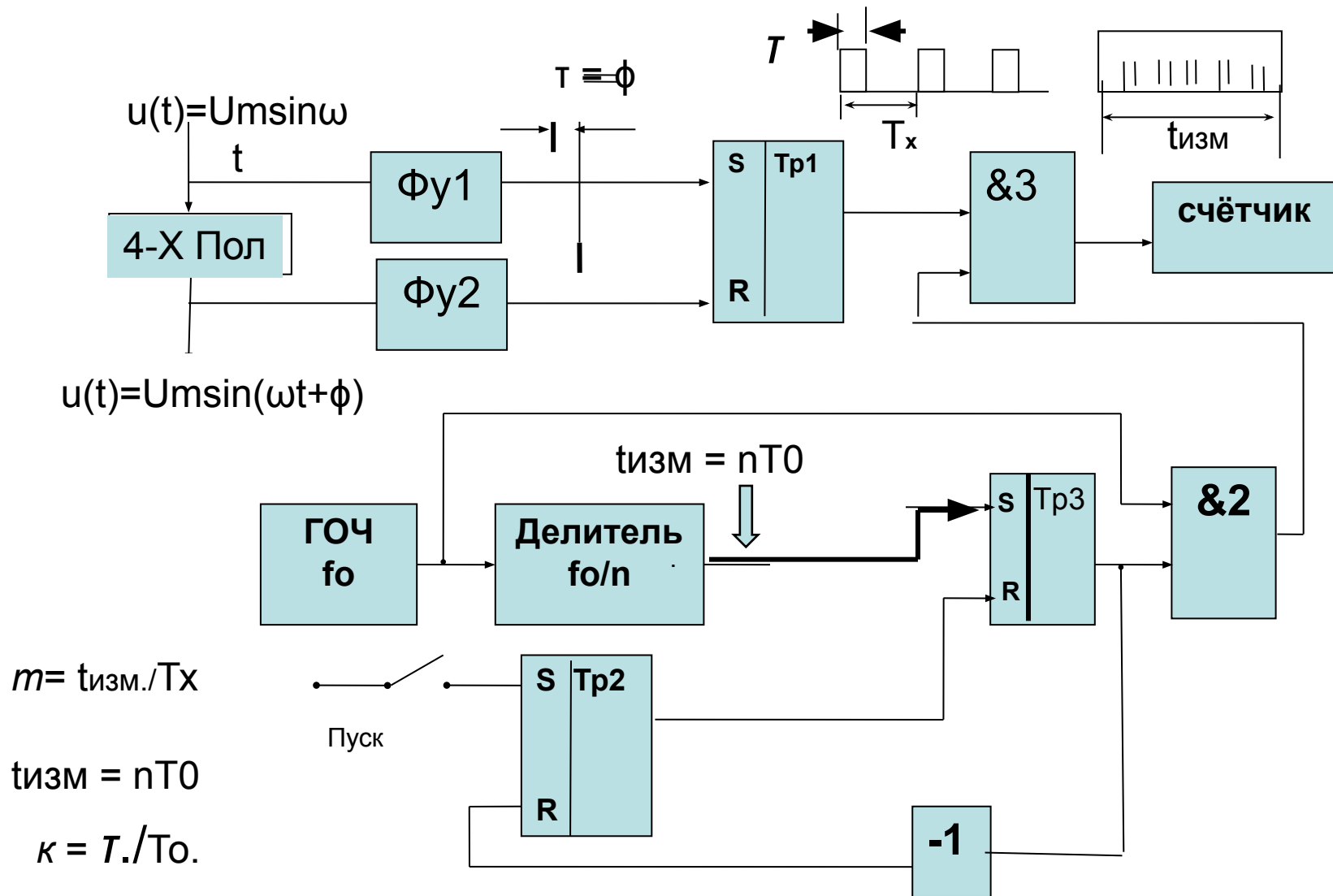
общее количество импульсов $N_{\text{ц}}$, прошедших на
счётчик

$$N_{\text{ц}} = m \cdot N \qquad m = \frac{K \cdot f}{2 \cdot f_0} \qquad N = \frac{\varphi \cdot f_0}{360 \cdot f}$$

$$\Delta t_{\text{ц}} = \frac{KT_0}{2} = \frac{K}{2f_0} \qquad N_{\text{ц}} = \frac{K \cdot \varphi}{720}$$

$$N_{\text{ц}} = \varphi \cdot 10^2 \qquad \varphi = N_{\text{ц}} \cdot 10^{-2} \qquad \varphi = N_{\text{ц}} \cdot g$$

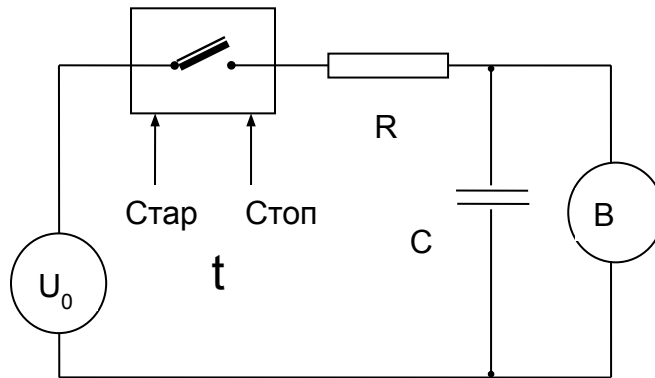
Цифровой двухканальный фазометр.



$$N = \kappa m = \frac{\tau}{T_0} \frac{t_{изм.}}{T_x} = \frac{\tau}{T_0} \frac{nT_0}{T_x} = n \frac{\tau}{T_x}$$

$$N = 2\pi \frac{\tau}{T_x}$$

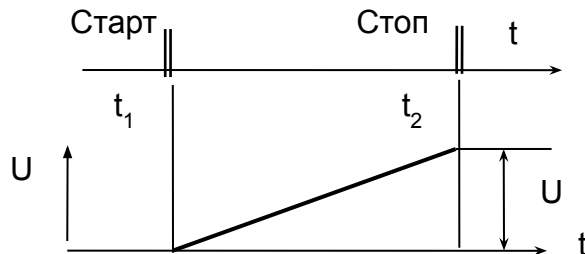
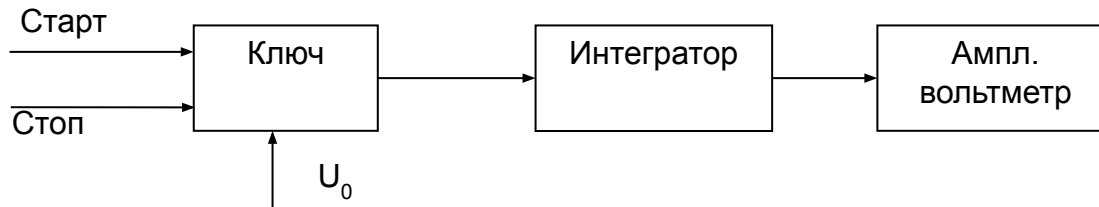
■ Измерение временных интервалов с преобразованием в напряжение



$$U_C = U_0 \left(1 - e^{-t/\tau} \right),$$

$$t = \tau \ln \frac{U_0}{U_0 - U_C} \quad \tau = RC.$$

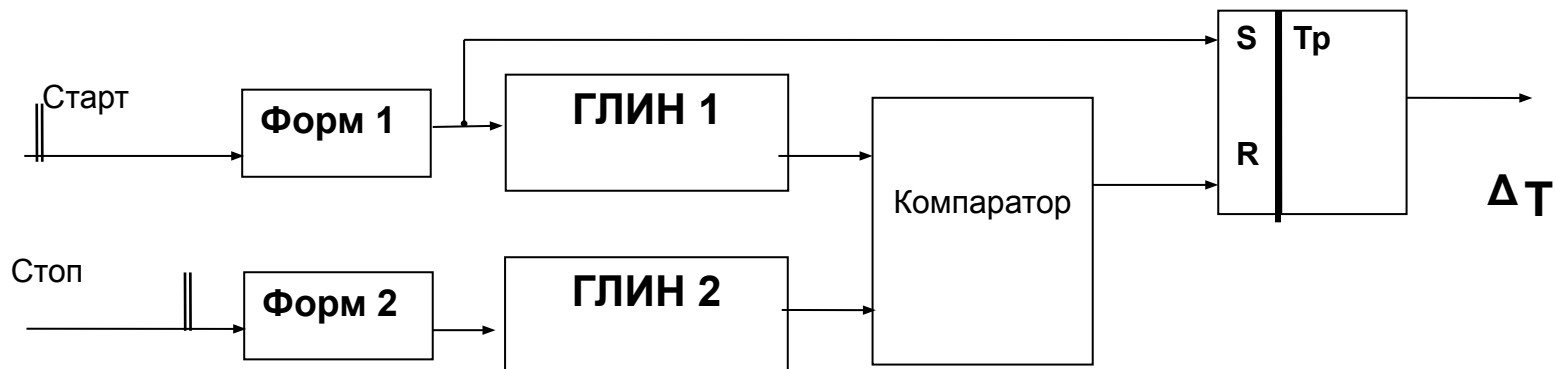
Используя метод заряда конденсатора постоянным током $I = const$



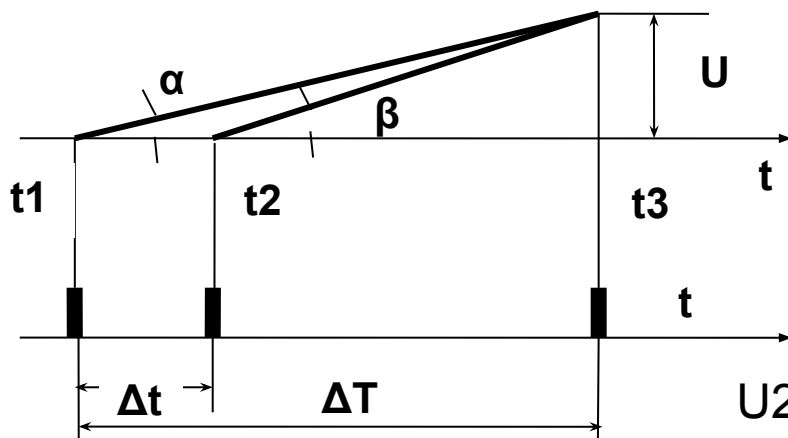
$$U_C = \frac{I}{C} t$$

$$t = \frac{C}{I} U = kU$$

метода масштабного преобразования временного интервала



Временные диаграммы метода трансформации времени.



$$U_1 = \frac{dU_1}{dt} t = \operatorname{tg} \alpha \cdot t = K_1 t$$

$$U_2 = \frac{dU_2}{dt} t = \operatorname{tg} \beta \cdot t = K_2 t$$

$$U_1 = U = \operatorname{tg} \alpha \cdot (t_3 - t_1) =$$

$$U_2 = U = \operatorname{tg} \beta \cdot \{(t_3 - t_1) - (t_2 - t_1)\} = \operatorname{tg} \beta \cdot (\Delta T - \Delta t),$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha} = \frac{K_2}{K_2 - K_1}$$

$$\Delta t = \Delta T \frac{K_2 - K_1}{K_2}$$

Измерение мощности

Энергия, поступающая в нагрузку $dW = u dq = u i dt$

Мгновенная мощность $p = \frac{dW}{dt} = ui$

Мгновенная мощность величина алгебраическая

Если положительные направления u, i одинаковых знаков $p > 0$

Энергия поступает в нагрузку

Если положительные направления u, i разных знаков $p < 0$

Энергия возвращается к источнику

Мощность в цепи переменного тока выражается комплексным числом

Активная мощность – действительная часть.

Реактивная – мнимая часть,

Полная мощность – модуль,

Угол сдвига фаз - аргумент

Единицы измерения мощности

Виды измеряемой мощности

Активная

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad Pa = UI \cos \varphi, \quad u(t) = Um \sin \omega t, \\ i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Активная **(Ватт)** $Pa = U \cdot I \cos \varphi$

Реактивная

(Вар)

$$Q = UI \sin \varphi$$

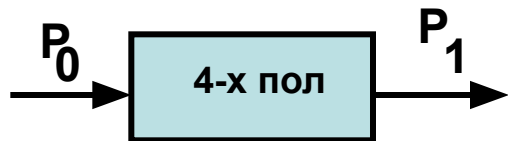
Полная $S = U \cdot I = \sqrt{Q^2 + P^2}.$ **(Вольт-амперы)**

Единицы измерения уровней мощности

Для оценки эффективности передачи энергии по каналу определяется затухание или усиление сигнала

Единица затухания 4-х полюсника Бел (непер)

$$S_{\text{Бел}} = \lg \frac{P}{P_0}$$



При $R_{\text{вх}} = R_{\text{вых}}$

$$P_0 = \frac{U_0^2}{R}, \quad P = \frac{U^2}{R} \quad P = I^2 R \quad S = \lg \frac{I^2}{I_0^2} = 2 \lg \frac{I}{I_0} \quad S = \lg \frac{U^2}{U_0^2} = 2 \lg \frac{U}{U_0}$$

В показательной форме

$$\frac{U}{U_0} = 10^{\frac{S}{20}} \quad \frac{I}{I_0} = 10^{\frac{S}{20}} \quad \frac{P}{P_0} = 10^{\frac{S}{10}}$$

Практически применяют децибелы

$$S_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{P}{P_0} = 20 \lg \frac{U}{U_0} = 20 \lg \frac{I}{I_0}$$

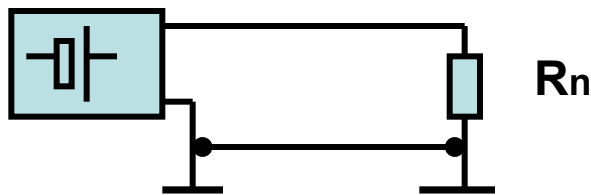
В показательной форме

$$\frac{U}{U_0} = 10^{0,5S}, \quad \frac{I}{I_0} = 10^{0,5S} \quad \frac{P}{P_0} = 10^S$$

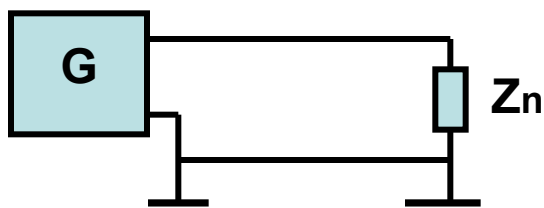
Принципы оценки мощности

В цепях постоянного тока

$$P_n = I_n U_n, P_n = I_n^2 \cdot R_n \quad P_n = \frac{U_n^2}{R_n}$$



В цепях переменного тока



$$U(t) = U_m \sin \omega t$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$$

а) Оценка мгновенной мощности в нагрузке

$$P(t) = u(t)i(t) = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + \phi)$$

$$= 0,5 U_m I_m \cos \phi -$$

$$0,5 U_m I_m \cos(2\omega t + \phi)$$

б) Оценка средней мощности в нагрузке за период - активная мощность

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{2} U_m I_m \cos \varphi + 0 = \frac{1}{2} U \sqrt{2} \cdot I \sqrt{2} \cos \varphi = UI \cos \varphi$$

$$P = 0,5 U_m I_m \cos \phi = UI \cos \phi$$

При работе на согласованную нагрузку

$$P = UI \cos \phi$$

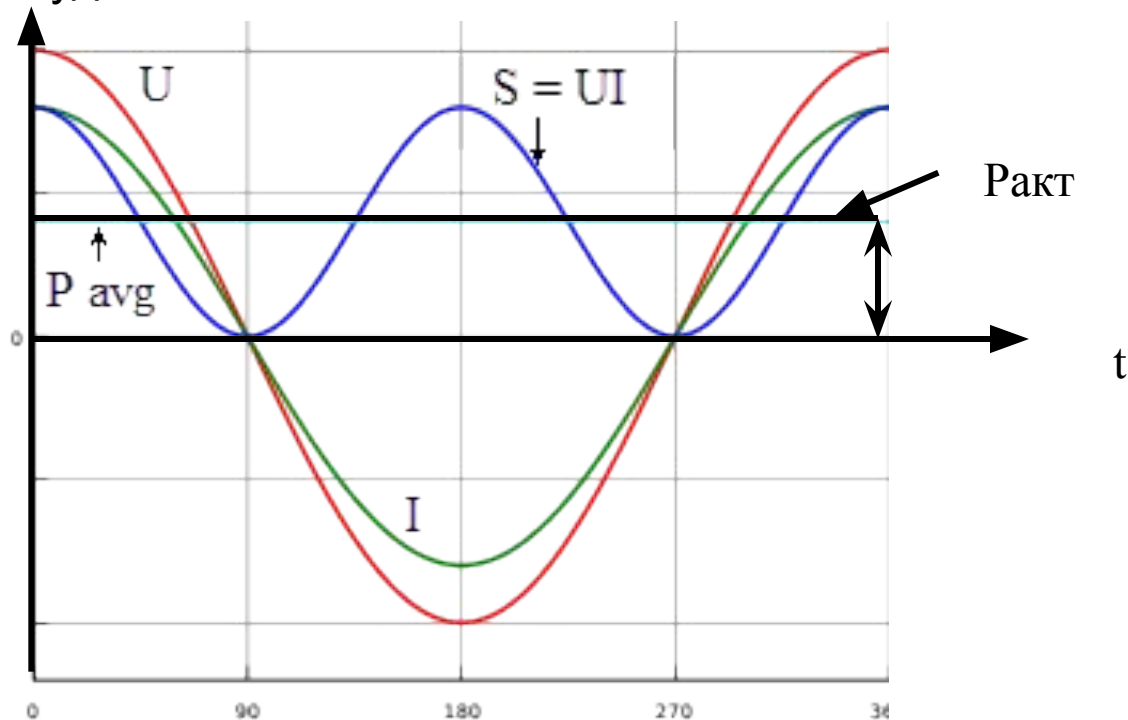
Активная, реактивная и полная мощность

Активная мощность – $P = UI \cos \varphi$ скорость необратимого превращения электрической энергии в другие виды: тепловую, электромагнитную

Реактивная мощность – $Q = UI \sin \varphi$ величина, характеризующая нагрузки, создаваемые колебаниями энергии электромагнитного поля в цепи переменного тока. Она вызывает в эл. цепях дополнительные активные потери (расход энергии на станциях) и потери напряжения в сети. Реактивная энергия не участвует в работе эл. тока.

Полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

При отсутствии реактивных элементов и сдвига фаз в нагрузках, мгновенная мощность в полупериоде $U_{\max} \cdot I_{\max}$ будет максимальной



$\varphi = 0^\circ$ $\sin 90^\circ = 0$ $\cos 90^\circ = 1$ В этом случае:

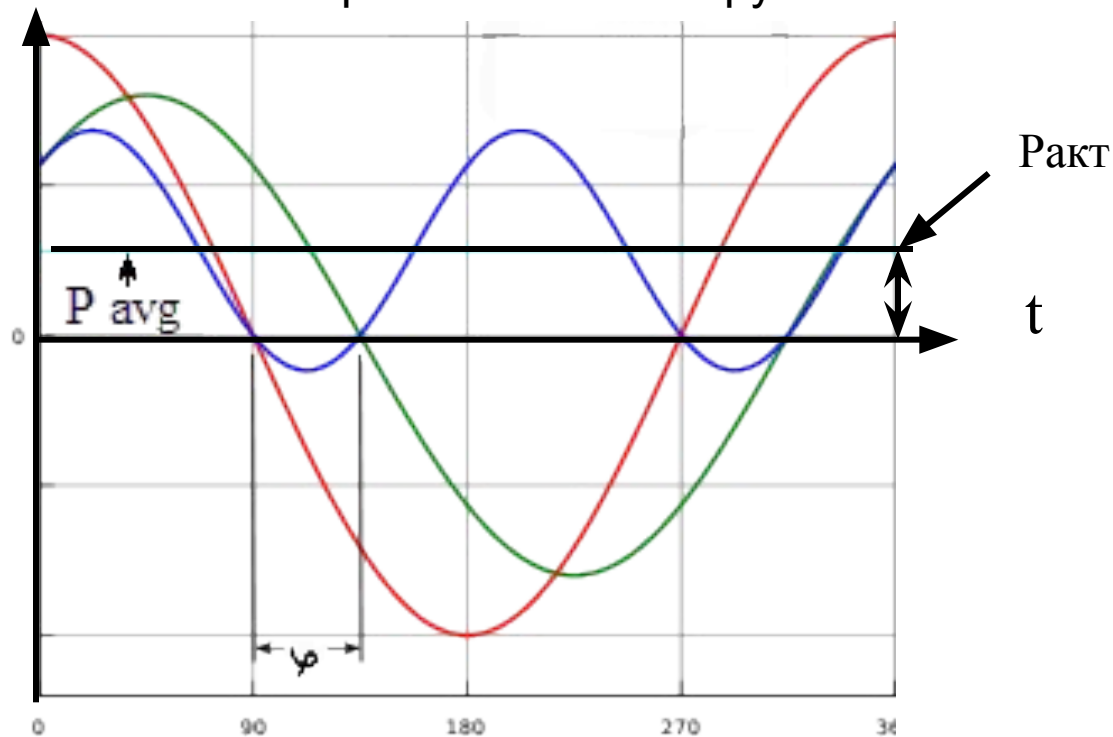
Реактивная мощность $Q = UI \sin 0 = 0$

Потребляемая мощность $P = UI \cos 0 = UI$

Полная мощность $S = UI = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$ будет равна потребляемой мощности

Коэффициент мощности $P/S = 1$

рисунок графиков со сдвигом фаз 45° , для случая равенства активного и реактивного сопротивлений в нагрузке.



$$\phi = 45^\circ \quad \sin 45^\circ = \cos 45^\circ = \sqrt{2}/2 \approx 0.71$$

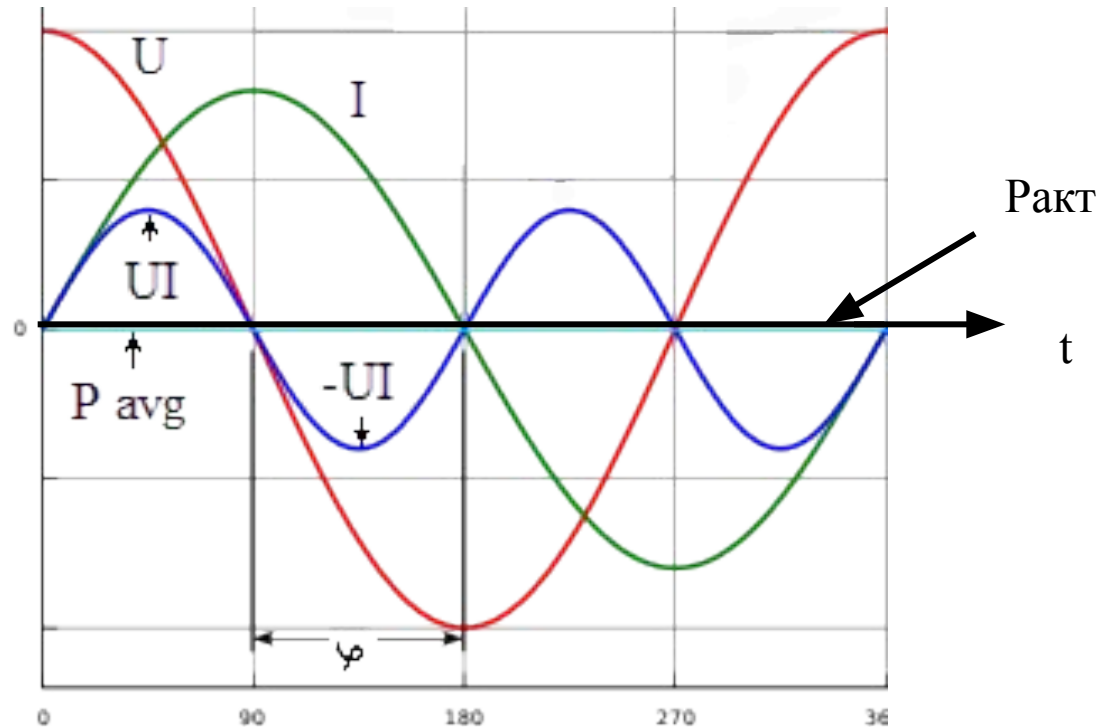
$$\text{Реактивная мощность } Q = UI \sin 45^\circ = 0.71 UI$$

$$\text{Потребляемая мощность } P = UI \cos 45^\circ = 0.71 UI$$

$$\text{Полная мощность } S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI$$

$$\text{Коэффициент мощности } P/S = 0.71$$

средняя (активная) потребляемая мощность P_{avg} за период будет равна нулю.



$$\varphi = 90^\circ \quad \sin 90^\circ = 1 \quad \cos 90^\circ = 0$$

$$\varphi = 90^\circ \quad \sin 90^\circ = 1 \quad \cos 90^\circ = 0$$

При отсутствии активной составляющей в нагрузке, сдвиг фаз между напряжением и током составит 90° .

Принципы оценки мощности

Реактивная мощность для периодического переменного тока

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \sin(\omega t - \varphi) dt$$

$$Q = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \sin \varphi = UI \sin \varphi$$

Индуктивность $\varphi > 0^\circ \rightarrow Q > 0$ Ёмкость $\varphi < 0^\circ \rightarrow Q < 0$

Активность $\varphi = 0^\circ \rightarrow Q = 0$

В трёхфазных цепях

$$P = \sum_{i=1}^3 U_{\hat{o}i} I_{\hat{o}i} \cos \varphi \quad Q = \sum_{i=1}^3 U_{\hat{o}i} I_{\hat{o}i} \sin \varphi$$

При равномерной нагрузке

$$P = 3U_{\hat{o}} I_{\hat{o}} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\check{E}} I_{\check{E}} \cos \varphi \quad Q = 3U_{\hat{o}} I_{\hat{o}} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{\check{E}} I_{\check{E}} \sin \varphi$$

Принципы оценки мощности

В общем случае

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{K=0}^{\infty} U_{K\text{m}} \sin(k\omega t + \varphi_K) \right] \cdot \left[\sum_{K=0}^{\infty} I_{K\text{m}} \sin(k\omega t - \varphi_K) \right] dt.$$

Так как произведение мгновенных значений сигналов разной частоты равно нулю

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{K=0}^{\infty} U_{K\text{m}} I_{K\text{m}} \sin(k\omega t + \varphi_K) \cdot \sin(k\omega t - \varphi_K) dt = \sum_{K=0}^{\infty} U_K I_K \cos \varphi_K = \sum_{K=0}^{\infty} P_K$$

Когда надо знать P, U, I используют понятие полной мощности

$$S = UI = \sqrt{\sum_{K=0}^{\infty} U_K^2 \cdot \sum_{K=0}^{\infty} I_K^2} \quad S = UI \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} = UI$$

Коэффициент мощности

$$K_{\varphi} = \frac{P}{S} \quad \hat{=} \quad \cos \varphi \quad K_{\varphi} = \cos \varphi$$

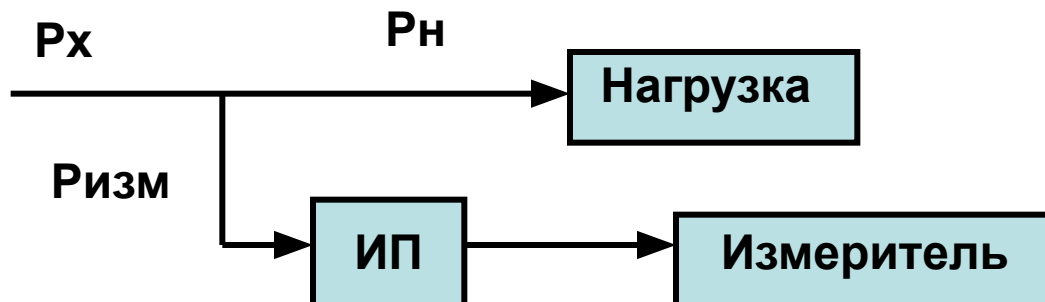
Классификация методов измерения мощности

1. По способу включения в тракт передачи (по назначению)

Проходящей мощности

$$P_x = P_n + P_{изм}$$

$$P_{изм} \ll P_x$$



Поглощаемой мощности

$$P_x = P_n$$



2. По виду первичных ИП

1. Эл. механические
2. Электронные
3. тепловые

3. По типу тракта передачи

1. 2-х проводная,
2. Коаксиальная,
3. Волновая

Классификация методов измерения мощности

По характеру измеряемой мощности

1. Среднего значения:

- Непрерывного сигнала
- Импульсного сигнала,

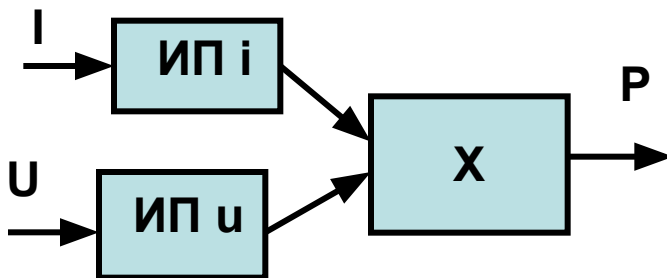
2. Активной, реактивной, полной

По уровню

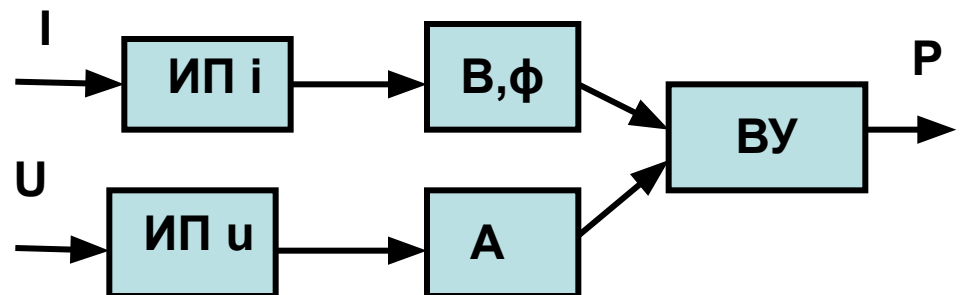
$P < 10^{-6}$ Вт, $P < 0,1$ Вт, $P = 1 \div 10$ Вт, $P = 10 \div 10^3$ Вт, $P > 10^3$ Вт,

По способу преобразования мощности.

Прямые



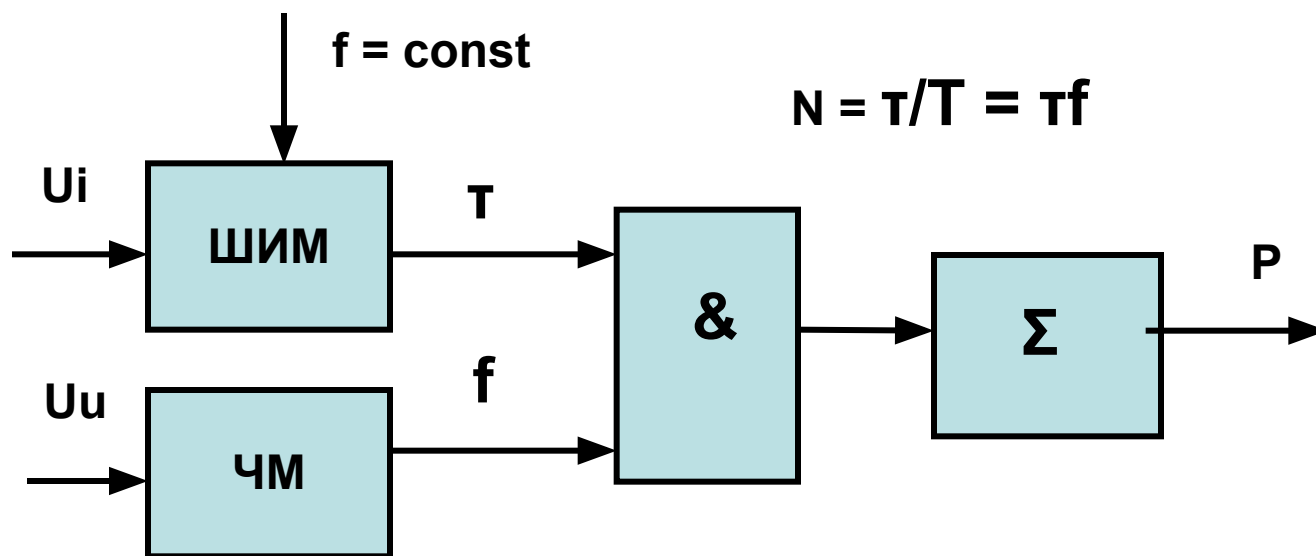
Косвенные



Преобразователи с модуляцией сигнала

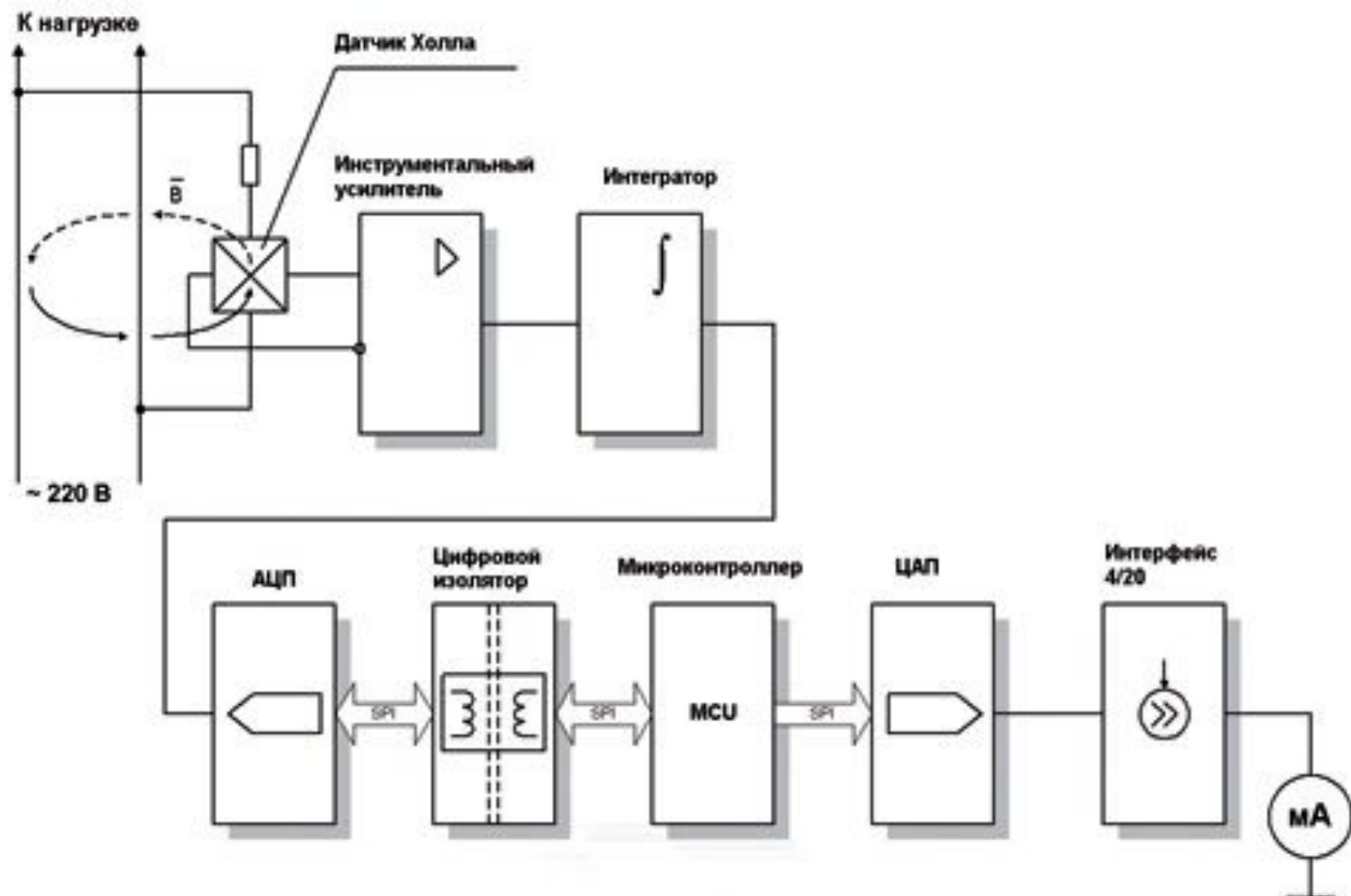
Аналоговые U, I в параметры импульсных сигналов: $U_{и}, T_{и}, f_{и}$. $T_{и}$ с последующим интегрированием (усреднением).

Модуляции: ШИМ – ЧМ, ШИМ –ШИМ, ШИМ –АМ.



$$f = K_1 U_u, T = K_2 U_i, N = Tf = K_1 K_2 U_u U_i = KP$$

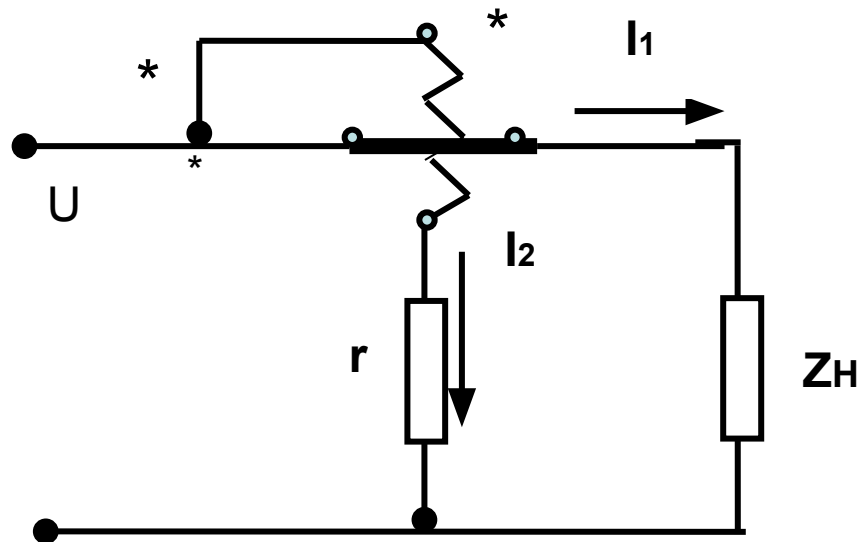
Гальваномагнитный датчик мощности



Преобразователи мощности

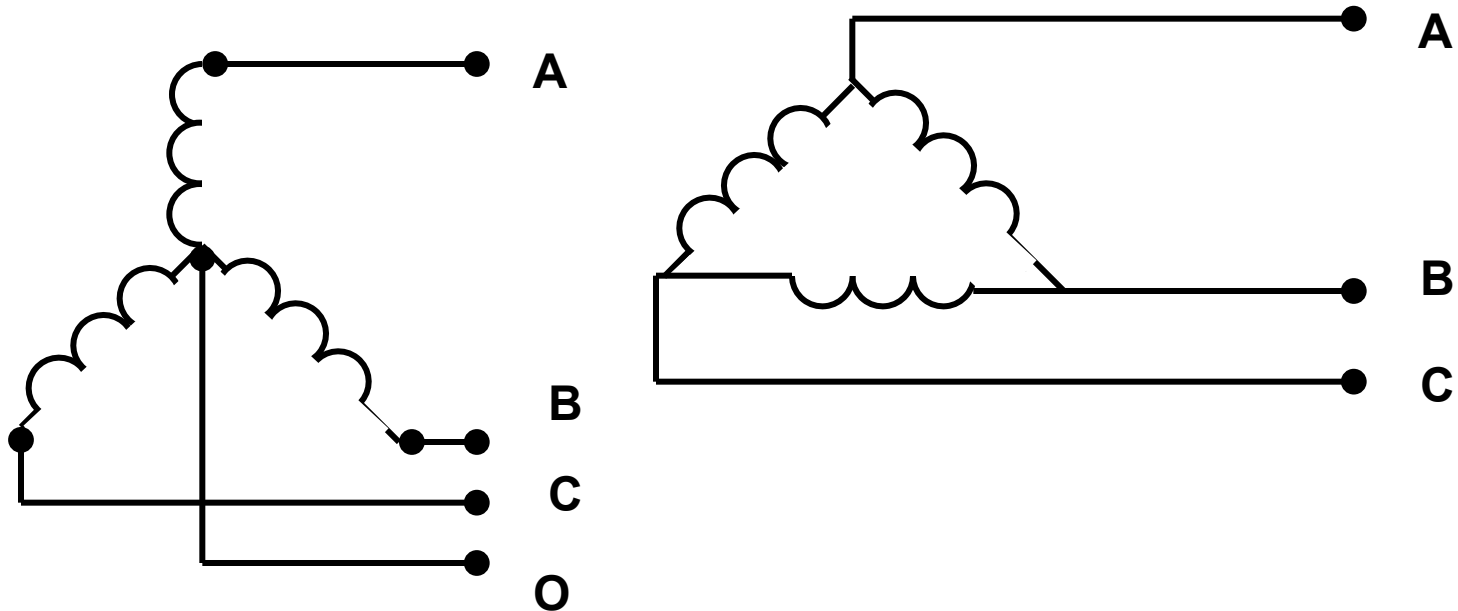
1. Электромеханические

$$\alpha = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 \cdot I_2 = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 \frac{U}{r}, \quad \alpha = \frac{d\dot{I}_{12}}{d\alpha} \frac{1}{\dot{O}} \int_0^{\dot{O}} (ui) \cdot dt \quad \alpha = kP$$



Измерение мощности трёхфазного тока

- Вид электрической цепи



Измерение мощности трёхфазного тока

В зависимости от вида трёхфазной системы, её симметрии схемы измерения различны:

Для системы с симметричной нагрузкой и любой схемы соединения фаз приёмника – метод одного ваттметра.

$$P_{\Sigma} = \sqrt{3}IU \cos \varphi$$

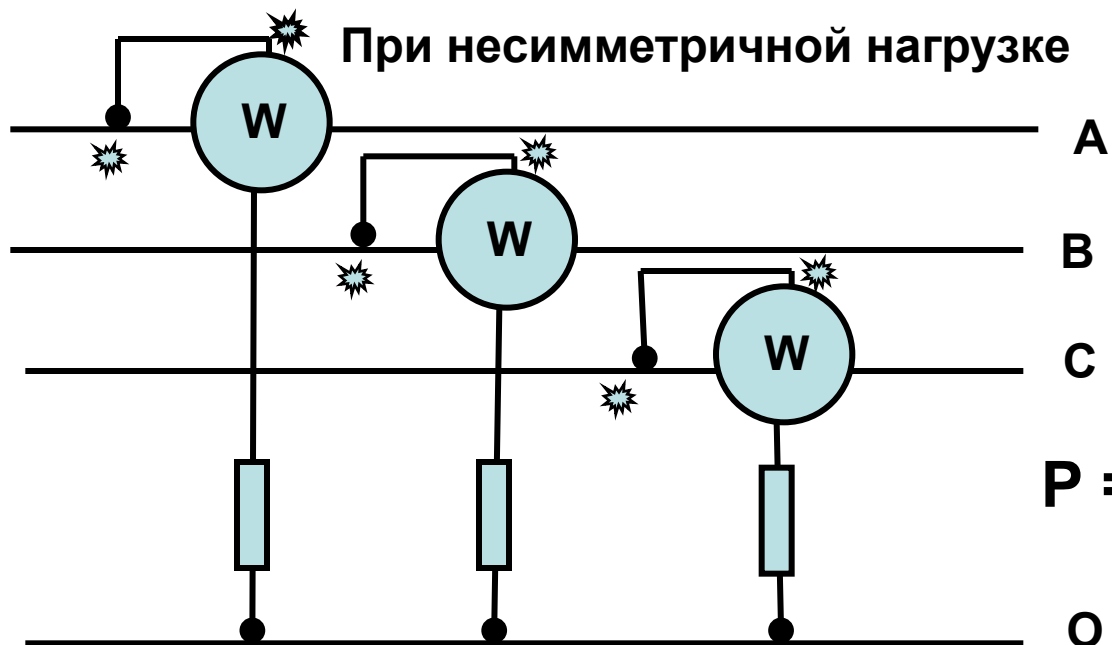
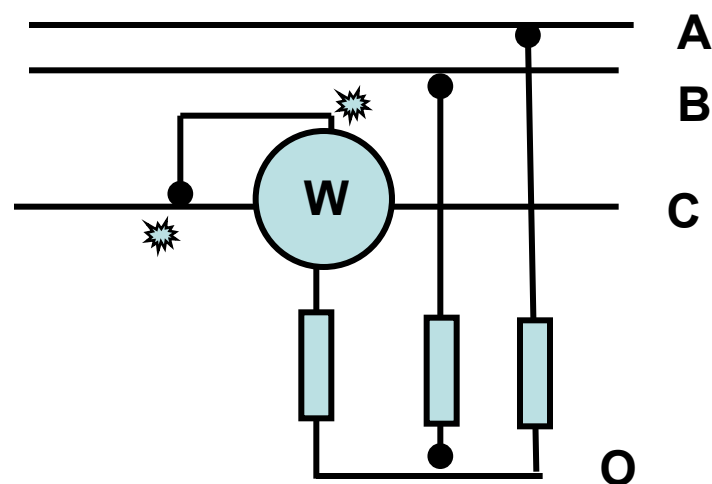
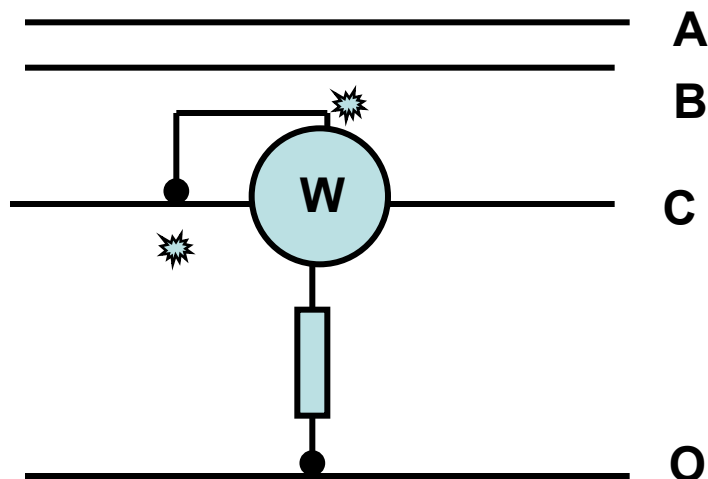
для системы с несимметричной нагрузкой и любой схемы соединения фаз приёмника - метод двух ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} \quad P_{W1} = UI \cos(30^\circ + \varphi) \quad P_2 = UI \cos(30^\circ - \varphi)$$

Четырёхпроводная система – метод трёх ваттметров

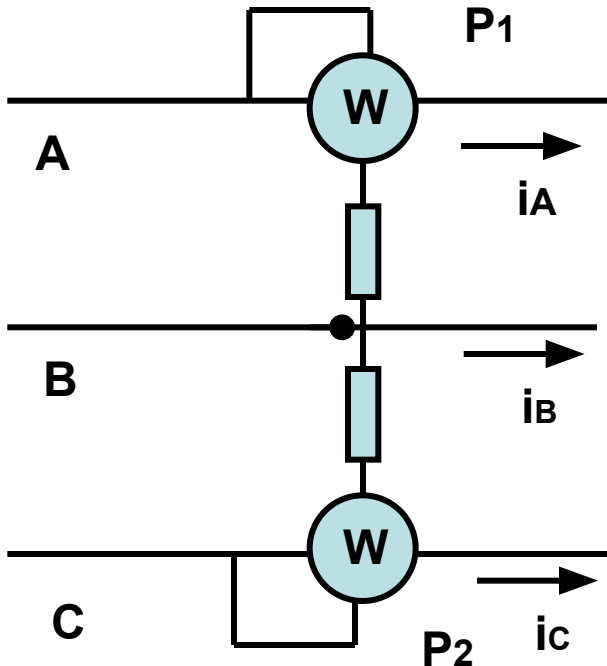
$$P = P_{WA} + P_{WB} + P_{WC}$$

Схемы измерения активной мощности



$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

Метод двух ваттметров

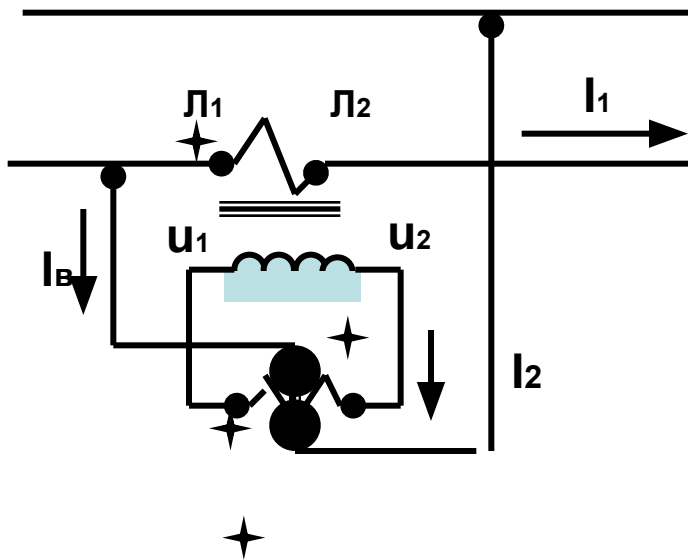


$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 = (u_A - u_B)i_A + (u_C - u_B)i_C$$

$$P_{\Sigma} = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C, \quad i_A + i_B + i_C = 0$$

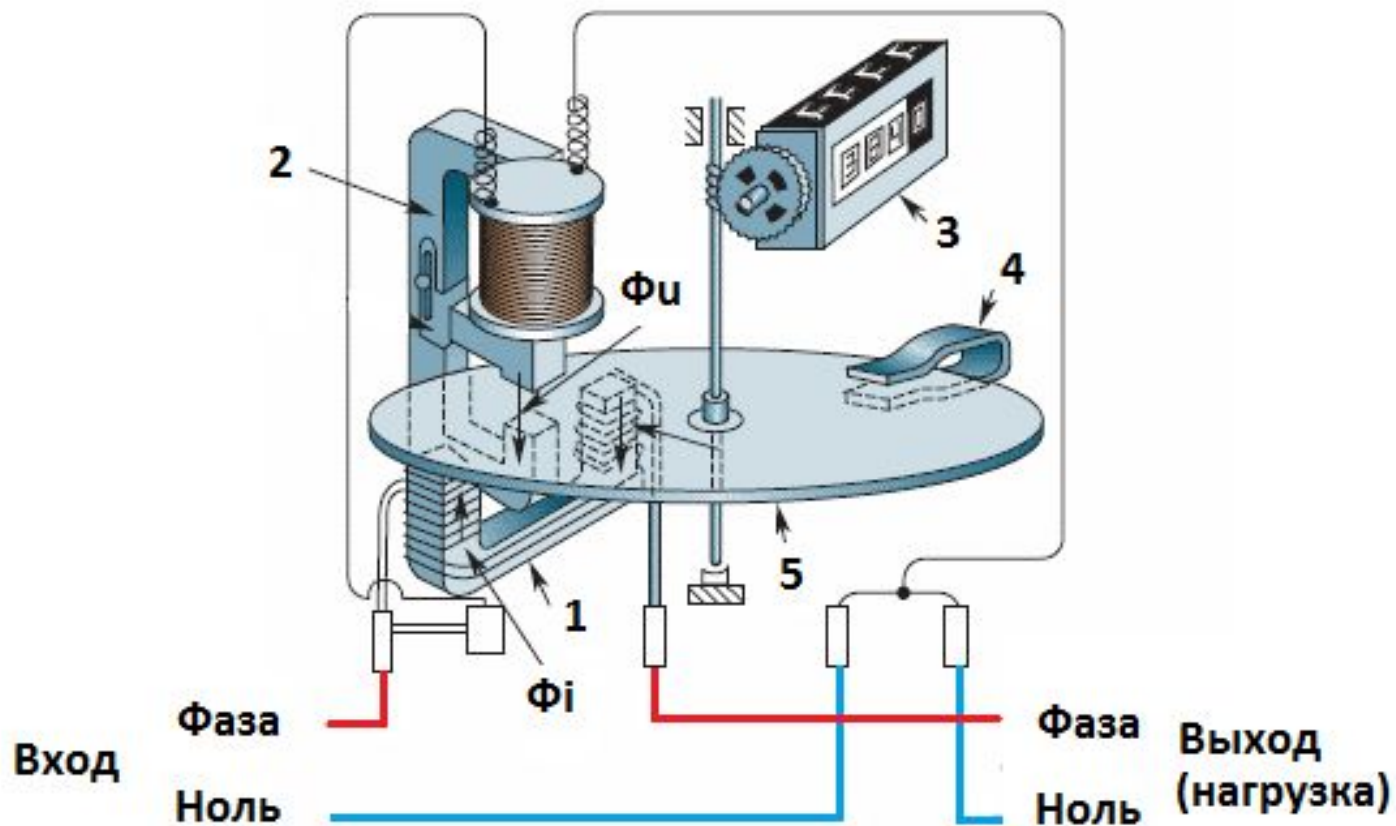
Один измерительный механизм

Схема включения ваттметра с трансформатором тока



$$P = I_2 U_1 \cos(180^\circ - \phi) = I_2 U_1 \cos \phi$$

Счётчики эл. энергии



Принцип работы электронного электросчетчика



Терморезистивный метод измерения СВЧ мощности

- Термистор

Терморезистор п/п

Стекланный корпус

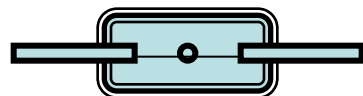
Выводы

Термочувствительная плёнка Pt

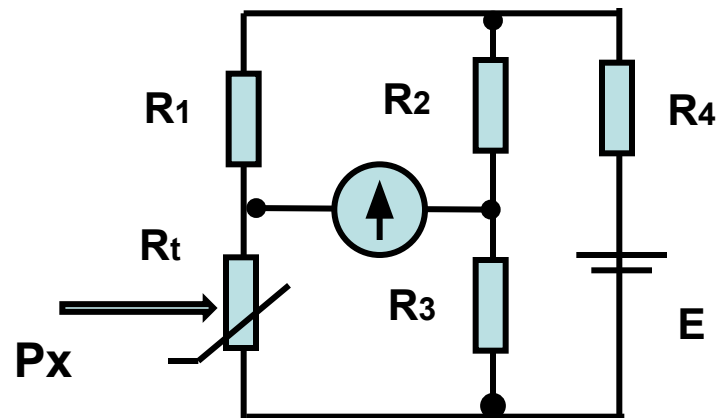
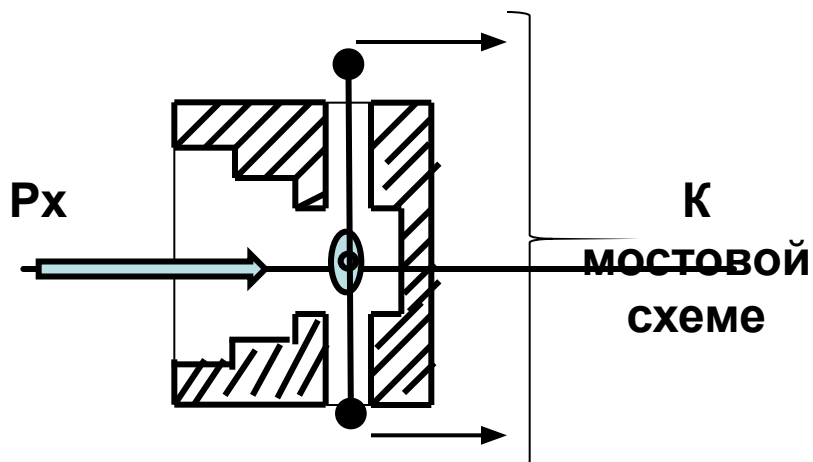
Подложка

Болометр

Контакты



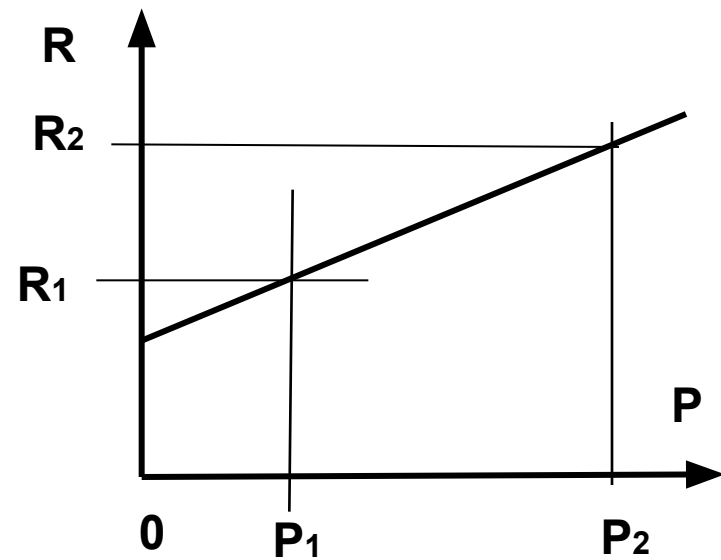
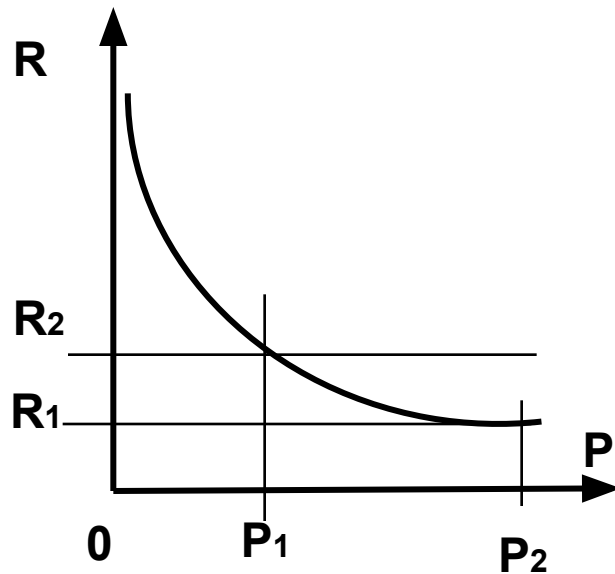
Приёмные преобразователи



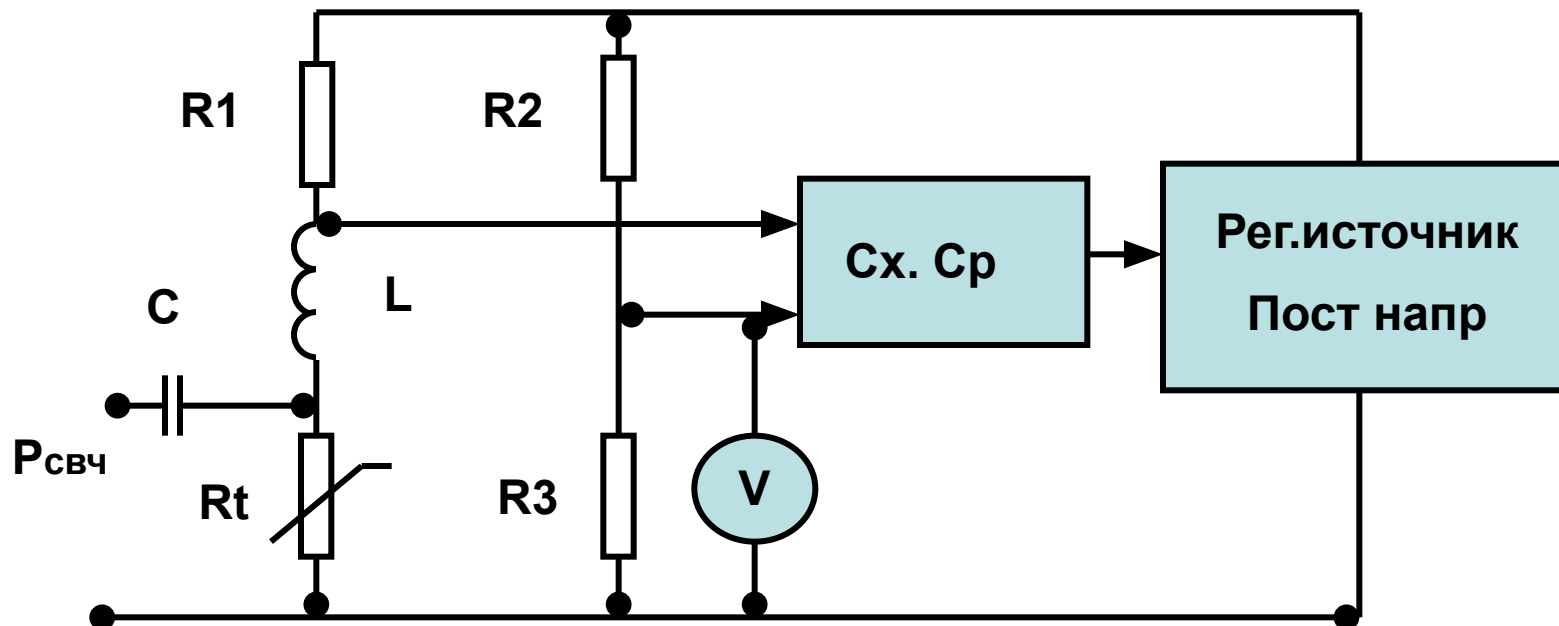
Измерение ВЧ мощности

Тепловые методы $P_{\text{свч}} \rightarrow Q/t \rightarrow Ct\Delta\Theta$ $P_{\text{свч}} = Q/t = Ct\Delta\Theta$

C – теплоёмкость, t – время, $\Delta\Theta$ – перепад температур рабочего тела



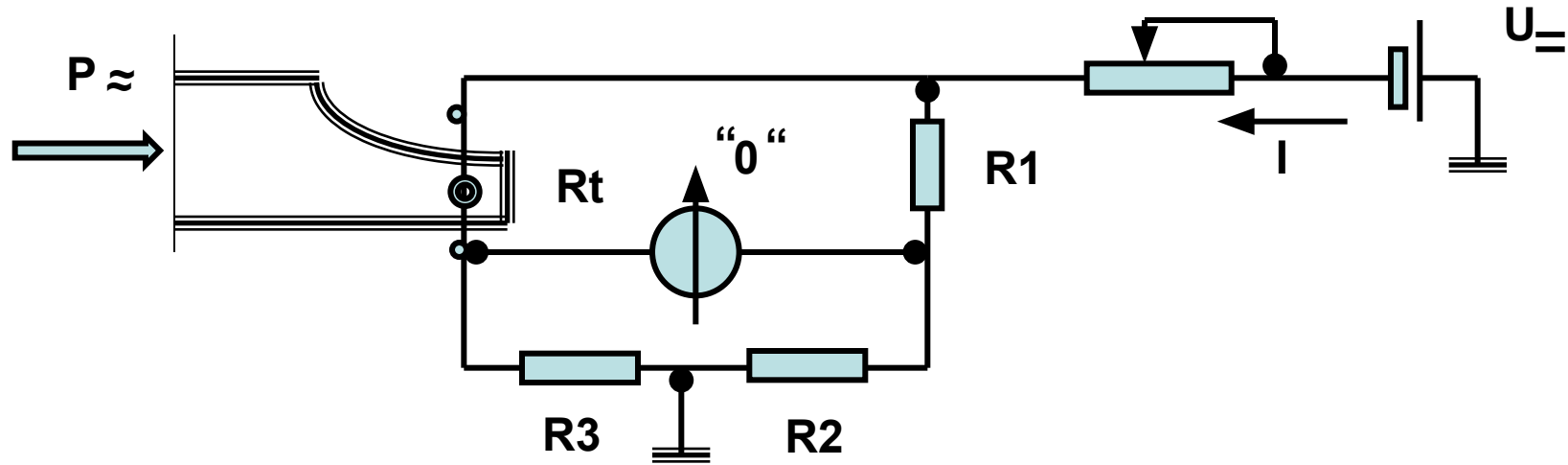
Термисторный мост ваттметра



A) $P_x=0, R_1=R_2=R_3=R_t=R$ $P_1 = \frac{U_1^2}{R}$

B) $P_x \neq 0$ $P_2 + P_{вч} = P_{вч} + \frac{U_2^2}{R}$ $D_{\hat{A}x} = D_1 - D_2 = \frac{(U_1^2 - U_2^2)}{R}$

Мостовые методы измерения мощности

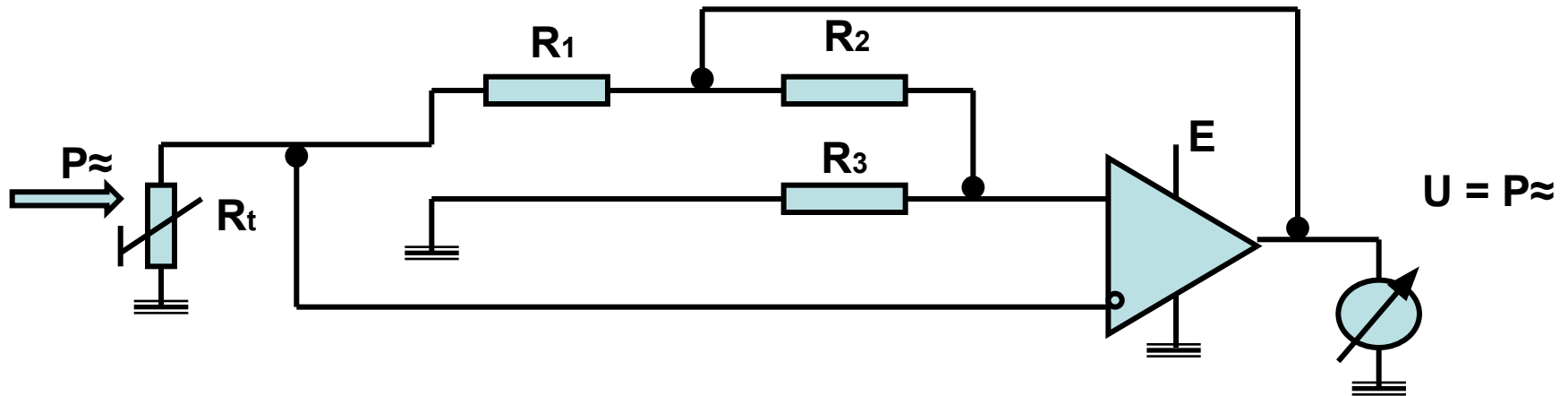


$$P_x=0, P_1 = \frac{I_1^2}{4} R_t$$

$$P_x \neq 0, P_2 = \frac{I_2^2}{4} R_t + P_x$$

$$P_x = \left[\frac{I_1^2}{4} - \frac{I_2^2}{4} \right] R_t$$

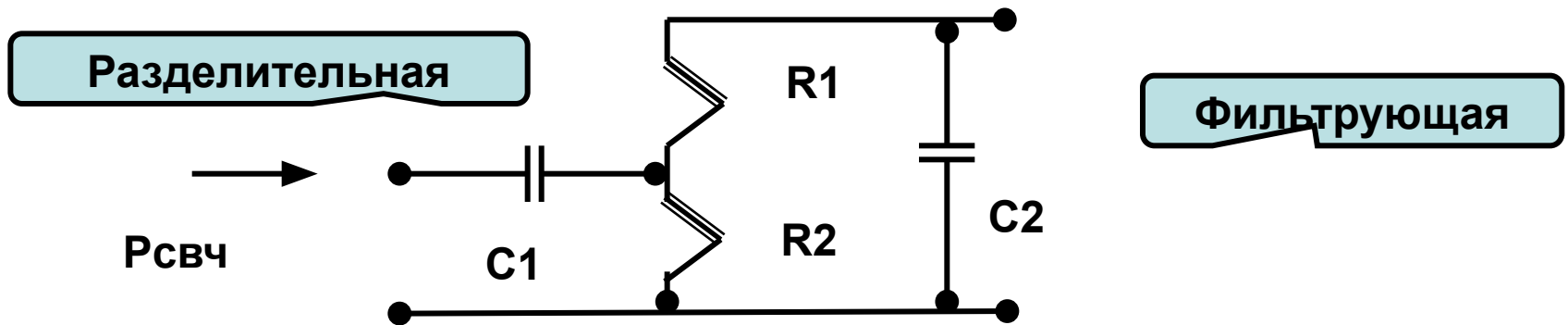
Автобалансный термисторный мост



$$\frac{U_{\text{f.äx}}^2}{2R_t} - \frac{U^2}{2R_t} = \frac{1}{2R_t} (U_{\text{f.äx}}^2 - U^2) = P_{\text{ç.äi}}$$

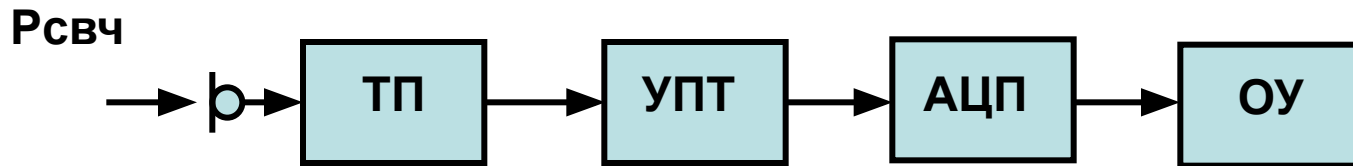
Диапазон P 10 мкВт ÷ 10^4 мкВт

Термоэлектрический преобразователь

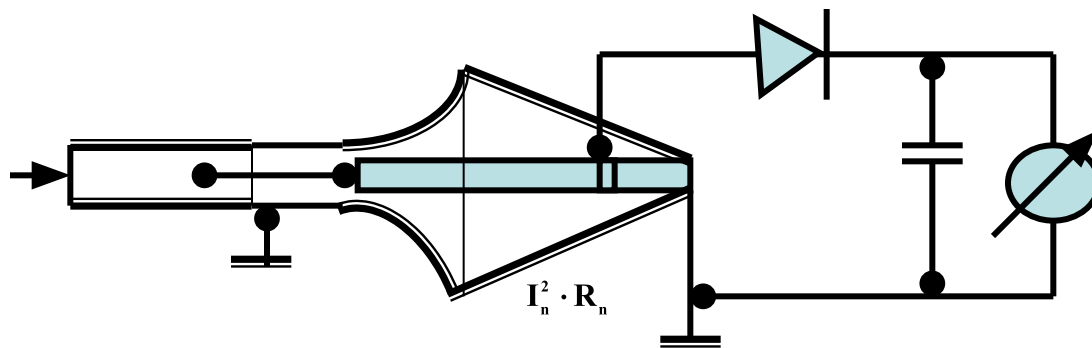


Тепловая энергия выделяется на сопротивлениях термопар

Структурная схема цифрового термоваттметра



Диодные ваттметры



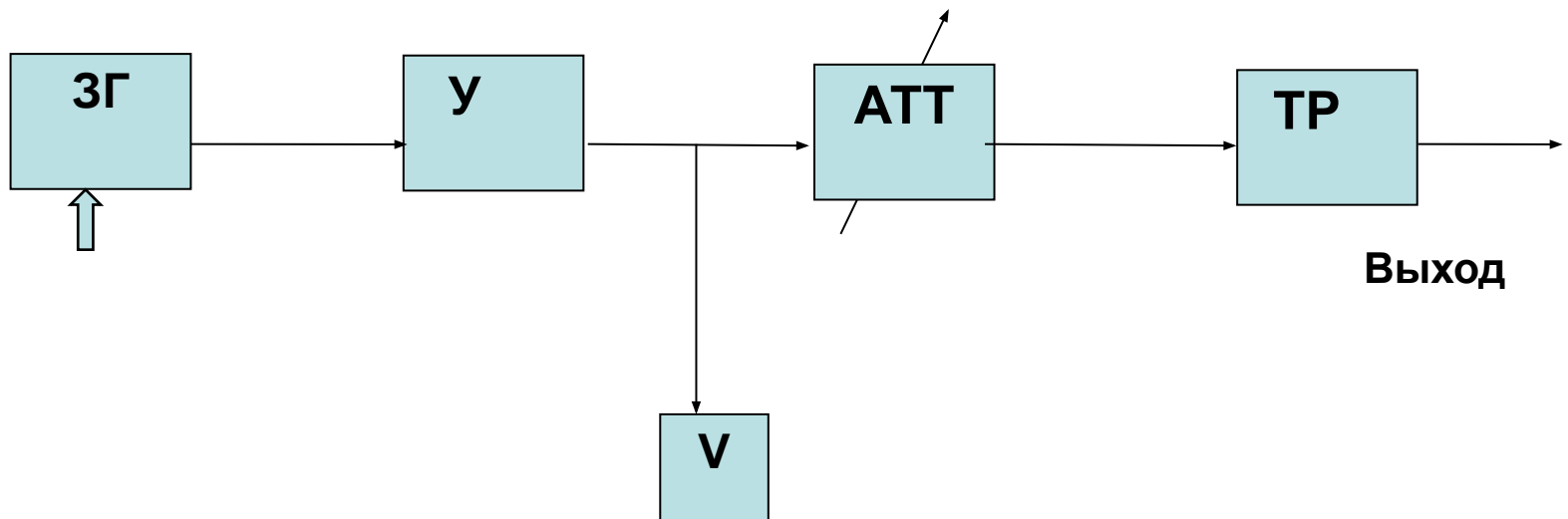
$$P_{\hat{A} \times} = K \left(\frac{U_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \frac{1}{R}$$

$$K = (R1 + R2) / R2$$

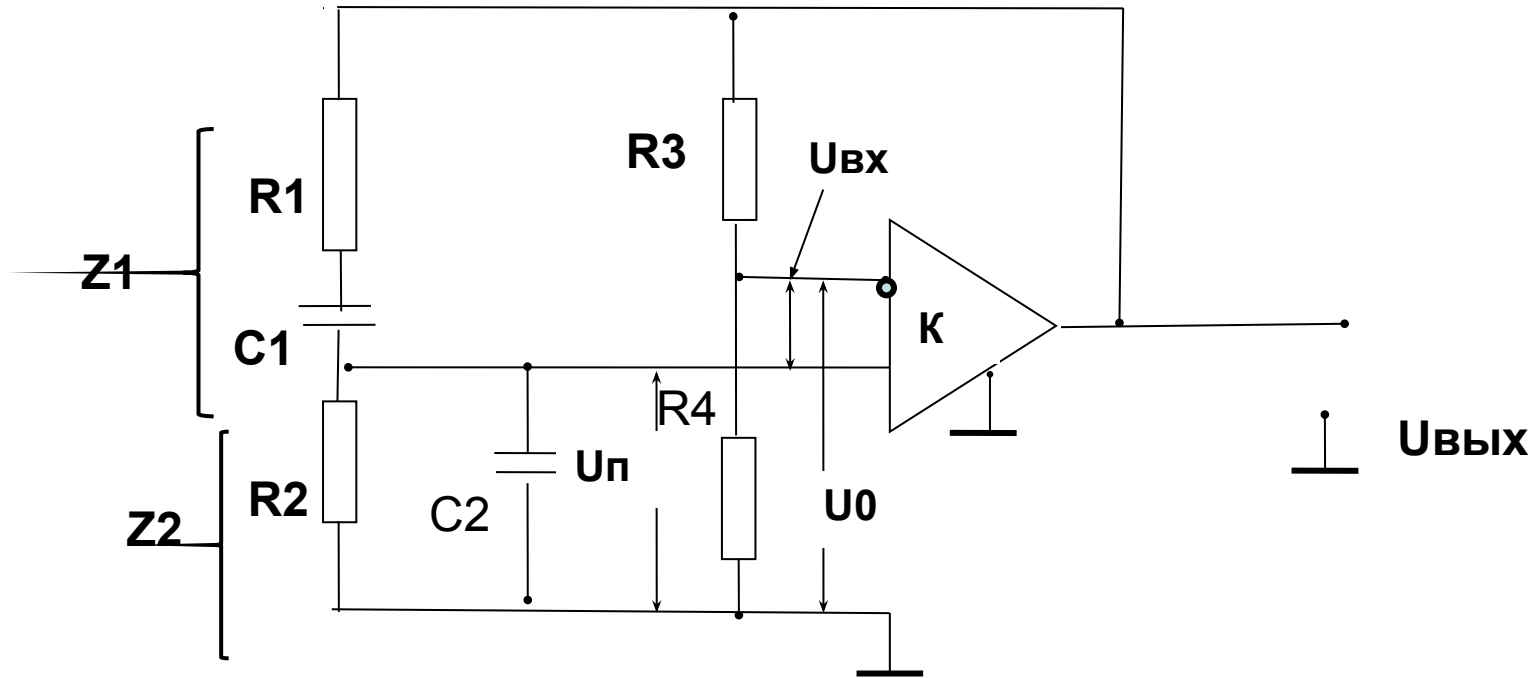
Измерительные генераторы

Измерительные генераторы

- Генераторы измерительных сигналов низкой частоты
- Диапазон частот 20 Гц – 20 кГц и 20 Гц – 200 кГц
- Структурная схема генератора НЧ



RC - генераторы



Баланс моста **$Z_1 R_4 = Z_2 R_3$** при $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, $R_3 = 2R_4$

$$U_i = \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} U_{\text{авт}} \quad U_0 = \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} U_{\text{авт}} \quad \omega = \frac{1}{RC}, \quad f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

$$\gamma = \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad \text{Коэф. ПОС} \quad \beta = \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} \quad \text{Коэф. ООС}$$

Условия генерации

При $R_3 = 2R_4$

$$U_{\tilde{i}} = \gamma U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{o}} \quad U_{\tilde{i}} = \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{o}}$$

$$\beta = \frac{1}{3}, \quad K=3$$

$$U_o = \beta U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{o}} \quad U_o = \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{o}}$$

При $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$

. Баланс фаз при $Z_1 \cdot R_4 = Z_2 \cdot R_3$
0.

$\Phi_{\text{ВЫХ}} - \Phi_{\text{ВХ}} =$

$$\omega = \frac{1}{RC}, \quad f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Баланс амплитуд. $\gamma \cdot \beta = 1$

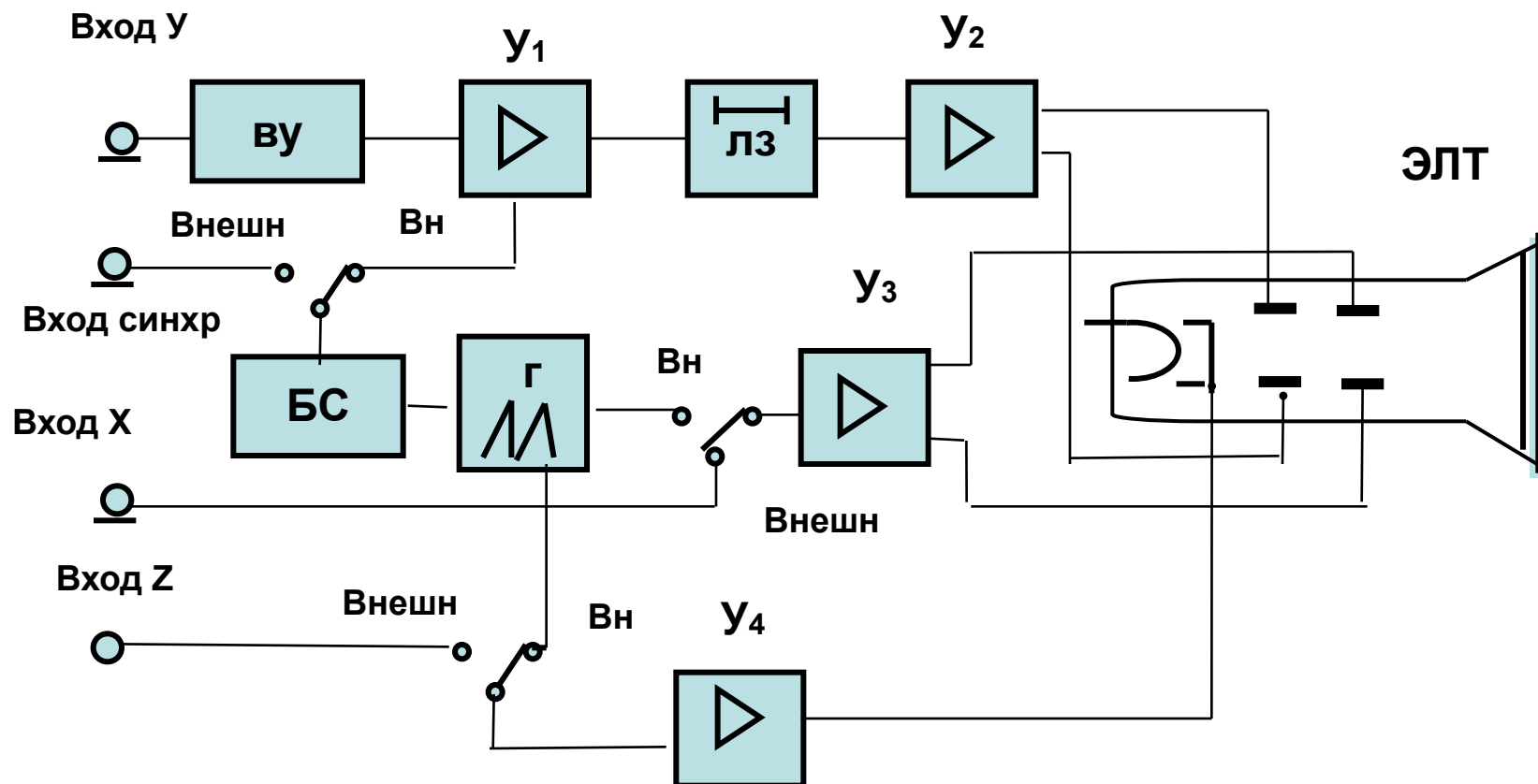
$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{П}} - U_o = \left(\gamma - \beta \right) U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{o}} \quad K = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{o}}}{U_{\hat{A}\tilde{o}}} = \frac{1}{\gamma - \beta}, \quad K_{oc} = \frac{K}{1 - K(\gamma - \beta)}$$

$$K(\gamma - \beta) = 1 \quad \text{Условие генерации колебаний}$$

Электронно-лучевой осциллограф

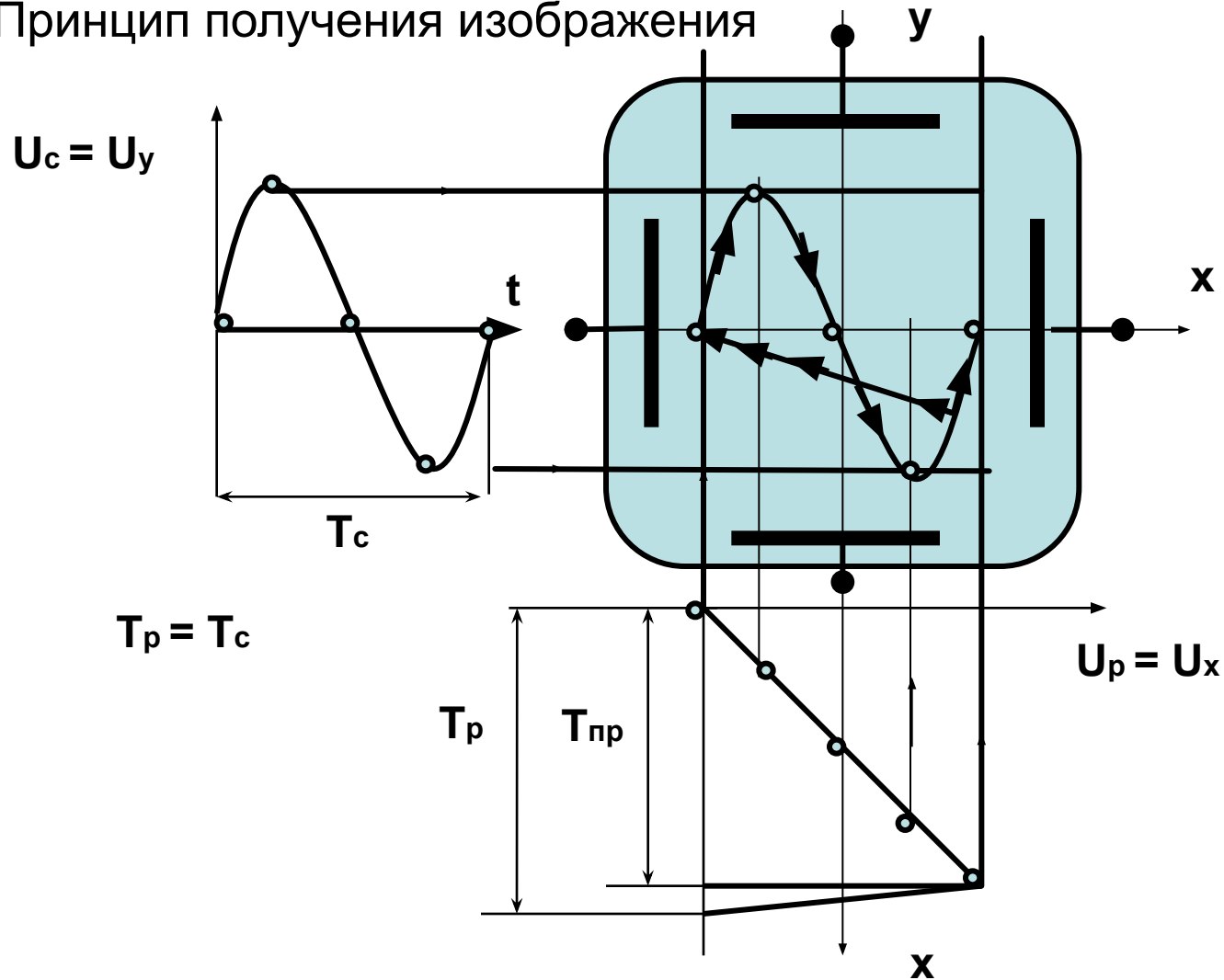
Электронно-лучевой осциллограф

- Структурная схема

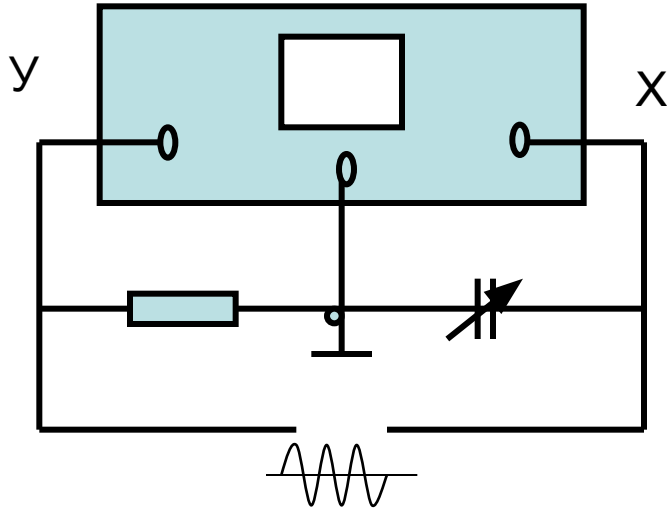


Электронно-лучевой осциллограф

- Принцип получения изображения



Круговая развёртка



$$X = S U_m \sin \omega t = A \sin \omega t$$

$$Y = S U_m \sin(\omega t + \phi) = B \sin(\omega t + \phi)$$

$$\sin \omega t = X/A$$

$$X = A \sin \omega t$$

$$Y = B/A (X \cos \phi + \sin \phi)$$

Уравнение эллипса

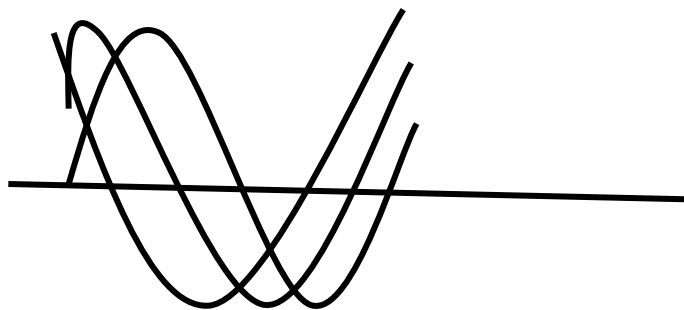
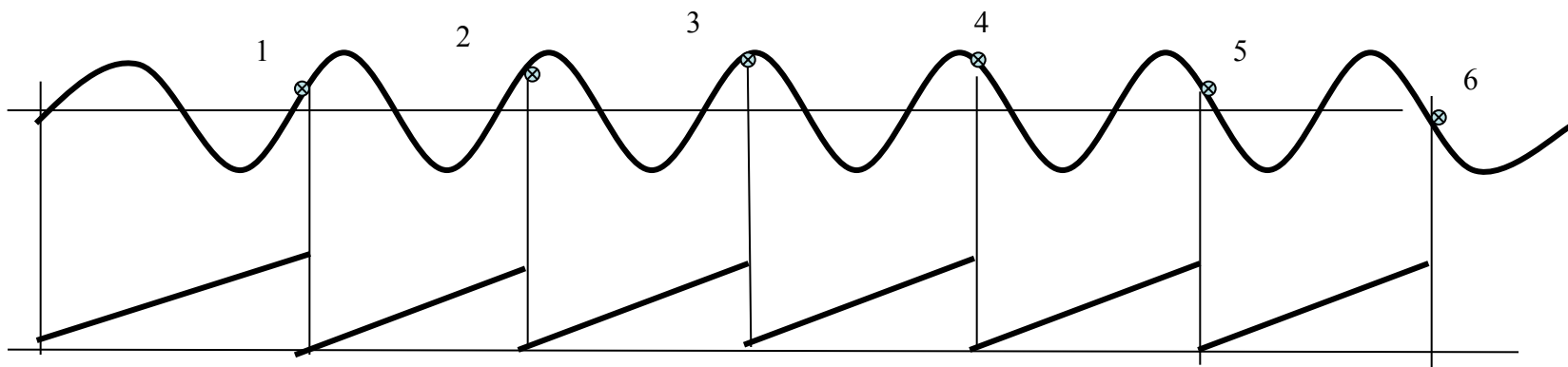
При $\phi = 0$ или 180 $Y = (B/A)X$ - линия

При $\phi = 90$ или 270

$$\frac{X^2}{A^2} + \frac{Y^2}{B^2} = 1$$

При $A = B$ $\phi = 90$ окружность

Синхронизация

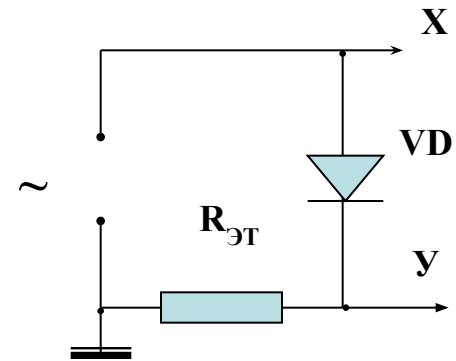
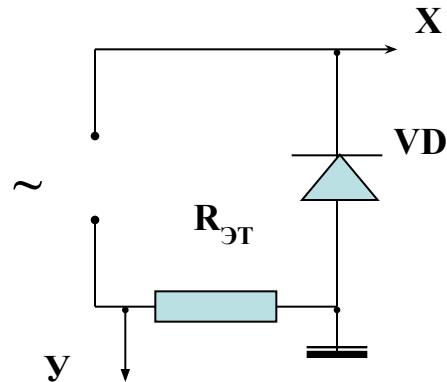
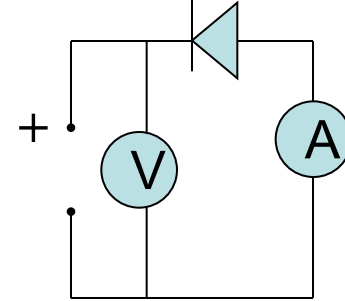
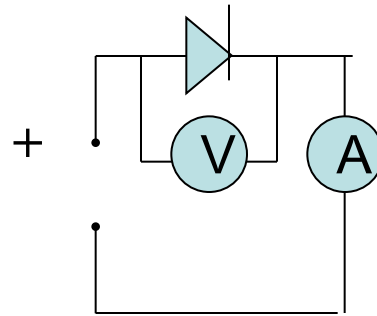
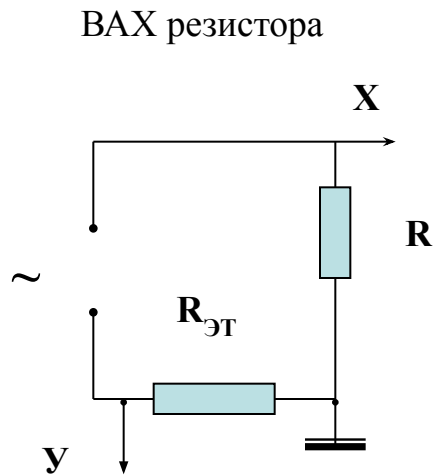


Безвременное осциллографирование

получение вольтамперной характеристики диода

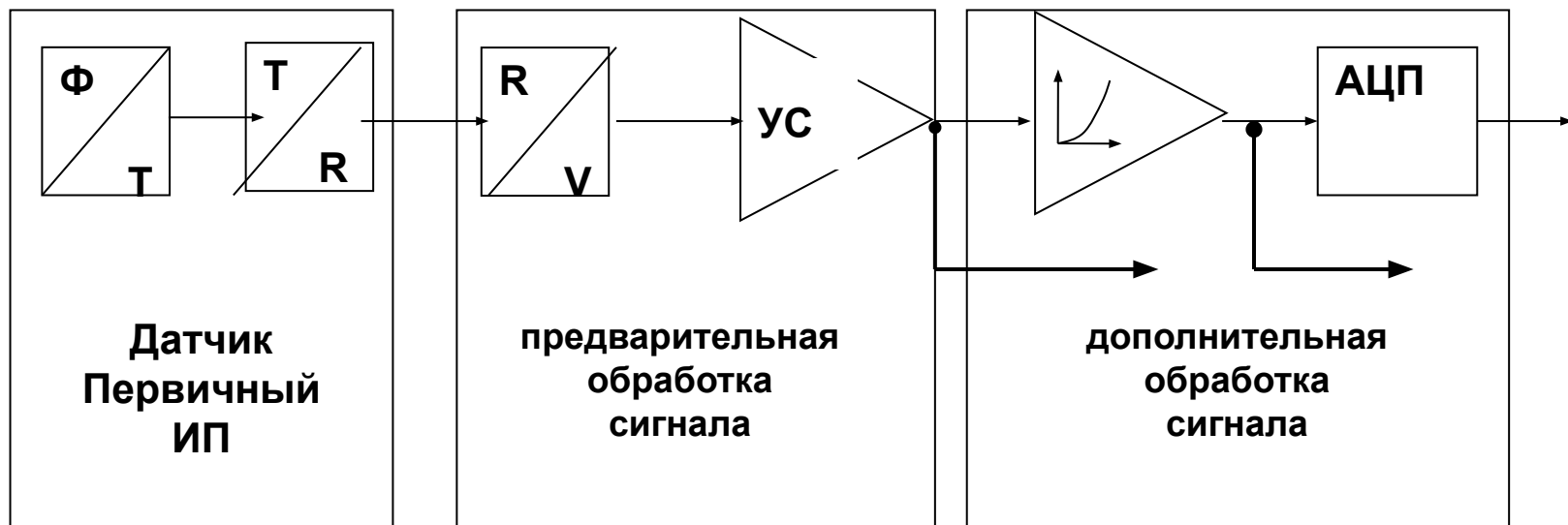
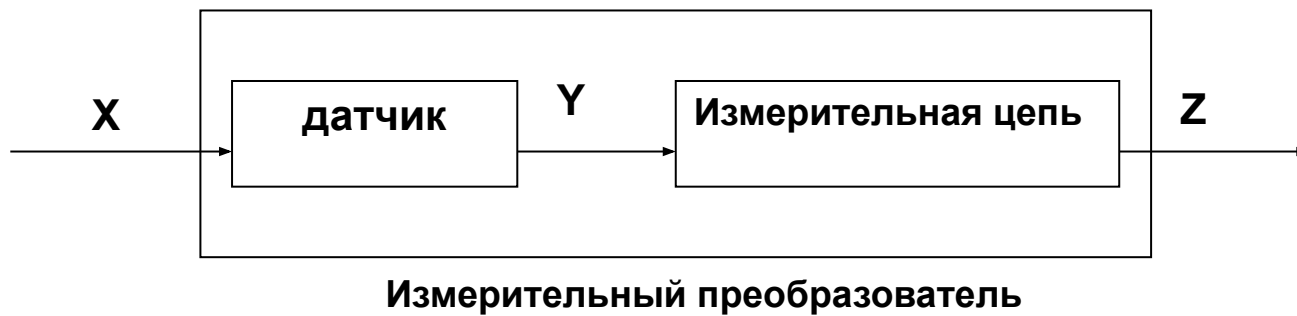
снятие прямой и обратной ветви

вольтамперной характеристики диода



Измерение неэлектрических величин

Структурная схема ИП



Преобразователи деформации

Деформация $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$ **Механическое напряжение** $G = F/S$

Предел упругости – $G_{\max}$ - максимальное напряжение, не вызывающее остаточной деформации, большей 0,2%.

Модуль Юнга «E» определяет деформацию в направлении действия силы

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} = \frac{1}{E} \cdot G. \quad \text{При } \varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} = 1, \text{ где } \Delta l = l - l_0 = \quad G = |\varepsilon| \cdot E$$

Модуль упругости представляет собой такое механическое напряжение, при котором $\varepsilon_l = 1$, т.е. удлинение $l = 2 l_0$

Коэффициент Пуассона μ определяет деформацию, перпендикулярную направлению действия силы.

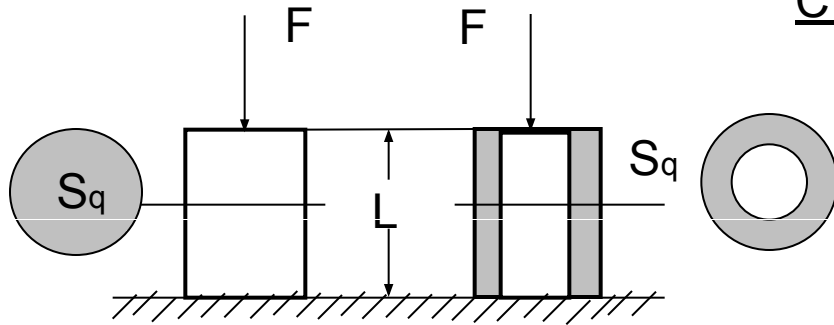
$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} = -2\mu$$

В области упругой деформации $\mu = 0,3 \div 0,5$

Физические основы получения информации

Упругие преобразователи силы.

Стержневые упругие элементы



Жёсткость стержня $W = \frac{S_q E}{L},$

Кольцевые упругие элементы

$$\epsilon_{нар} = \frac{R}{E h^2 b} (1.9 - 3 \cos \phi) \cdot F$$

$$\epsilon_{вн} = -\frac{R}{E h^2 b} (1.9 - 3 \cos \phi) \cdot F$$

Относительная деформация

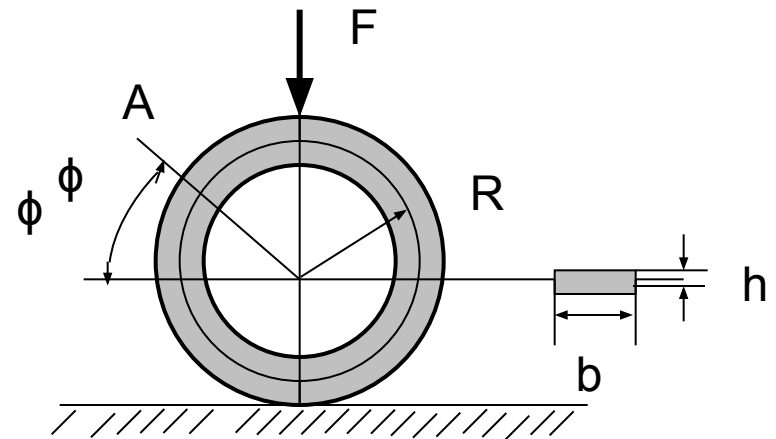
$$\epsilon_l = \frac{\Delta L}{L}$$

Продольная деформация

$$\epsilon_l = \frac{F}{S_q E},$$

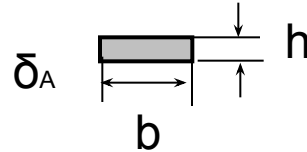
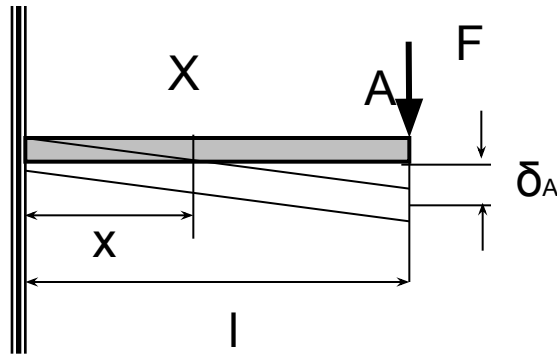
Поперечная деформация

$$\epsilon_l = \frac{F \mu}{S_q E},$$



Плоские упругие элементы

консольная балка равного сечения



Деформация

$$\varepsilon_x = \frac{6(l-x)}{E h^2 b} F$$

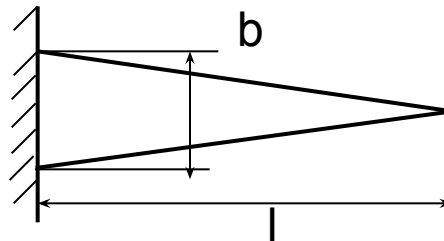
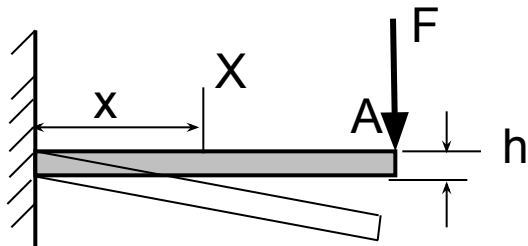
Прогиб в точке A

$$\delta_A = \frac{4l^3}{E h^3} \cdot F$$

Жёсткость $W = \frac{E h^3 b}{4l^3}$ прогиб в точке X

$$\delta_x = \frac{6X^2}{E h^3 b} \left(l - \frac{X}{3}\right) \cdot F,$$

консольная балка равного сопротивления



Прогиб $\delta_x = \delta_A \cdot \frac{X^3}{l^3},$

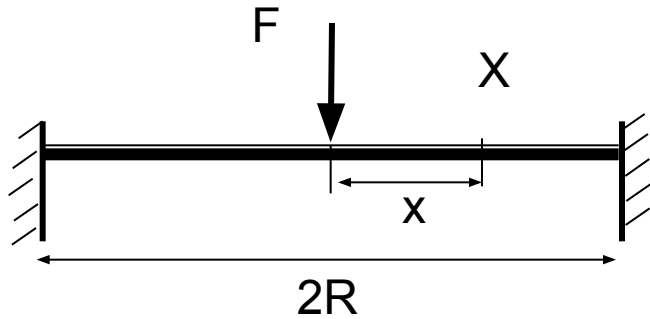
Жёсткость $W = \frac{E h^3 b}{6l^3}$

относительная деформация в произвольной точке

$$\varepsilon = \frac{6l}{E h^2 b} \cdot F.$$

Манометрические упругие элементы

Плоские оболочки



Жёсткость

Деформация в точке X

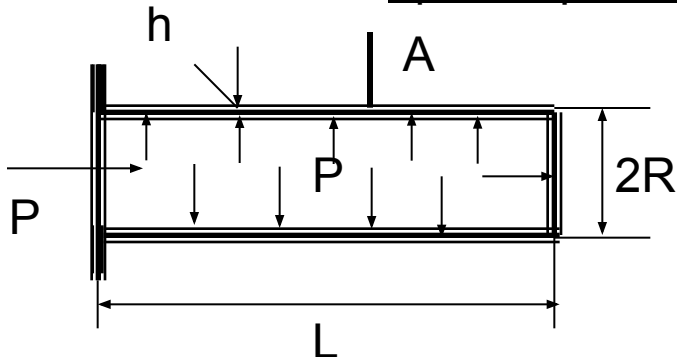
$$\varepsilon_x = \frac{0.478}{E h^2} (1 - \mu^2) \cdot \left[\ln \frac{R}{x} - 1 \right] P$$

$$W = \frac{4\pi E h^3}{3(1 - \mu^2) R^2}$$

Прогиб центра плоской мембраны

$$\delta = \frac{3(1 - \mu^2) \cdot R^4}{16 E h^2} \cdot P$$

Цилиндрические оболочки



При $L > R$ Деформация на поверхности в точке A

$$\varepsilon_A = \frac{0.5R}{Eh} (1 - 2\mu) P$$

Проволочные тензорезисторы

коэффициент тензочувствительности.

Логарифмическая производная $R = \rho \frac{l}{S} \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho},$

$$\varepsilon_R = \varepsilon_l - \varepsilon_S + \varepsilon_\rho$$

$$\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = 1 - \frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_l} + \frac{\varepsilon_\rho}{\varepsilon_l} \quad \frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_l} = -2\mu \quad K = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} = 1 + 2\mu + m$$

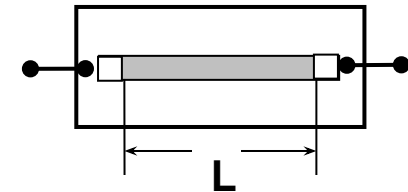
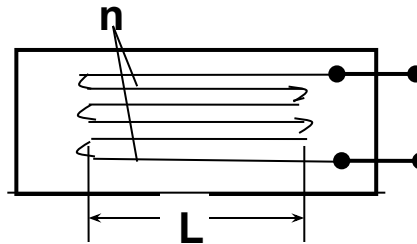
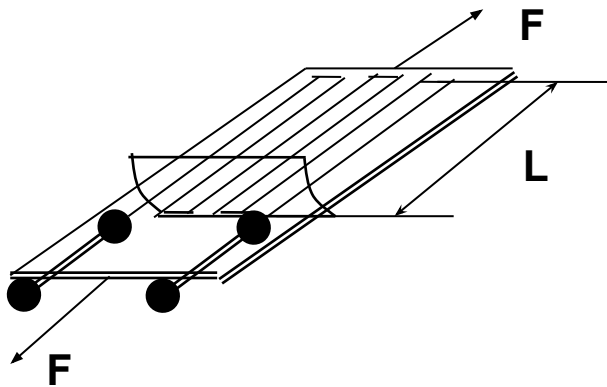
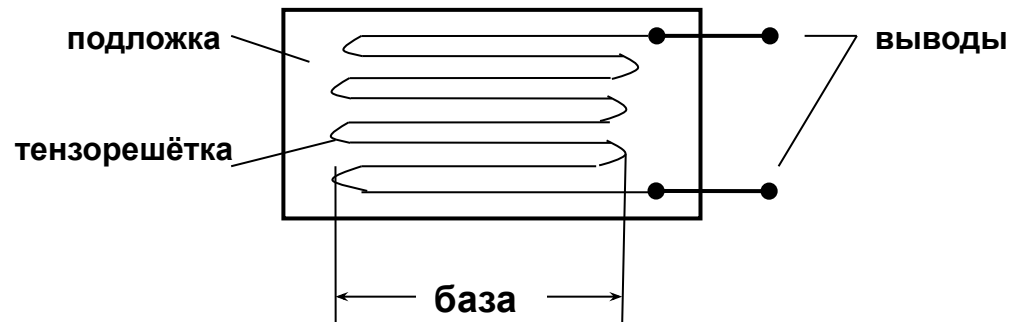
коэффициент тензочувствительности

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l}.$$

Для металлов коэффициент K находится в пределах от 1,5 до 4.

В пределах упругих деформаций $\varepsilon_l \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$,

Конструкция тензодатчиков



Коэффициент тензочувствительности равен $2 \pm 0,2$;

максимальная относительная деформация не более 0,003 (0,3%).

номинальный рабочий ток— 30 ма;

Полупроводниковые тензорезисторы

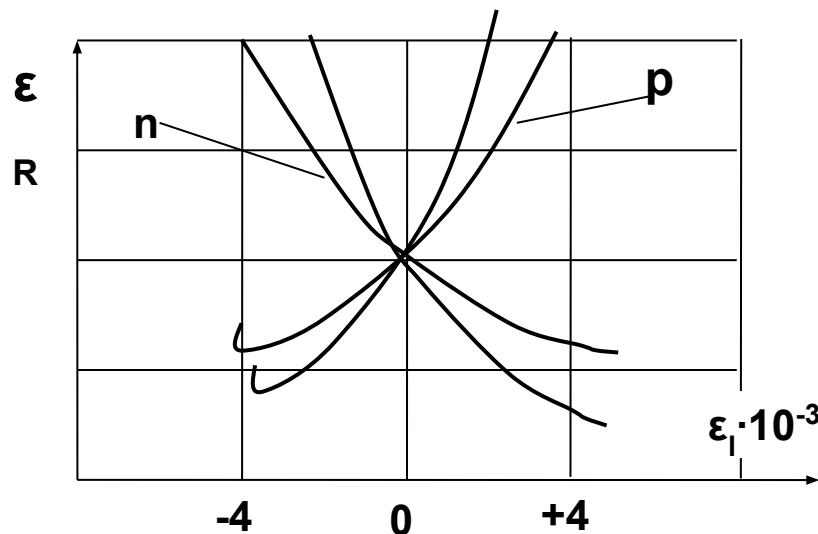
Коэффициент тензочувствительности

$$K = \frac{\frac{dR}{dl}}{\frac{R}{l}} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{dl}}{\frac{\rho}{l}} = 1 + 2\mu + m. \approx m$$

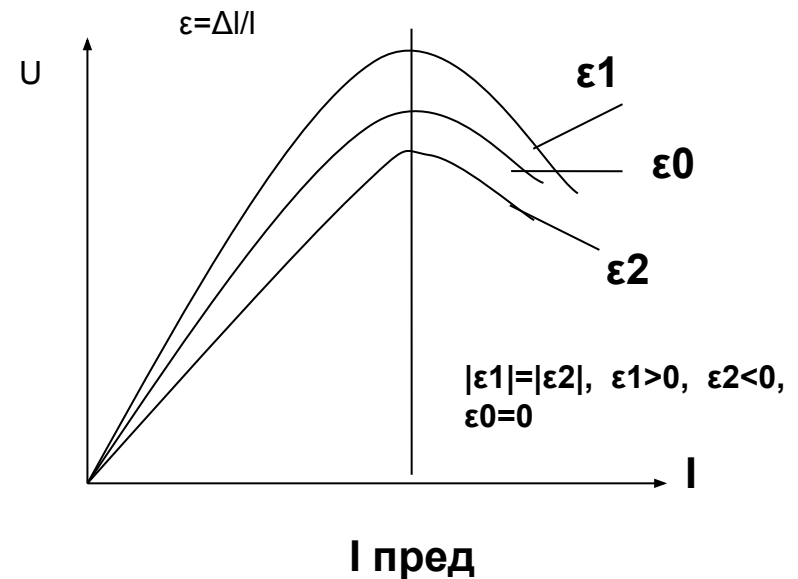
КТЧ = -100...+200

Сопротивление тензодатчиков $R = 100 \text{ Ом} \dots 50 \text{ кОм}$,

Деформационная характеристика

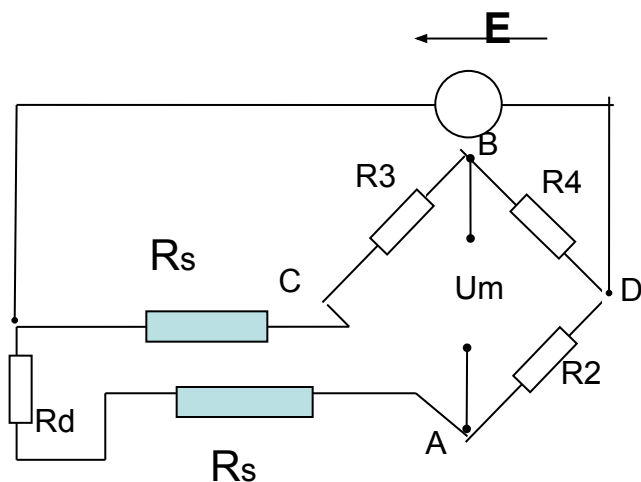


Вольтамперная характеристика



Измерительные схемы тензопреобразователей

Схема 1: влияние температуры компенсируется на соединительных проводах – по трёхпроводной схеме либо с помощью эталонного термокомпенсирующего датчика.



$$R_s \ll R_{do}$$

При балансе моста все сопротивления плеч равны $(R_{do} + R_s) = R_0$,

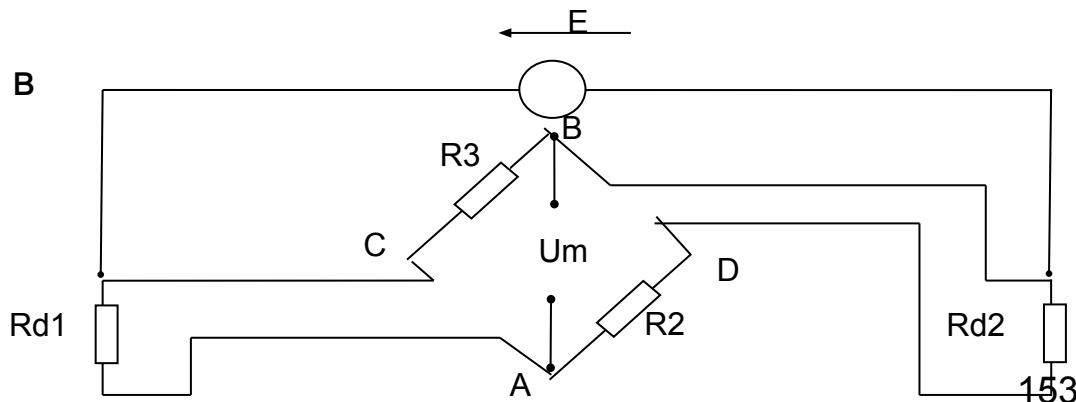
Напряжение разбаланса моста при измерении деформации

$$U_m = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_d}{R_{do} + R_s} = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_d}{R_{do}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_{do}}}$$

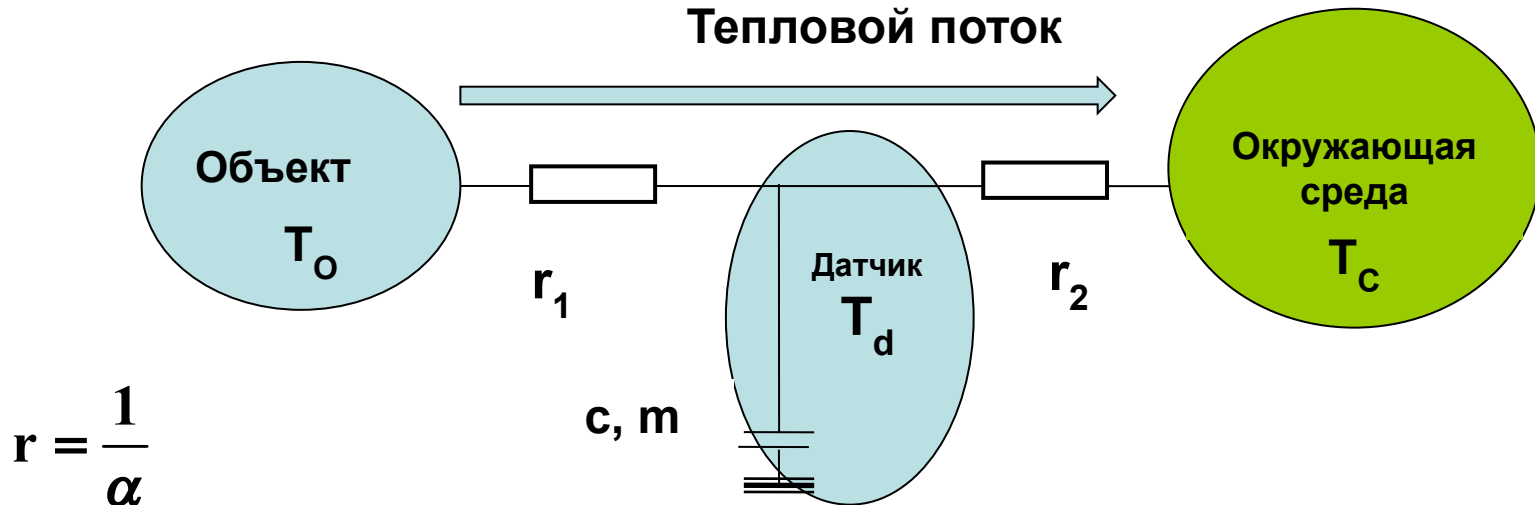
Схема 1*

Два рабочих датчика включены в противоположные плечи моста

$$U_m \approx \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_{d1} + \Delta R_{d1}}{R_0}$$



Тепловые преобразователи



r_1, r_2 -Тепловые сопротивления , α теплопроводность

температура датчика,
$$T_d = T_o - (T_o - T_c) \frac{r_1}{r_2} = T_o - \Delta T \frac{r_1}{r_2}$$

для снижения погрешности необходимо, чтобы $r_1/r_2 \rightarrow 0$, а так же $\Delta T = T_o - T_d = 0$.

необходимо улучшить тепловую связь датчика с объектом и изолировать датчик от окружающей среды.

Методы измерения температуры

Соотношения температурных шкал

0	32	96	212	F
	0,01		80	R
	273,16		373,16	⁰ K
				⁰ C
0			100	

ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КОНТАКТНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

Термометры сопротивления

Основные параметры терморезисторов: (ТР)

- номинальное значение сопротивления R_0 при температуре 0°C ,
- Температурный коэффициент сопротивления $\alpha = \frac{\partial R}{R \partial T} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T}$
- допустимые отклонения сопротивлений R_0 при температуре 0°C в процентах от номинала
- ,
- значение отношений сопротивлений в диапазоне температур $0 \div 100, ^\circ\text{C}$
- ,

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}$$

- допустимые отклонения значений W_{100}

Термометры сопротивления

Платиновый термометр. $\rho = \text{const}$,

$$R_t = R_0 (1 + AT + BT^2) \quad A = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C} \quad B = -5,9 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}^2$$

в диапазоне $0 - 600^{\circ}\text{C}$

$$R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3 (T - 100)] \text{ в диапазоне температур } -200 \div 0^{\circ}\text{C}$$

$$C = -4,36 \cdot 10^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-3}$$

$$R_0 \text{ при } T = 0^{\circ}\text{C} \quad \alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ } \text{K}^{-1}, \quad \rho = 0,105 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}, \quad \text{при } 20^{\circ}\text{C}$$

Полный диапазон $-200 \text{ до } +1300.^{\circ}\text{C}$

Термометры сопротивления

Медные термометры(Cu) диапазон температур от -50 до +180°C,

$$R_t = R_0(1 + \alpha T), \text{ или } R_t = R_0[1 + \alpha(T - T_0)],$$

где R_0 сопротивление при $T_0 = 0^\circ\text{C}$. $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$

$$\rho = 0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$$

Функция преобразования медного терморезистора.



Термисторы

Передаточная функция термисторов $\ln R = A_o + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}$

Простая модель , $\ln R = A + \frac{B}{T}$

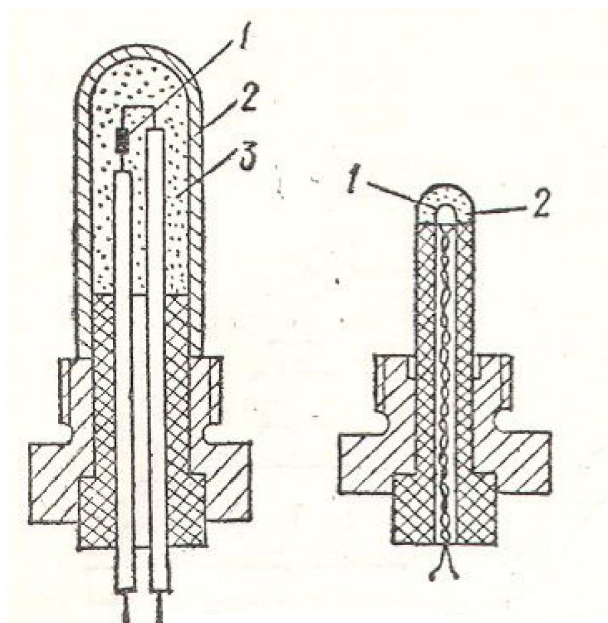
где **A** – константа, **B** – характеристическая температура материала

$$R = R_o e^{B(1/T - 1/T_o)}$$

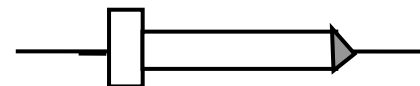
Температура термистора $T = \left[\frac{1}{T_o} + \frac{\ln(R/R_o)}{B} \right]^{-1}$

Чувствительность датчика $\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$

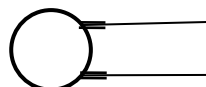
Конструктивное выполнение термисторов



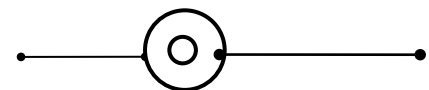
ММТ-1, КМТ-1, СТ3-1



ММТ-4, КМТ-4,



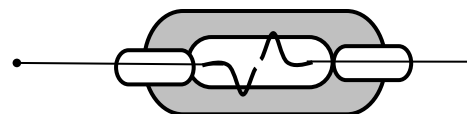
СТ1-2, СТ2-1СТБ-4



ММТ-12, КМТ-12

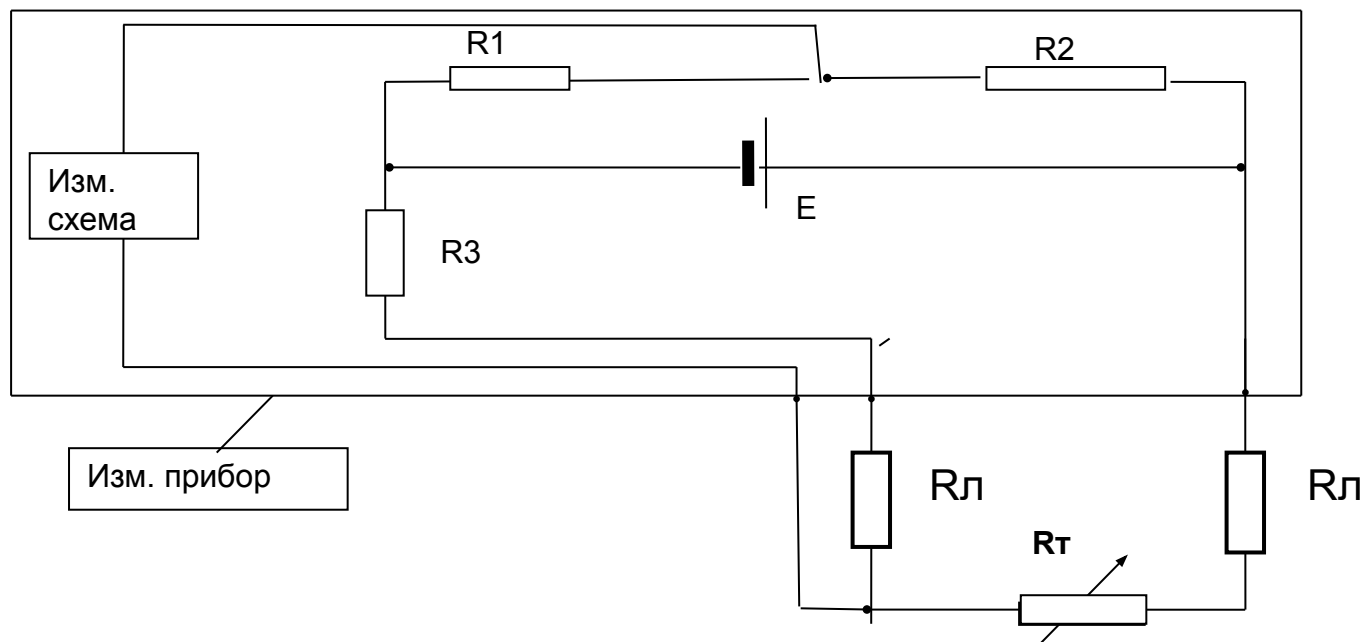
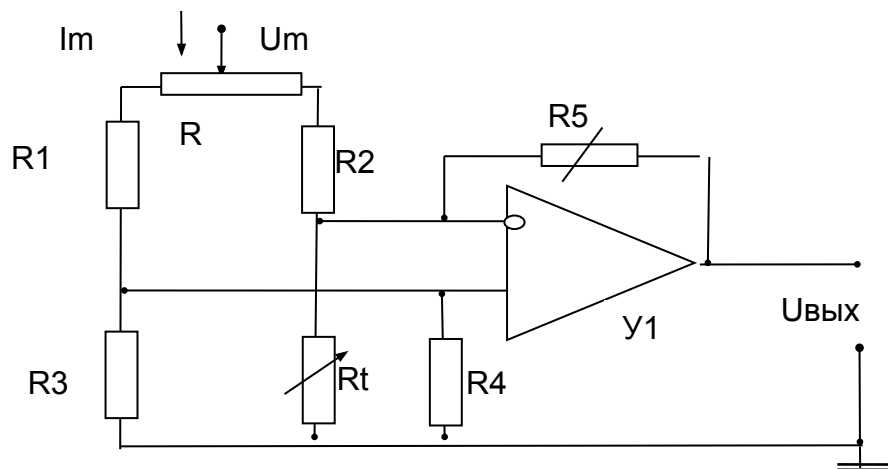


КМ-14, СТ3-14

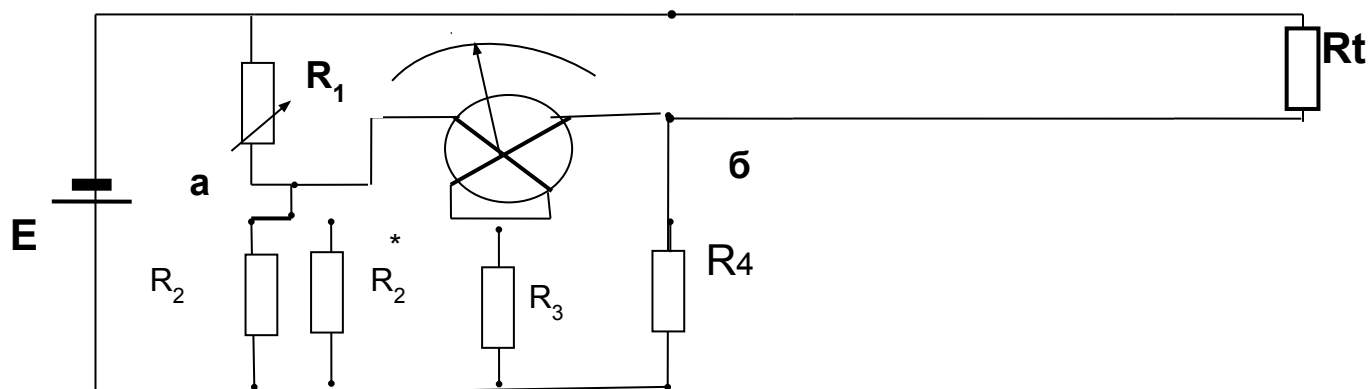
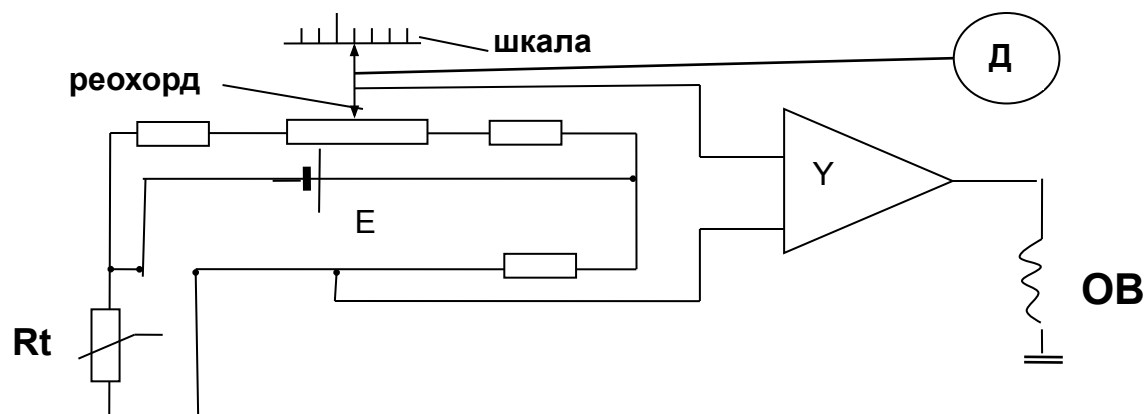


Т-8, Т-9

схемы измерения температуры терморезисторами



Автоматические регистрирующие схемы

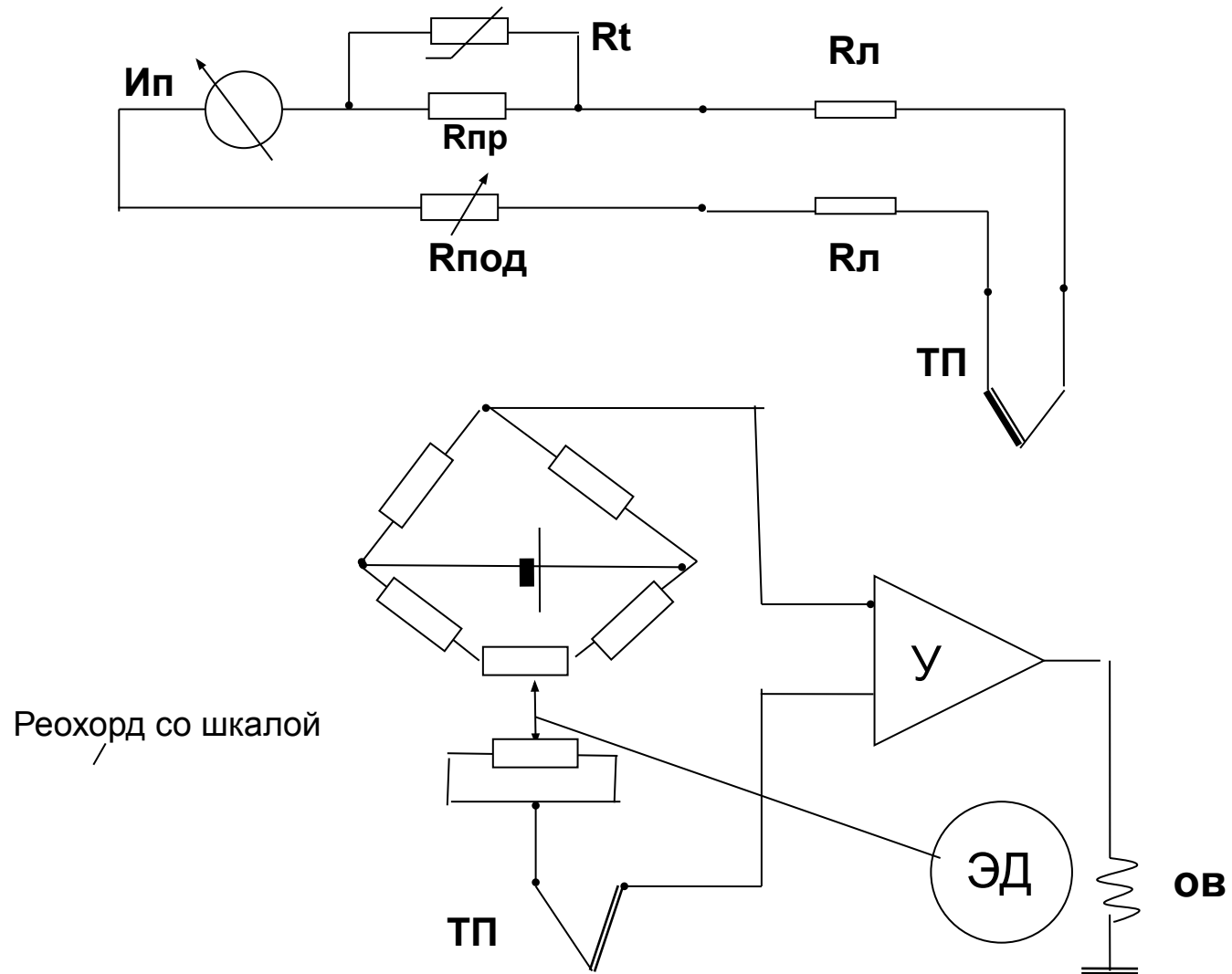


Термоэлектрическая пирометрия

термочувствительность термопар

Тип термопары	диапазон температур	мкВ\град	тип термопары	диапазон температур	мкВ\град
ПП	-20 1600	11	Au-Pt	-185 800	16
ППр	+300 1900	9	Au-Ag	-185 800	16
ХА	-200 1300	40	Сu-константан	-250 400	40
ХК	-200 800	75	нихром-Ni	1200	40
			Fe-константан	-200 1000	

Измерительные схемы термопар



Оптическая пирометрия

Распределение энергии в спектре излучения (формула Планка),

$$\Phi_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad C_1 = 2\pi h \cdot \tilde{N}^2 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$$

$$C_2 = \frac{hc}{K} = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

h – постоянная Планка; C – скорость света

Полное излучение во всём диапазоне длин волн $R_0 = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda$

$\hat{O}_{\lambda}$ – поток монохроматического излучения в единицу времени с единицы площади поверхности тела с длинами волн от λ до $d\lambda$,

Закон Стефана-Больцмана

$$R_0 = GT^4$$

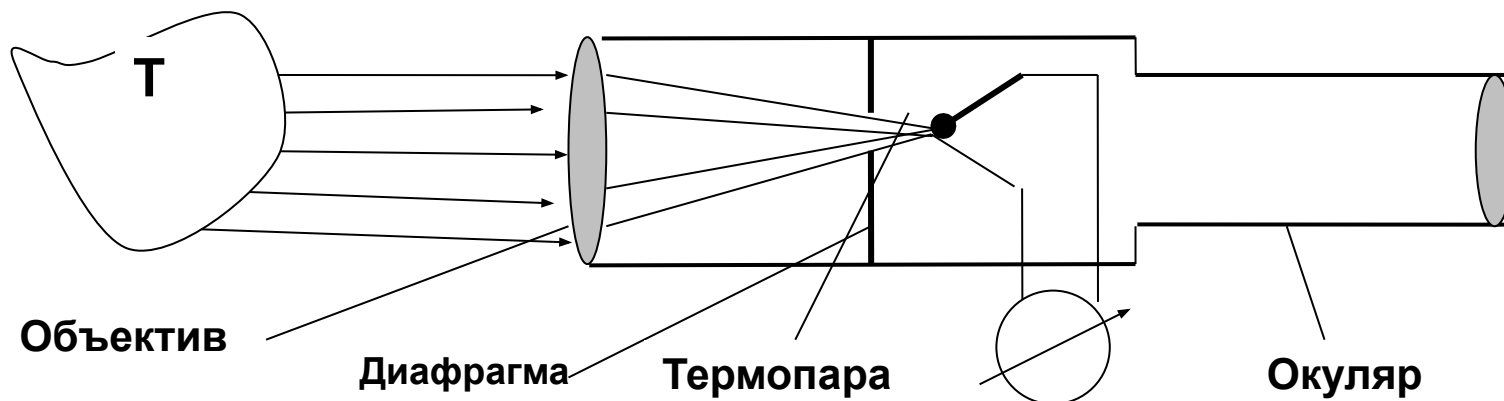
$$G = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4$$

Энергетическая фотометрия или радиометрия

- **Поток излучения Φ** - испускаемая, принимаемая мощность ($\Phi = dQ/dt$), **в ваттах**
- **Энергия излучения Q** – испускаемая, принимаемая – **в джоулях**
- **Сила излучения I** – поток излучения, в данном направлении в единичном телесном угле ($I = d\Phi / d\Omega$) измеряется в **$Вт/ср$** ;
- **Энергетическая яркость L – сила излучения** с элемента поверхности **dA** в данном направлении, относимая к площади ортогональной проекции **dA** на плоскость перпендикулярную направлению ($L = dI/dA_n$) **$Вт/ср \cdot м^2$**
- **Энергетическая облучаемость E** – **поток излучения**, падающий на элемент поверхности, отнесённый к площади элемента ($e = d\Phi/dA$), измеряется в **$Вт/м^2$**

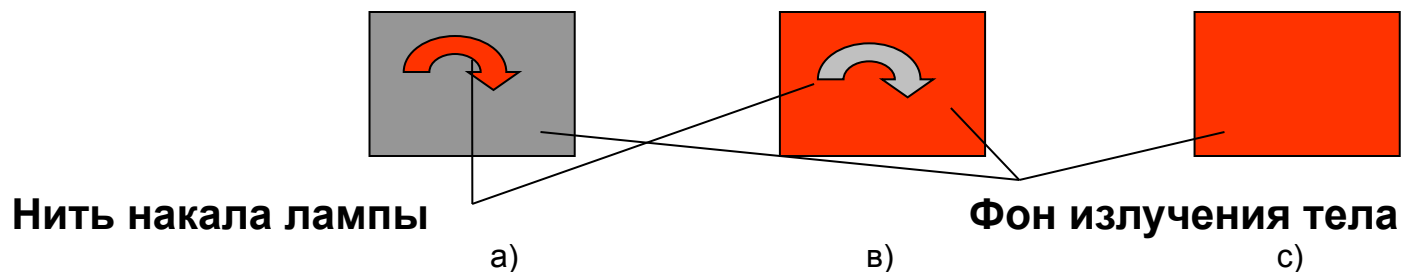
Основные методы измерения температур

Пирометр полного излучения (радиационный пирометр).

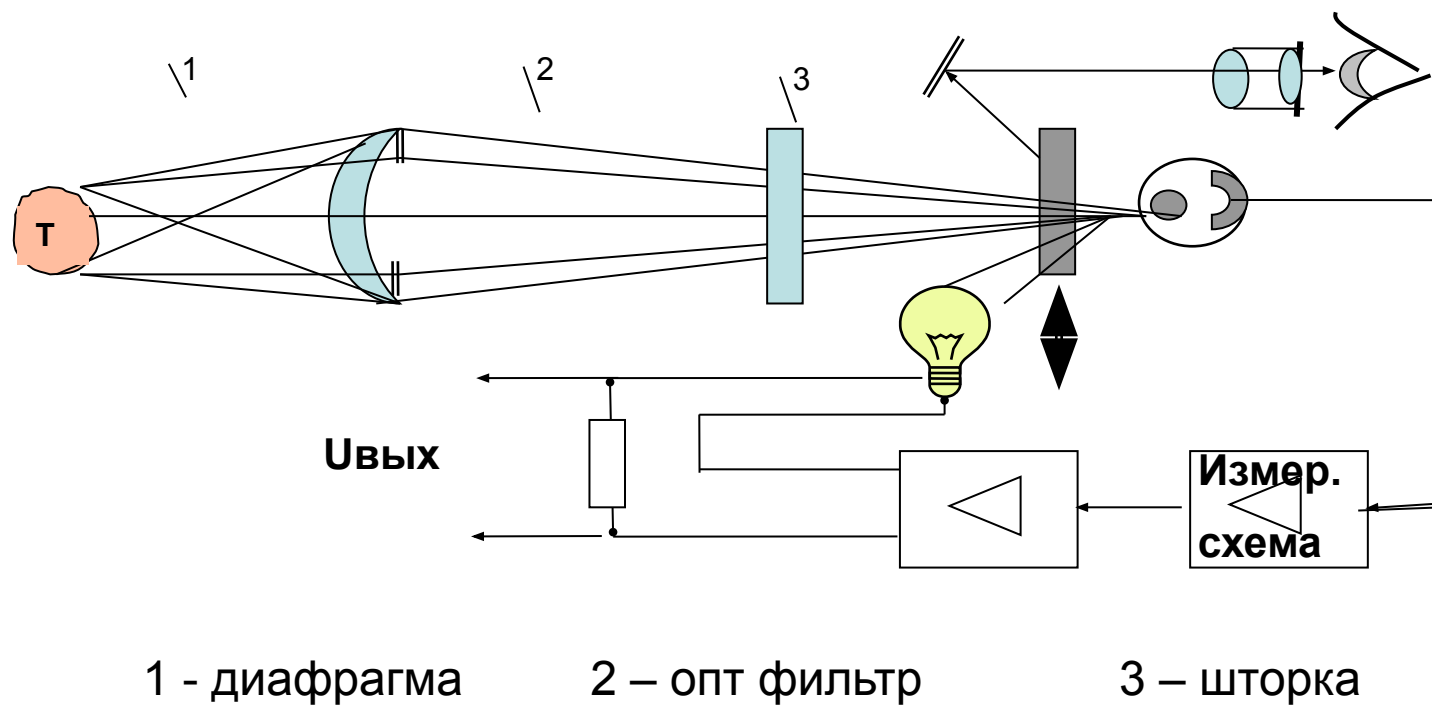


Пирометр с исчезающей нитью, или монохроматический пирометр

$$\Phi_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad \dot{O}_{\epsilon} = \dot{O}_{\ddot{y}} \left(1 + \dot{O}_{\ddot{y}} \frac{\lambda}{C_2} \ln \epsilon_{\lambda T}\right)^{-1},$$



Автоматический оптический пирометр

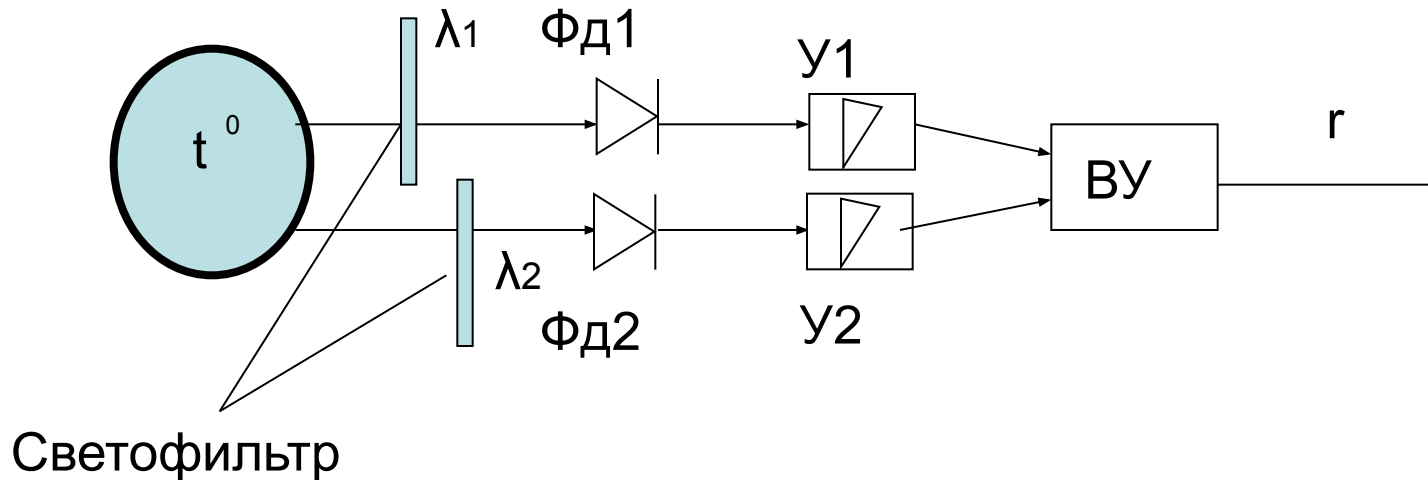


Пирометр спектрального отношения

Бихроматический пирометр, или пирометр спектрального отношения,

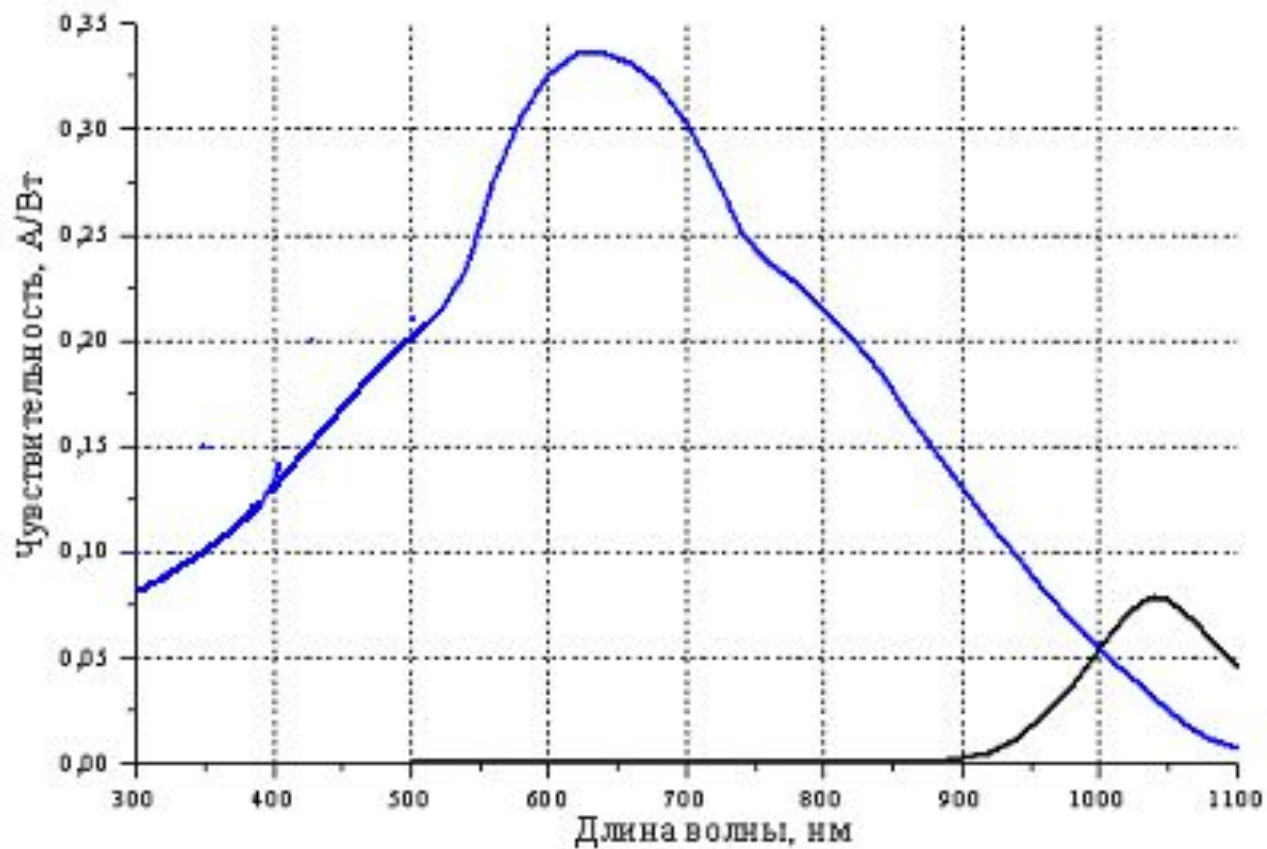
$$r = \frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp \left\{ \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right\}.$$

Отношение r зависит только от температуры T объекта



фотодетектор ФДПК-1Т

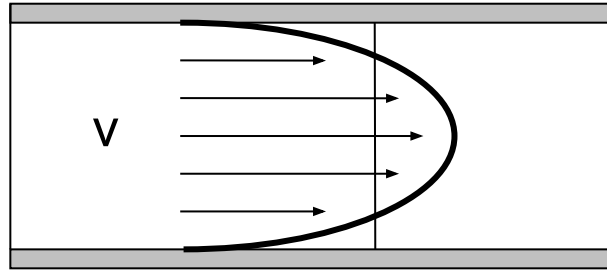
Типовая спектральная характеристика фотодетектора ФДПК 1Т



Методы измерения расхода

Средняя скорость потока в сечении S равна

$$V_c = \frac{\int v dS}{S}$$



Классификация методов по виду первичного преобразователя расхода

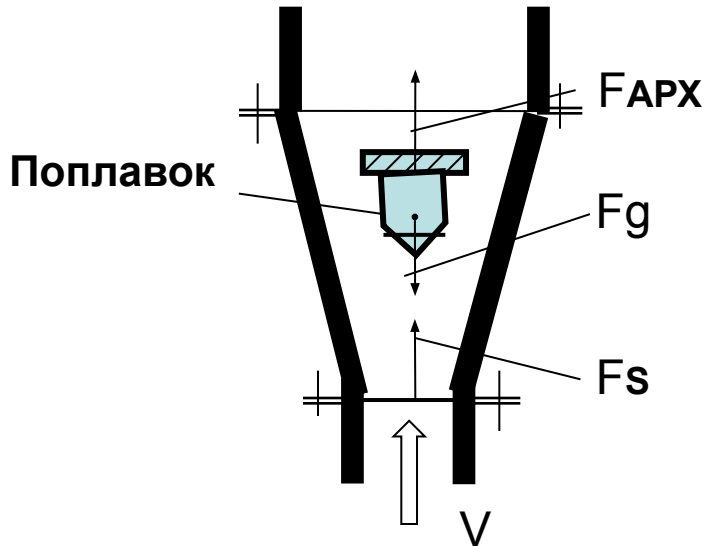
1. Преобразователи с непрерывно движущимся телом

2. Преобразователи, основанные на физических явлениях

3. Преобразователи, основанные на гидродинамических законах

4. Ротаметры с упругим противодействием

Расходомеры постоянного перепада давления.



$$\rho gU + K_F \frac{\rho S V^2}{2} = \rho_o gU$$

$$F_g = F_s + F_{apx}$$

где U – объём поплавка, ρ_o - плотность поплавка, ρ - плотность жидкости ,
 V - скорость жидкости,

S -площадь сечения поплавка перпендикулярная вектору скорости,
 g - ускорение силы тяжести, - K_F – коэффициент лобового сопротивления.

Поплавок находится в положении Z по

вертикали

при скорости жидкости

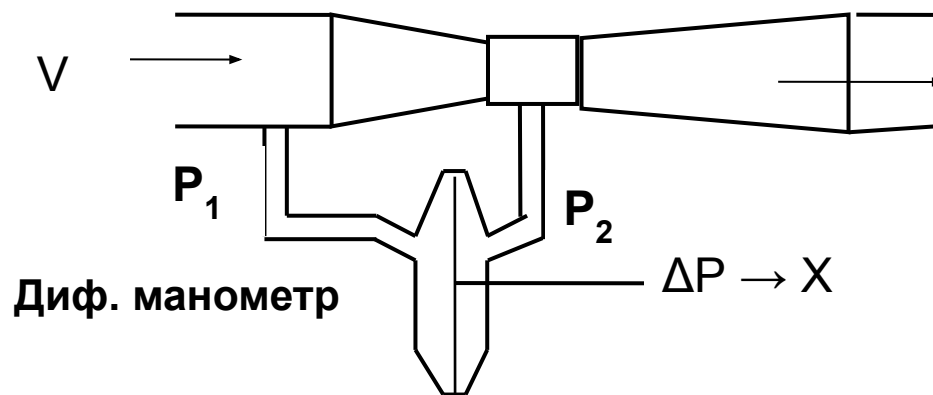
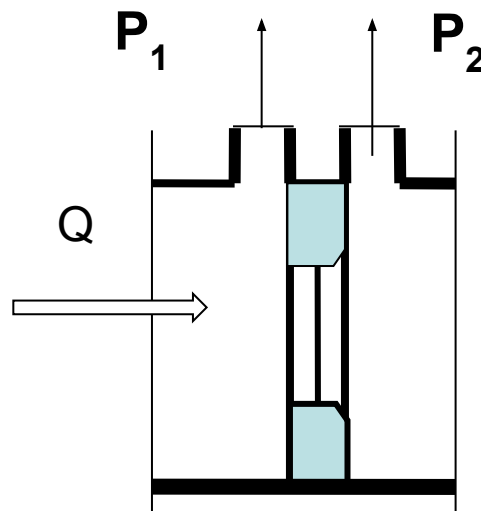
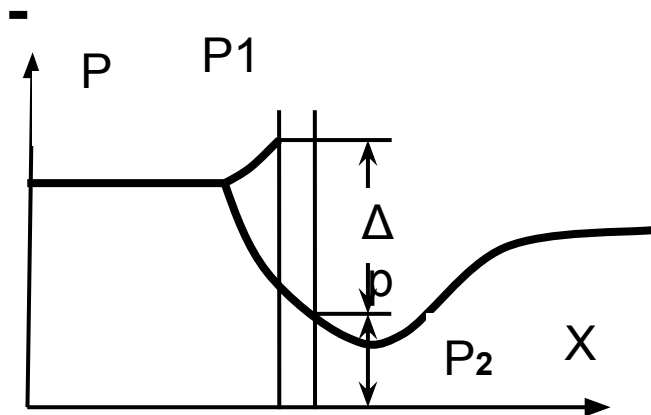
расход

$$V = \sqrt{\frac{2gU}{K_F S} \left(\frac{\rho_o}{\rho} - 1 \right)}.$$

$$Q = \sqrt{\pi} a z \sqrt{\frac{2gU}{C_x} \left(\frac{\rho_o}{\rho} - 1 \right)} = K_z$$

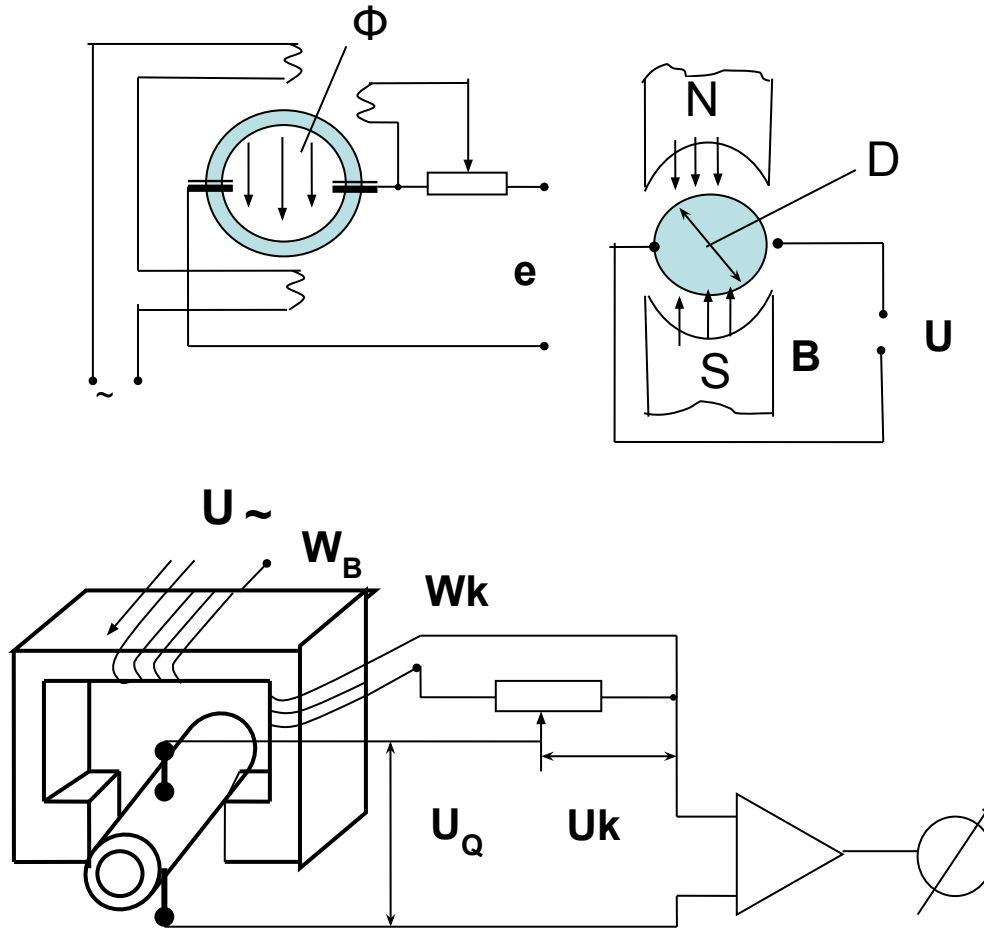
Расходомеры переменного перепада давления.

$$Q = K \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



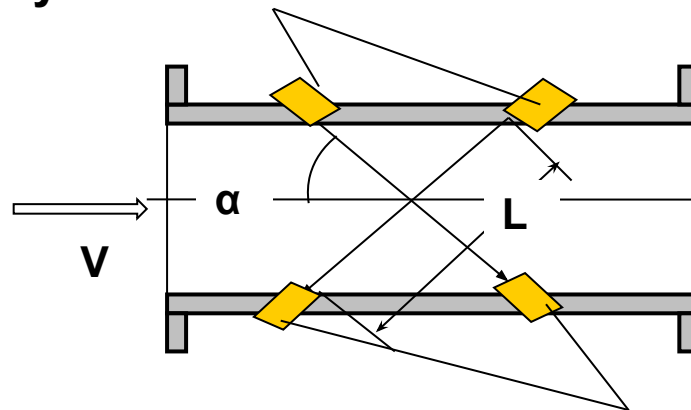
Электромагнитные расходомеры токопроводящей жидкости.

$$e = BVD = B \frac{Q}{\pi D}.$$



Ультразвуковые расходомеры

Излучатели



Приёмники

Время распространения УЗВ на расстоянии L

по направлению
потока

$$t_p = \frac{L}{(c + V \cos \alpha)}.$$

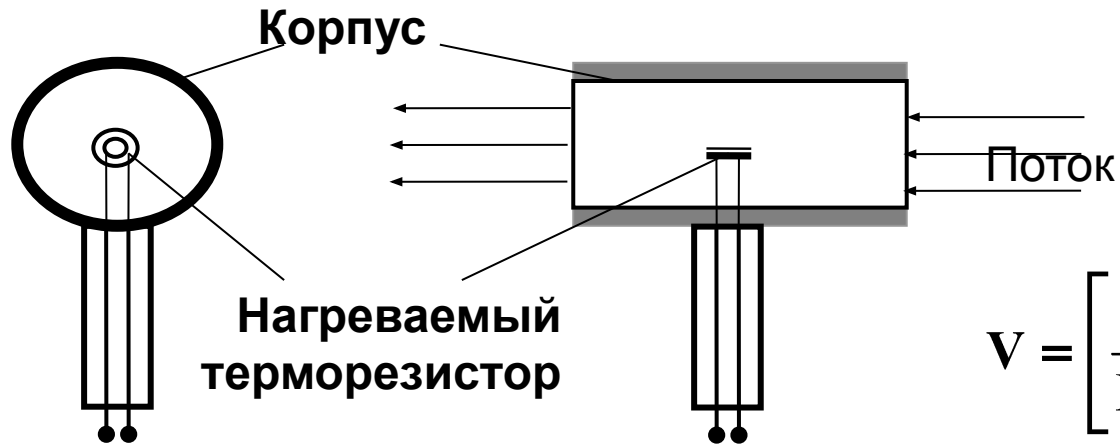
$$t_{p1} = \frac{L}{(c + V \cos \alpha)} \approx \frac{L}{c} \left(1 - \frac{V}{c} \cos \alpha \right)$$

в направлении против потока

$$t_{p2} = \frac{L}{(c - V \cos \alpha)} \approx \frac{L}{c} \left(1 + \frac{V}{c} \cos \alpha \right)$$

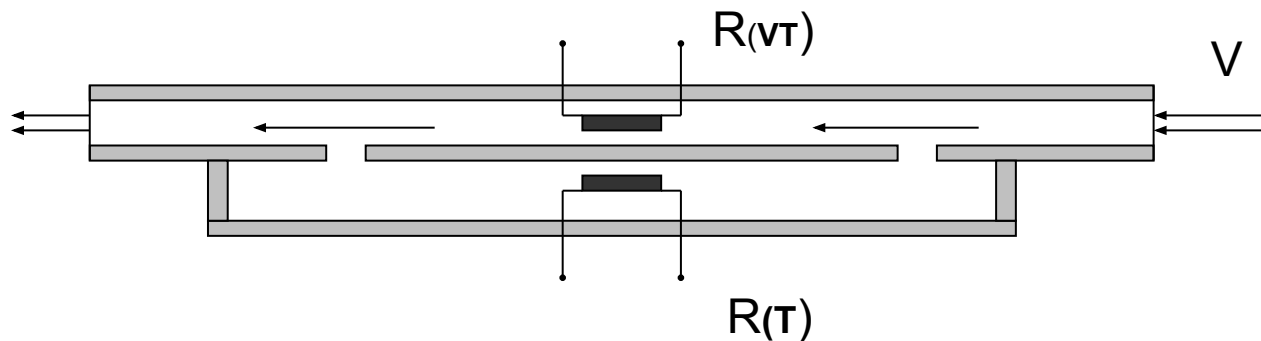
$$\frac{(t_{p2} - t_{p1})}{t_{p2} \cdot t_{p1}} = \frac{2V \cos \alpha}{L}$$

Тепловые преобразователи расхода газа



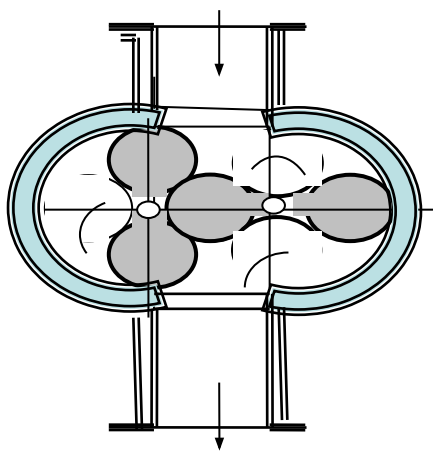
$$V = \left[\frac{1}{K_1} \left(\frac{UI}{T_i - \hat{O}_{\tilde{N}}} - \hat{E}_2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

где K_1, K_2 – приборные константы, U, I – напряжение и ток питания датчиков, T_H - температура рабочего датчика нагревателя, T_c - температура потока (компенсационного датчика)



. Схема расположения рабочего и компенсирующего датчиков

Объёмные счётчики



Измерительная камера

Лопаст

Ротационный счётчик газа

Измерение расхода тепловой энергии

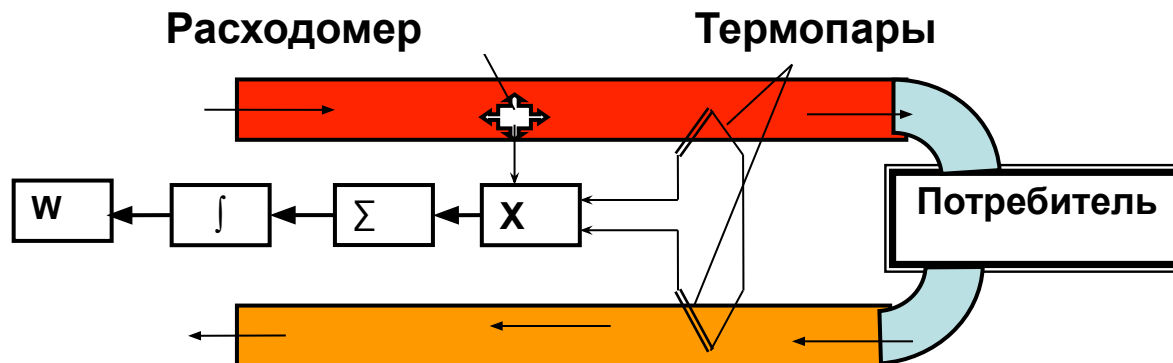
где Q – массовый расход теплоносителя,
 $\Theta = Q \cdot C(i_1 - i_2)$ C – теплоёмкость,
 i_1 i_2 – 'энтальпия теплоносителя на входе и

выходе.
 $i = \frac{R_1 + R_2 T}{R_3 + R_4 p}$, где $R_1 - R_4$ – постоянные
 коэффициенты.

T – температура; p – давление
 Расход тепловой энергии W за промежуток времени $t_2 - t_1$

Энтальпия — это количество энергии, которая доступна для преобразования в теплоту при определенной температуре и давлении.

$$W = \int_{t_1}^{t_2} Q \cdot C \cdot (T_1 - T_2) dt.$$



Измерение уровня раздела сред.

Гидростатические уровнемеры.

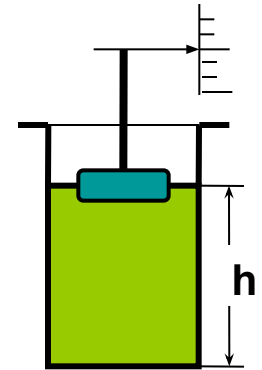
Поплавковые преобразователи.

Сила, действующая на поплавок

$$F_a = gV\rho_1 + g\rho_2\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\int_0^X S(X)dX = g\rho_2\left[V\frac{\rho_1}{\rho_2} + \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\int_0^X S(X)dX\right].$$

При $\rho_1 \ll \rho_2$, $\rho_1 \rightarrow 0$, $F_a = g \cdot \rho_2 \cdot S \cdot X$.

Положение поплавка соответствует положению уровня



Буйковые (плунжерные) уровнемеры

$$F = P - \rho ghS$$

где P – вес плунжера,

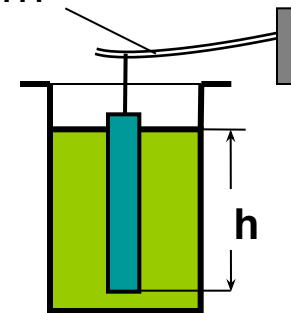
S – площадь его поперечного сечения,

ρgSh – выталкивающая сила Архимеда,

ρ плотность среды,

g ускорение силы тяжести.

Упругий элемент

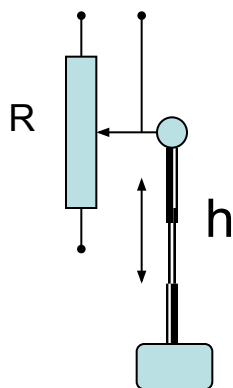


Перемещения плунжера минимальны

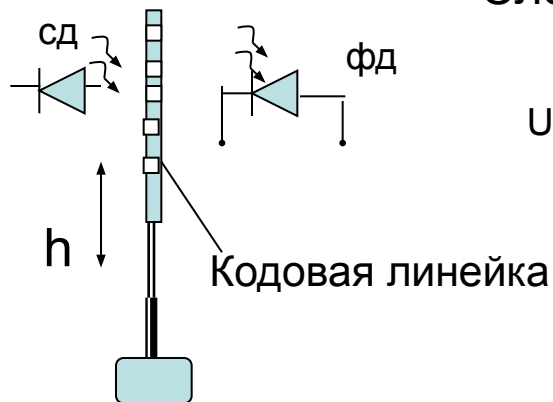
Вторичные преобразователи гидростатических уровнемеров

Поплавковые преобразователи.

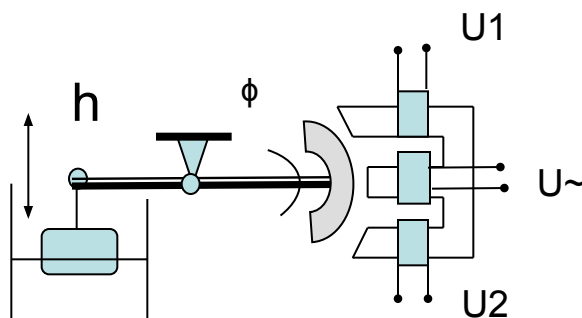
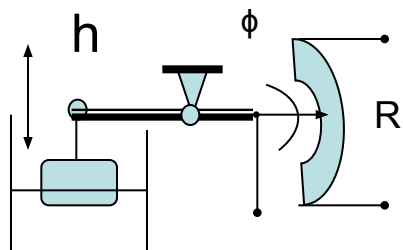
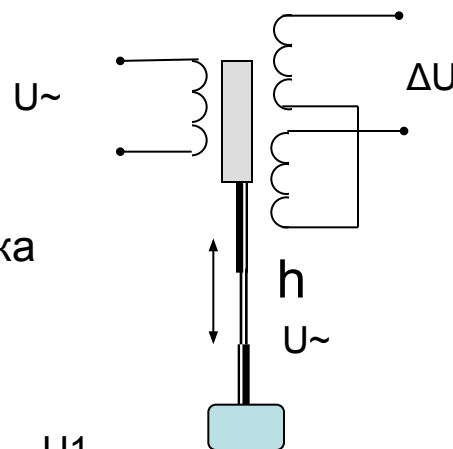
Реостатные



Оптические

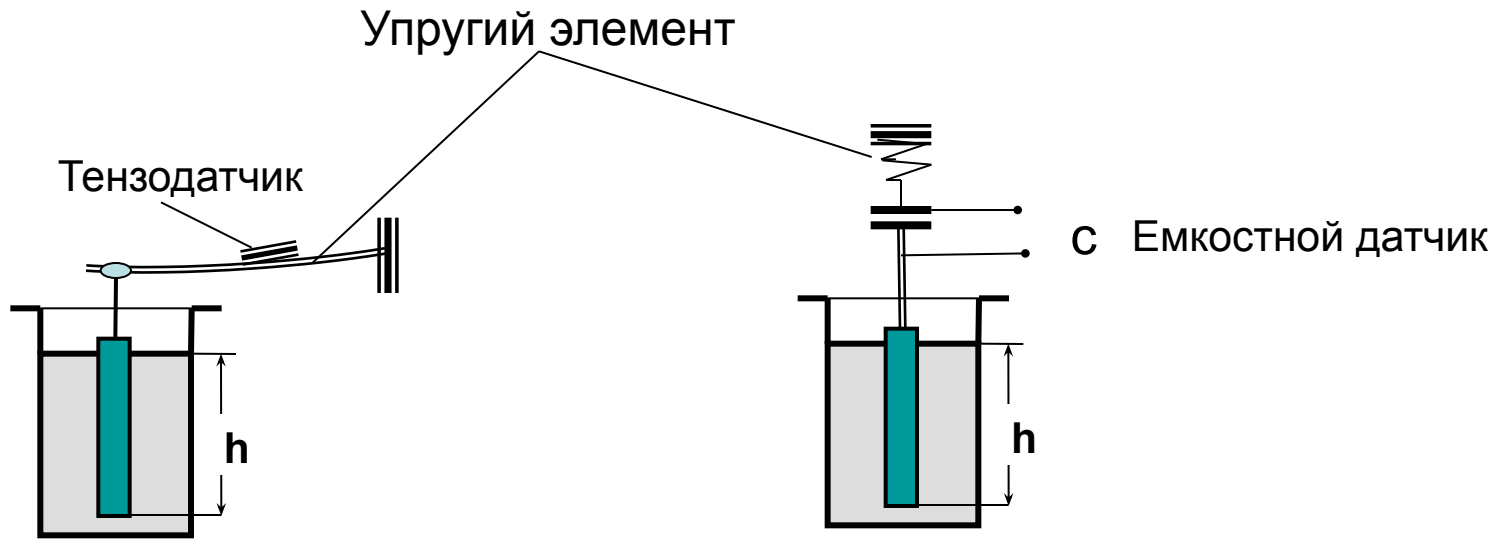


Электромагнитные



Вторичные преобразователи гидростатических уровнемеров

Буйковые (плунжерные) уровнемеры



Измерение уровня раздела сред.

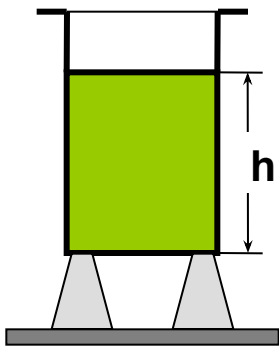
Гидростатические уровнемеры.

Преобразователь перепада гидростатического давления.

Датчик располагается у дна резервуара ,

где давление равно $p = p_0 + \rho gh$

Массовые уровнемеры



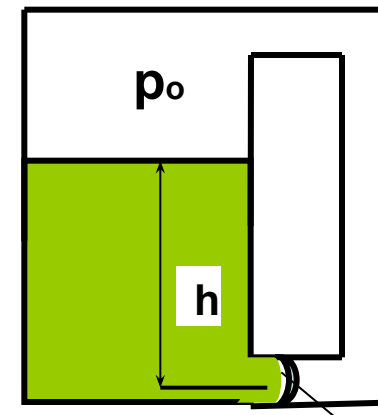
$$h = \frac{G}{S\rho g}.$$

G – сила веса, действующая на опору,

S - площадь зеркала поверхности,

g ускорение силы тяжести,

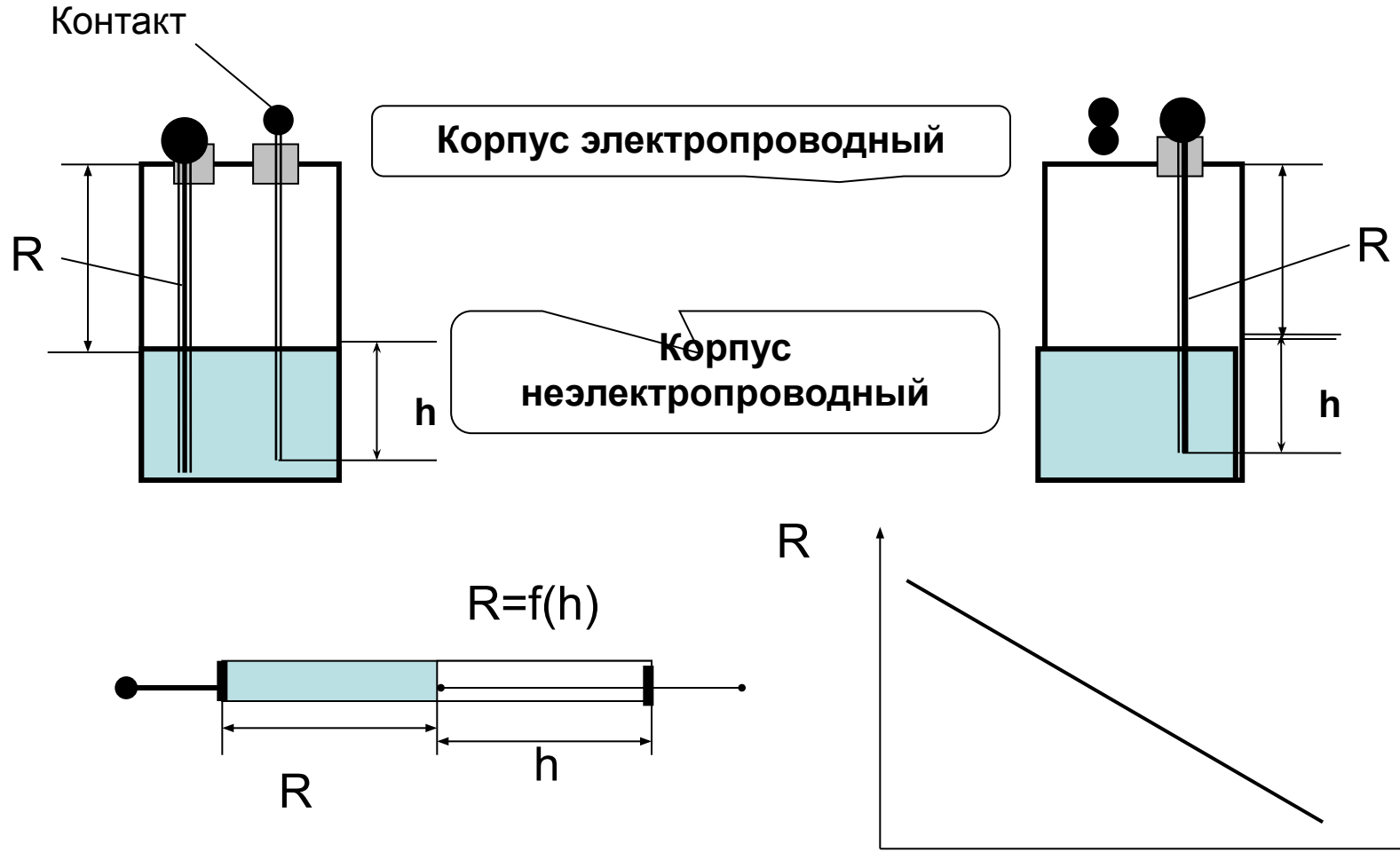
ρ плотность среды.



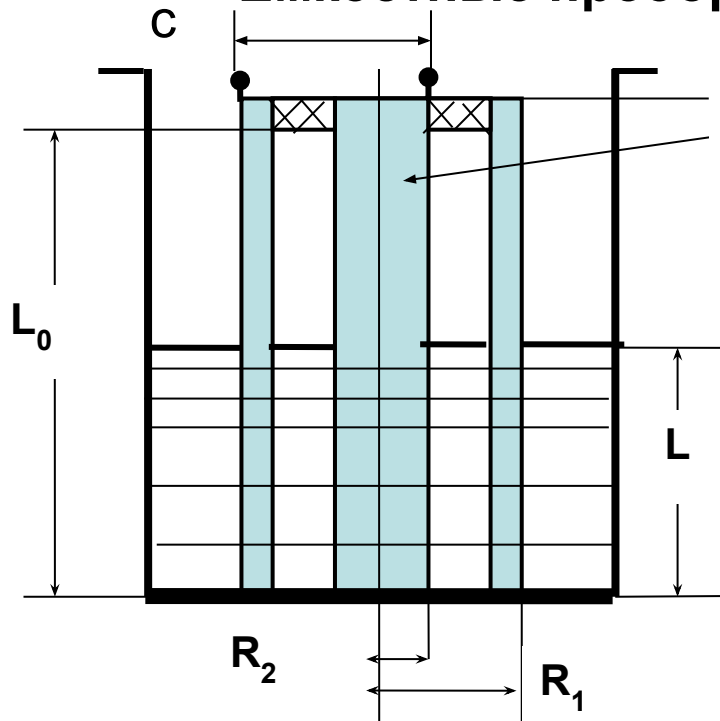
Мембрана

Электрофизические уровнемеры

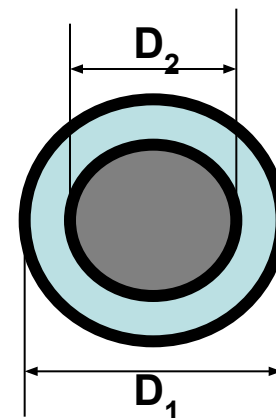
Уровнемеры на основе электропроводности



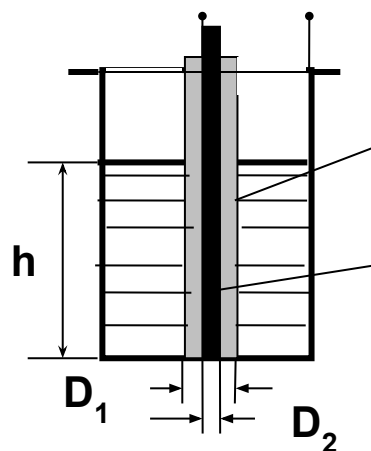
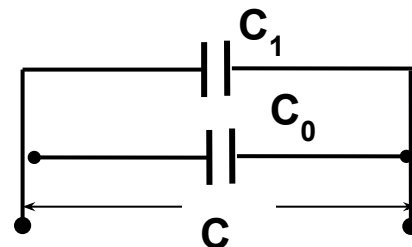
Емкостные преобразователи уровня



Внутренний электрод
Наружный электрод



$$C = C_1 + C_0 = [L\varepsilon + (L_0 - L)\varepsilon_0] \frac{2\pi}{\ln \frac{R_1}{R_2}}$$

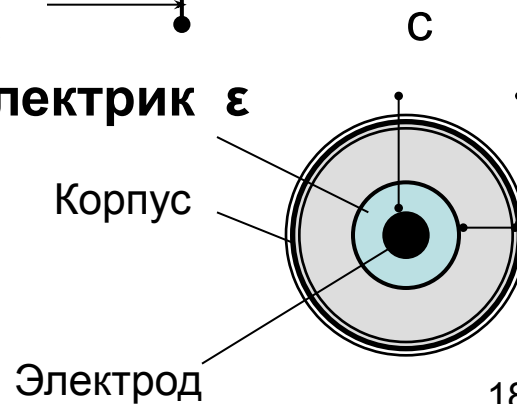


Диэлектрик ε

Электрод

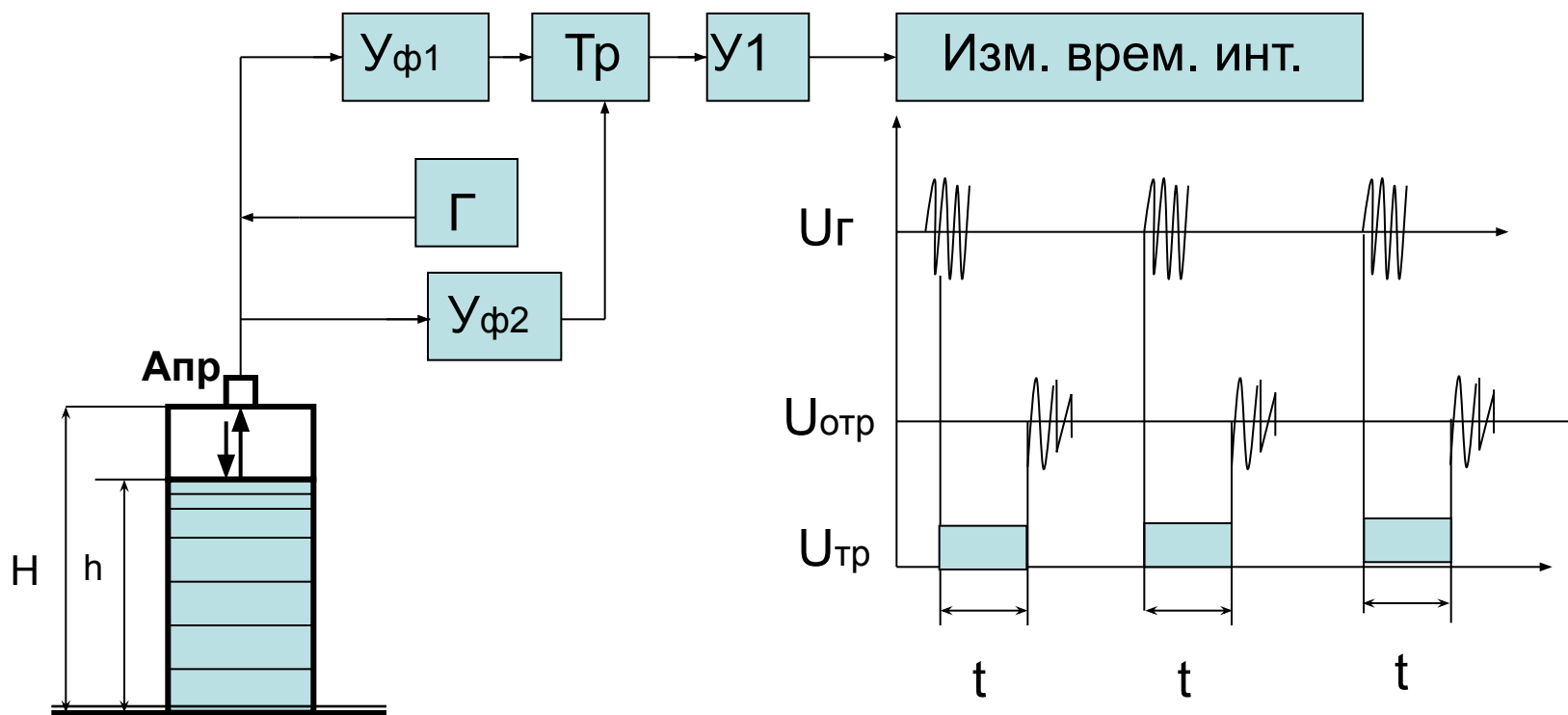
Диэлектрик ε

$$C = \frac{2\pi h \varepsilon}{\ln \frac{R_1}{R_2}}$$



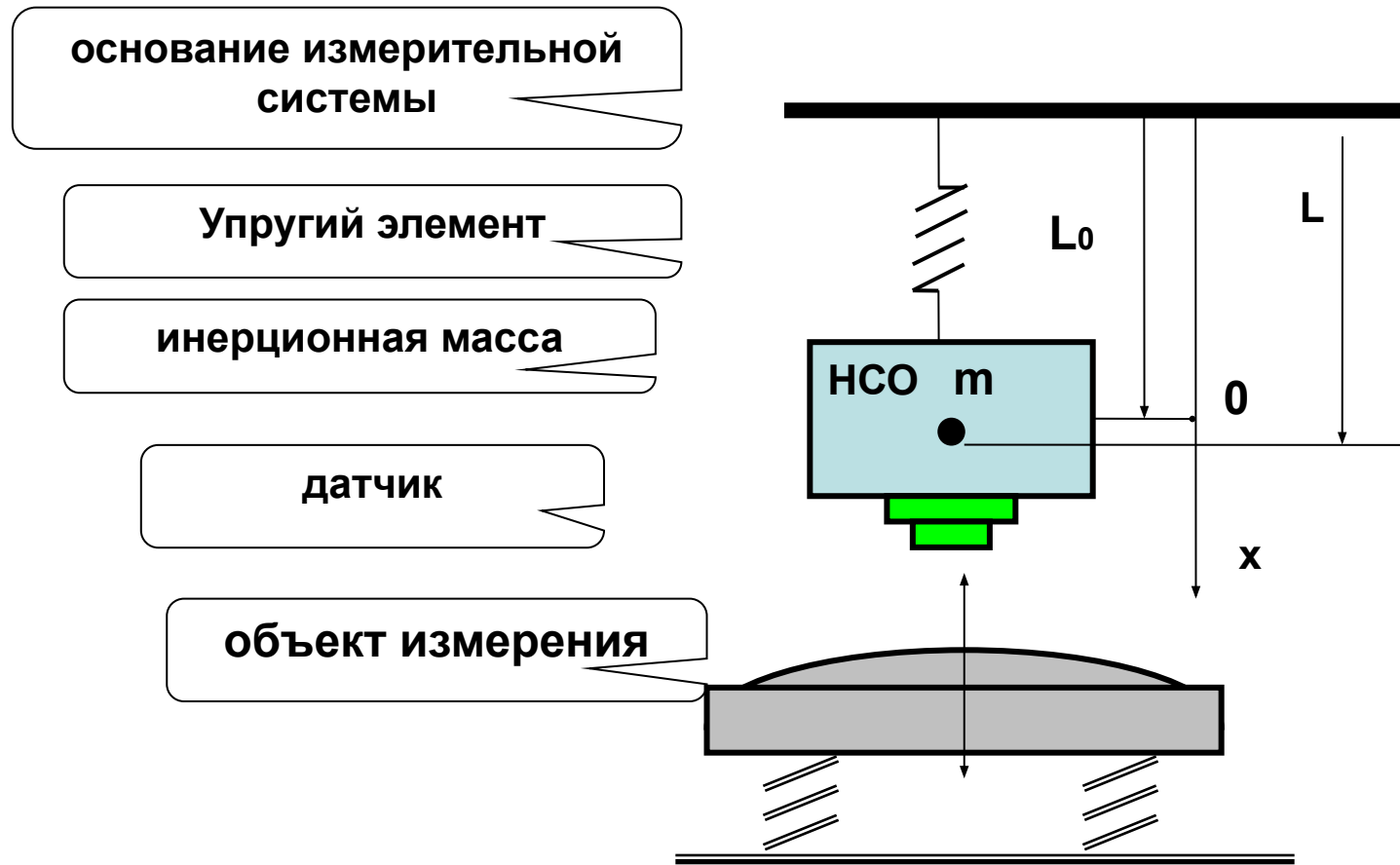
Ультразвуковые уровнемеры

Измерение с помощью акустических волн



Измерение ускорения, вибрации и удара

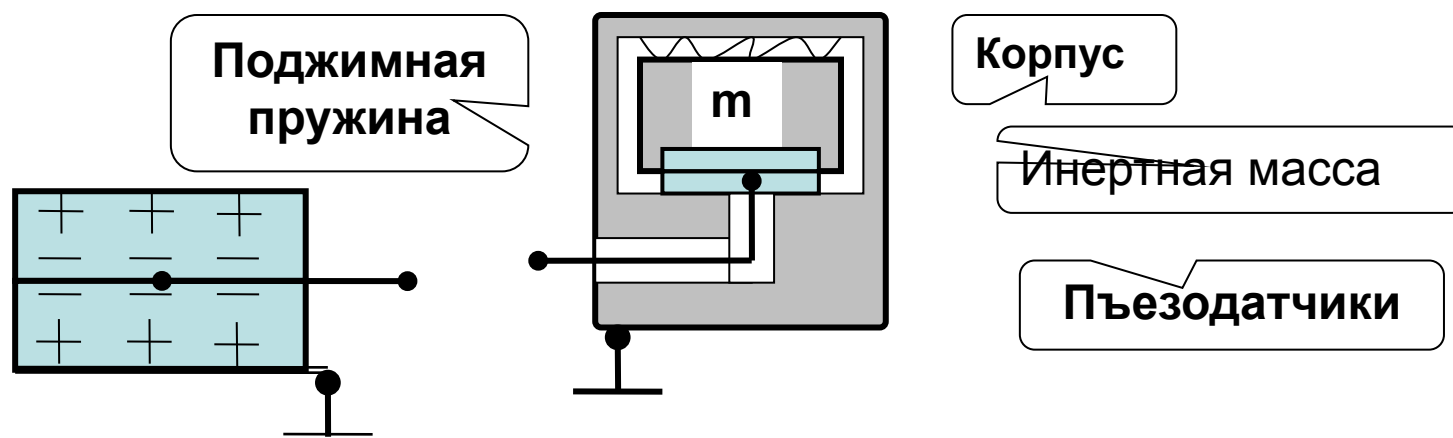
Схема измерения относительной вибрации в
назначенной инерциальной системе отсчёта



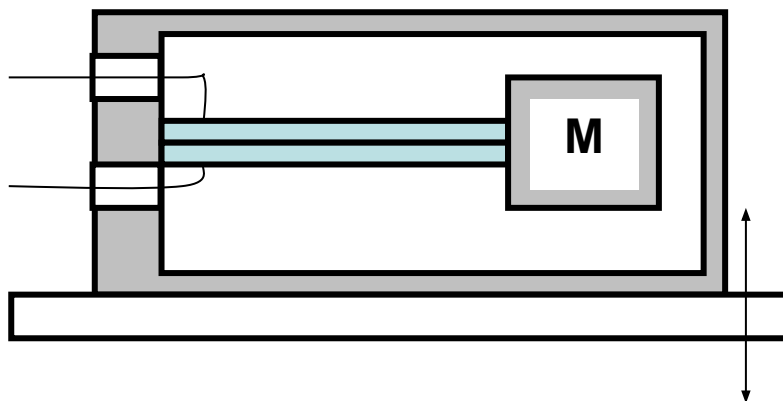
Вторичные преобразователи акселерометров

Пьезоэлектрические акселерометры

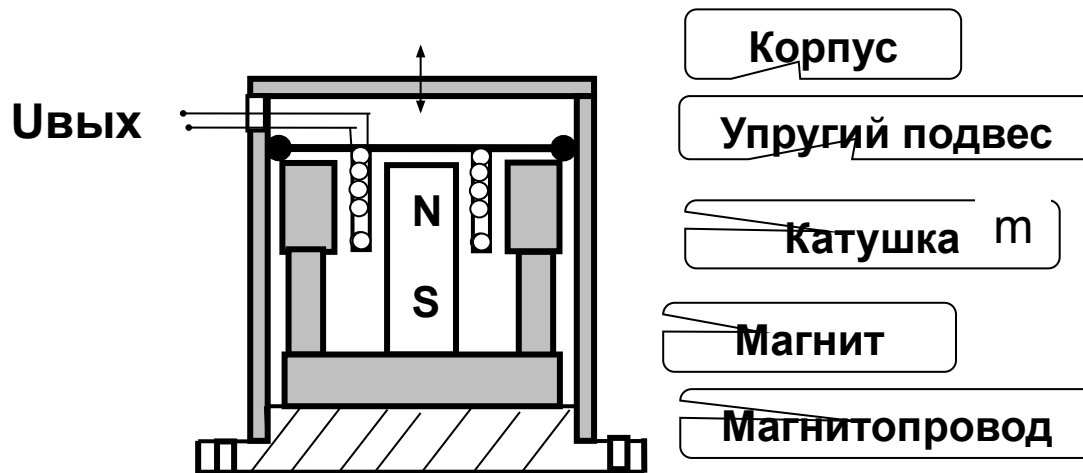
$$q = d \cdot F$$



Пьезоэлектрические акселерометры консольного типа.



Электродинамический датчик виброскорости



$$U = BSN(dX/dt)$$

B – индукция, S – площадь катушки, N – число витков катушки,
 X – вибросмещение. m – масса катушки