

- **Методы измерений электрических и магнитных свойств функциональных материалов**

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ

## Виды и методы измерений

### Что есть измерение?

- Измерение это нахождение значения физической величины опытным путем с использованием специальных технических средств
- Целью измерения является получение количественной информации об измеряемой величине, а результатом - значение физической величины

- Качество измерений определяется погрешностью (неопределенностью) результата измерения

### Для проведения

### измерений необходимы:

- средства измерения
- метод или способ измерения

# Какие виды измерений существуют?

- **Прямым** называют измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных с использованием прибора, проградуированного в единицах измеряемой величины
- **Косвенным** называют измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными посредством прямых измерений.
- **Совокупными** называют проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при этом искомые значения каждой из величин находят решением системы уравнений, получаемых по результатам прямых измерениях различных сочетаний этих величин
- **Совместными** называют проводимые одновременно измерения 2-х или нескольких не одноименных величин для нахождения зависимости между ними.

# Методы прямых измерений

- **Методы непосредственной оценки** – это методы, при которых значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия
- **Методы сравнения с мерой** – это методы, основанные на сравнении измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой  
В зависимости от способа сравнения различают
  1. дифференциальный метод
  2. нулевой метод
  3. метод замещения

# Физические величины и единицы измерения

- Физическими величинами называют измеряемые характеристики физических объектов
  - Основных величин 7 : длина ( $L$ ), время ( $T$ ), масса ( $M$ ), температура ( $\theta$ ,  $T$ ), сила тока ( $I$ ), количество вещества ( $N$ ) и сила света ( $J$ ,  $I$ )
  - Для обозначения однородных величин вводят понятие размерности

Например,  $dim G = L$  – величина  $G$  имеет размерность длины  
 $dim v = \text{длина} \cdot \text{время}^{-1} = L \cdot T^{-1}$

- Для осуществления измерений физических величин установлены соответствующие единицы измерения

В СИ семь основных единиц : метр (м), килограмм (кг), секунда (с), Ампер (А), Кельвин (К), моль (моль), кандела (кд)

Все остальные единицы СИ являются производными от основных и представляют собой произведения степеней основных единиц, не содержащие численных коэффициентов.

Например, единица СИ магнитной индукции:  $[B] = \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2} = \text{Тл}$

# Первичные преобразователи информации (ППИ)

генераторные

параметрические

радиационные

# Первичные преобразователи информации (ппи)

## Датчики



```
graph TD; A[Датчики] --> B[Активные]; A --> C[Пассивные];
```

### Активные

преобразование измеряемой  
величины в электрический сигнал

### Пассивные

выходной электрический  
сигнал по R, L, C

# **Первичные преобразователи информации (ППИ)**

**Использование физических эффектов для построения  
активных датчиков**



# Первичные преобразователи информации (ППИ)

## Датчики

$\epsilon$

Термо ЭДС

$\Phi$

Пирозлектрический эффект

$\Phi$

$U(\Phi)$

Фотоэлектрический эффект

Пьезоэлектрический эффект

# Первичные преобразователи информации (ППИ)

## Датчики

С использованием  
электромагнитной индукции

На эффекте Холла

# Первичные преобразователи информации (ППИ) Пассивные датчики

# О погрешностях измерения

- Погрешность это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины
- По форме погрешности делят на абсолютную и относительную

$$\Delta = A - A_{\text{ист}} \quad \delta = \frac{\Delta}{A_0} 100\%$$

- По источникам погрешности делят на инструментальную, методическую и субъективную
- По характеру погрешности делят на систематическую и случайную

# СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

СИ – это технические устройства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики

# Статические характеристики и параметры СИ

- **Уравнением преобразования** называют однозначную функциональную зависимость между выходной величиной -у и входной величиной -х, которая может быть выражена аналитически –  $y=f(x)$  или графически
- **Чувствительность** СИ определяет скорость изменения выходной величины при изменении входной
- **Порогом чувствительности** СИ называют изменение входной величины, вызывающее наименьшее изменение выходной величины, которое может быть обнаружено с помощью данного СИ без каких-либо дополнительных устройств
- Область значений между верхним и нижним пределами определяет **диапазон измерений**
- **Погрешность средства измерения** разделяют на основную погрешность и дополнительную погрешность
- **Входное сопротивление**
- **Выходное сопротивление**
- **Время успокоения прибора** – промежуток времени с момента включения измеряемой величины до момента, когда указатель отсчетного устройства не будет удаляться от установившегося отклонения более, чем на 1% длины шкалы
- **Время измерения**- время, необходимое для обработки входного сигнала и его индикации

# Динамические характеристики и параметры СИ

- Уравнение преобразования, чувствительность, погрешность связаны с амплитудой и частотой входного сигнала
- Динамической чувствительностью преобразователя является функция, представляющая собой отношение мгновенных значений выходной и входной величин
- *Идеальный преобразователь* осуществляет заданное преобразование без искажений
- *Реальные преобразователи (СИ)* обладают инерционными или динамическими свойствами

# Свойства дифференцирующего преобразователя

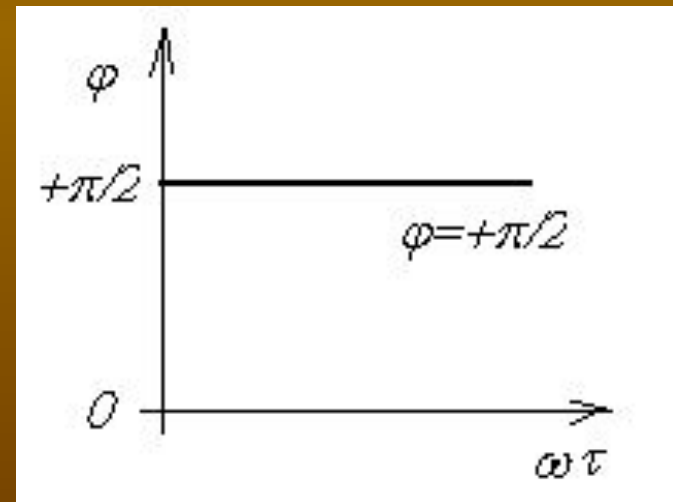
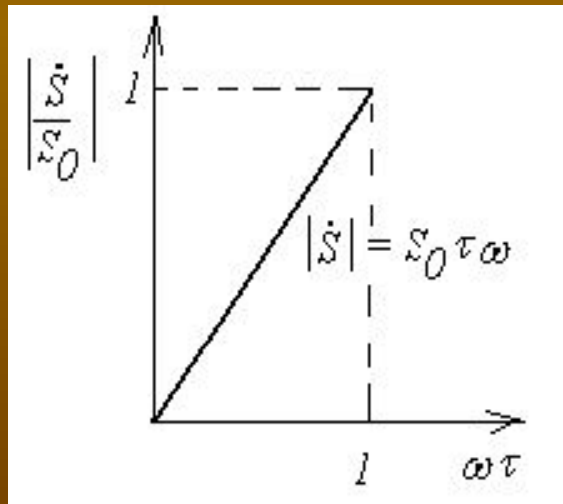
- Для дифференцирующего преобразователя  
выходная величина пропорциональна  
производной от входной величины  
( уравнение преобразования )

$$y_{\text{вых}} = S_0 \tau \left( \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} \right)$$



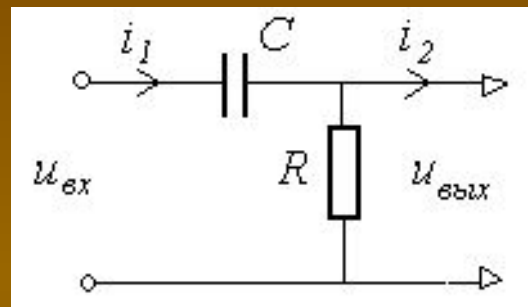
# Синусоидальный сигнал на входе дифференцирующего преобразователя

- Динамическая чувствительность (АЧХ) дифференцирующего преобразователя линейно зависит от частоты входного сигнала
- Выходной сигнал дифференцирующего преобразователя на  $90^\circ$  опережает входной (фазовая характеристика)



# Свойства реального дифференцирующего преобразователя

- Пример: дифференцирующая цепь



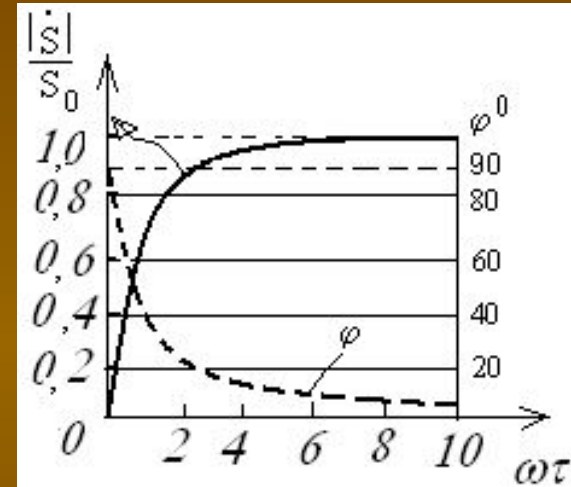
- уравнение преобразования:  
дифференциальное уравнение 1-го порядка

$$\tau \frac{dy_{вых}}{dt} + y_{вых} = S_0 \tau \frac{dx_{вх}}{dt}$$

# Синусоидальный сигнал на входе реального дифференцирующего преобразователя

АЧХ 
$$|\dot{S}| = \frac{|\dot{Y}_{\text{вых}}|}{|\dot{X}_{\text{вх}}|} = S_0 \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$$

ФЧХ 
$$\varphi = \text{arctg} \frac{1}{\omega\tau}$$



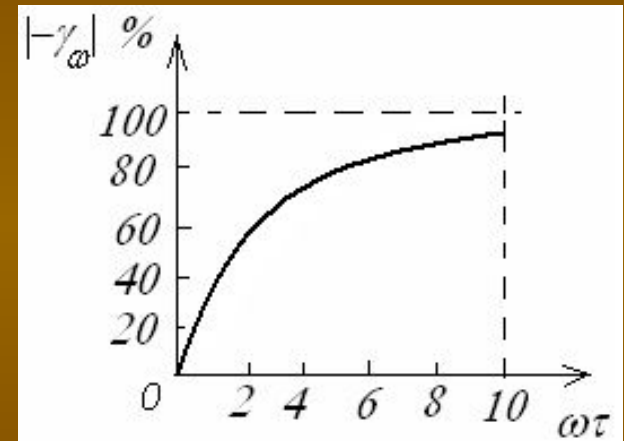
на низких частотах (при  $\omega\tau \ll 1$ ) его чувствительность (сплошная кривая) становится пропорциональной частоте, т.е. он приближается к идеальному дифференцирующему преобразователю;

на высоких частотах (при  $\omega\tau \gg 1$ ) его чувствительность (пунктирная кривая) не зависит от частоты, т.е. он ведет себя как безинерционный преобразователь.

# Погрешность реального дифференцирующего преобразователя

- Под динамической погрешностью преобразователя понимают разность между динамической чувствительностью реального преобразователя и динамической чувствительностью идеального преобразователя, т.е. осуществляющего данное преобразование без искажений

$$\gamma_{\omega} = \frac{|\dot{S}_p| - |\dot{S}_u|}{|\dot{S}_u|} = \frac{\frac{S_0 \omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} - S_0 \omega \tau}{S_0 \omega \tau} = \frac{1 - \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}$$



- амплитудно-частотную погрешность реального дифференцирующего преобразователя зависит от частоты-отрицательна и возрастает по абсолютной величине с увеличением частоты
- уменьшение частотной погрешности при заданной частоте возможно за счет снижения постоянной времени преобразователя  $\tau$

# Свойства интегрирующего преобразователя

- Сигнал на выходе интегрирующего преобразователя пропорционален интегралу от входного.
- Уравнение преобразования в интегральной и дифференциальной форме имеет вид:

$$y_{\text{вых}} = \frac{S_0}{\tau} \int x_{\text{вх}} dt \qquad \tau \frac{dy_{\text{вых}}}{dt} = S_0 x_{\text{вх}}$$

# Синусоидальный сигнал на входе интегрирующего преобразователя

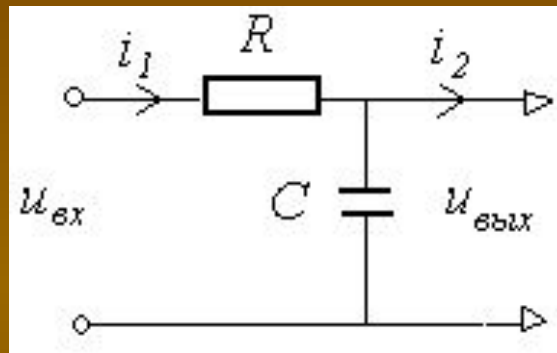
- Амплитудно-частотная характеристика интегрирующего преобразователя обратно пропорциональна частоте входного сигнала
- Фазовая характеристика не зависит от частоты входного сигнала и характеризует отставание выходной величины от входной на угол  $\pi/2$

$$|\dot{S}| = \frac{|\dot{Y}_{вых}|}{|\dot{X}_{вх}|} = \frac{S_0}{\omega\tau}$$

$$\phi = \operatorname{arctg}(-\infty) = -\pi/2$$

# Свойства реального интегрирующего преобразователя

- Пример: пассивная интегрирующая RC-цепь

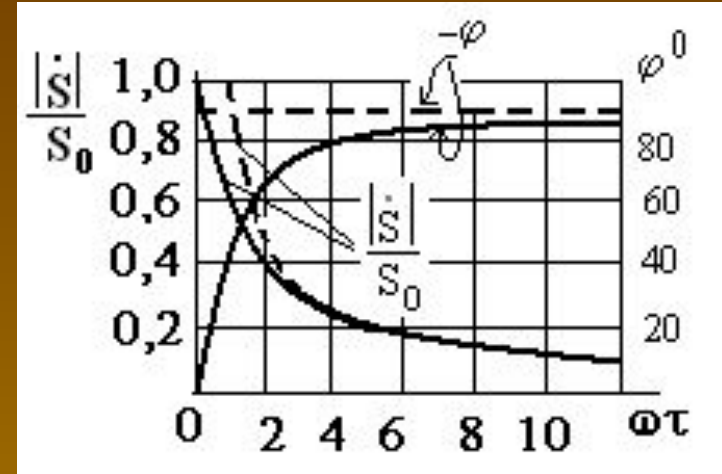


- Уравнение преобразования реального интегрирующего преобразователя, который получил также название апериодического или инерционного звена первого порядка

$$\tau \frac{dy_{\text{вых}}}{dt} + y_{\text{вых}} = S_0 x_{\text{вх}}$$

# Синусоидальный сигнал на входе реального интегрирующего преобразователя

- АЧХ: 
$$\left| \dot{S} \right| = \frac{\left| \dot{Y}_{вых} \right|}{\left| \dot{X}_{вх} \right|} = \frac{S_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$
- ФЧХ: 
$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im } \dot{S}}{\text{Re } \dot{S}} = \arctg(-\omega\tau)$$



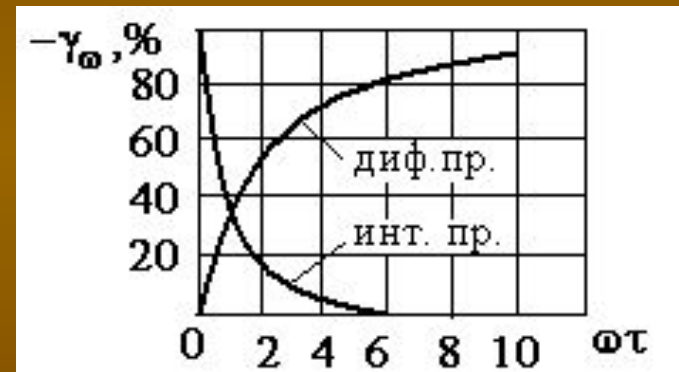
- *безразмерная чувствительность реального интегрирующего преобразователя уменьшается почти обратно пропорционально  $\omega\tau$  (сплошная кривая) и близка по характеру к зависимости для идеального интегрирующего преобразователя. При  $\omega\tau \gg 1$  преобразователь приближается к идеальному интегрирующему преобразователю, при  $\omega\tau \ll 1$  – к безинерционному.*
- *Фазовая характеристика, т.е. угол сдвига фаз между выходным и входным сигналами, нарастает с увеличением частоты и асимптотически стремится к  $\pi/2$ .*



## Погрешность реального дифференцирующего преобразователя (синусоидальный сигнал на входе)

- Под динамической погрешностью преобразователя понимают разность между динамической чувствительностью реального преобразователя и динамической чувствительностью идеального преобразователя, т.е. осуществляющего данное преобразование без искажений

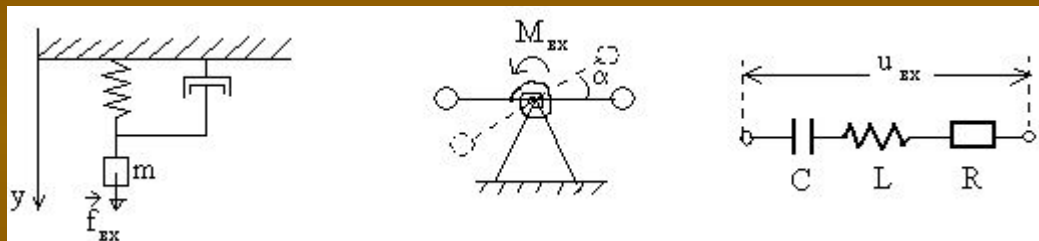
$$\gamma_{\omega} = \frac{\left| \dot{S}_p \right| - \left| \dot{S}_u \right|}{\left| \dot{S}_u \right|} = \frac{\frac{S_0}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} - \frac{S_0}{\omega\tau}}{\frac{S_0}{\omega\tau}} = \frac{\omega\tau - \sqrt{1+(\omega\tau)^2}}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$$



- Видно, что погрешность интегрирования всюду отрицательна и резко стремится к нулю при росте  $\omega$ , точнее  $\omega\tau$ .
- погрешность интегрирующего преобразователя будет тем меньше, чем больше постоянная времени  $\tau$  и чем больше частота  $\omega$  (тогда как для дифференцирующего преобразователя, данные для которого для сравнения приведены на этом же рисунке, погрешность падает с уменьшением  $\tau$  и  $\omega$ ).

# Свойства колебательного преобразователя

- К колебательным преобразователям относятся механические, акустические, гидравлические, электрические системы, в которых имеются обобщенная масса, успокоение и жесткость, взаимосвязанные дифференциальным уравнением 2-го порядка



$$\frac{d^2 y_{\text{вых}}}{dt^2} + h \frac{dy_{\text{вых}}}{dt} + \omega_0^2 y_{\text{вых}} = \frac{S_0}{m} x_{\text{вх}}$$

$$h = \frac{P}{m}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{c_0}{m}}$$

# Гармонический сигнал на входе колебательного преобразователя

- Амплитудная частотная характеристика

$$\left| \dot{S} \right| = \frac{S_0}{c_0 \sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}} \Rightarrow \frac{\left| \dot{S} \right| c_0}{S_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}}$$

- Фазовая характеристика

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( -\frac{2\beta\eta}{\eta^2 - 1} \right)$$

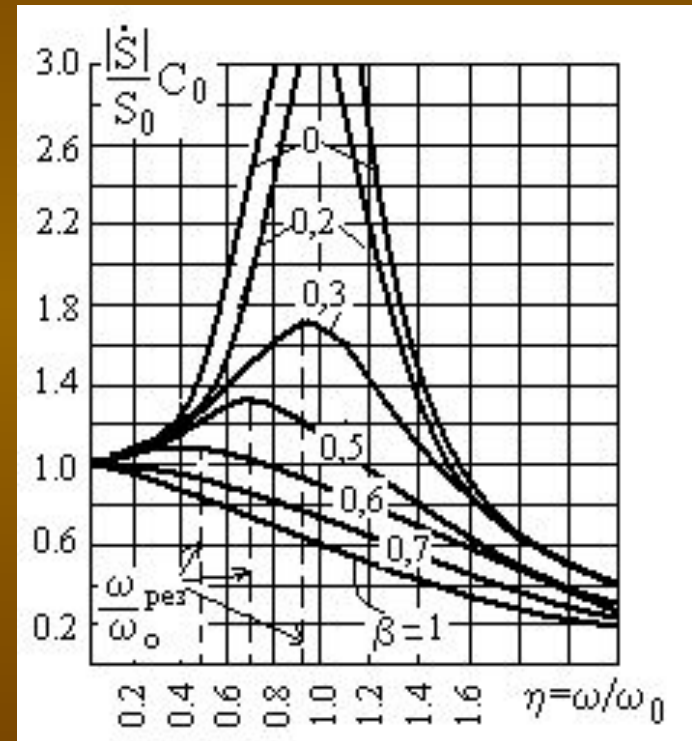
- $\eta = \frac{\omega}{\omega_0}$  - относительная частота

- $\beta = \frac{h}{2\omega_0}$  - степень успокоения

## Безразмерные частотные характеристики колебательного преобразователя при различных значениях степени успокоения $\beta$ .

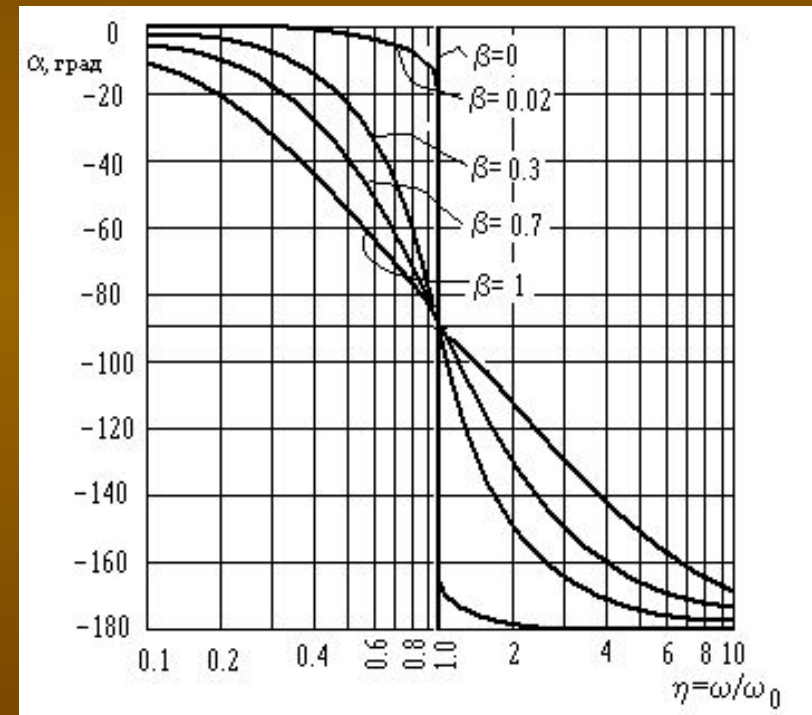
- наиболее равномерный вид имеет частотная характеристика при степени успокоения  $\beta=0,6-0,7$ ;
- при  $\beta \geq 1/\sqrt{2} = 0.707$  характеристика не имеет подъема;
- максимальное значение чувствительности при резонансной частоте  $\omega_{рез}$  и заданных  $S_0$  и  $C_0$  зависит только от степени успокоения  $\beta$ .
- резонансная частота, найденная из условия экстремума АЧХ, зависит от степени успокоения и отличается от собственной частоты  $\omega_0$ :

$$\omega_{рез} = \omega_0 \sqrt{1 - 2\beta^2}$$



## Фазовые характеристики колебательного преобразователя при различных значениях степени успокоения $\beta$

- при частоте равной частоте собственных колебаний преобразователя  $\omega_0$ , угол сдвига фаз между входной и выходной величинами составляет  $90^\circ$  и не зависит от степени успокоения системы;
- при небольших степенях успокоения и частотах вблизи  $\omega_0$  сдвиг по фазе между входной и выходной величинами может почти скачком достигать значений в  $180^\circ$ ;
- при степени успокоения  $\beta=0,65-0,7$  и при работе в диапазоне частот от 0 до  $\eta=0,65-0,7$  фазовые характеристики можно приближенно рассматривать как прямые, выходящие из начала координат ( $\eta=0, \alpha=0$ ), т.е.  $\alpha=k\omega$ .



# Погрешности колебательного преобразователя при синусоидальном сигнале на входе

- Погрешность зависит от степени успокоения в системе

$$\gamma_{\omega} = \frac{|\dot{S}_p| - |\dot{S}_u|}{|\dot{S}_u|} = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\beta\eta)^2}} - 1$$

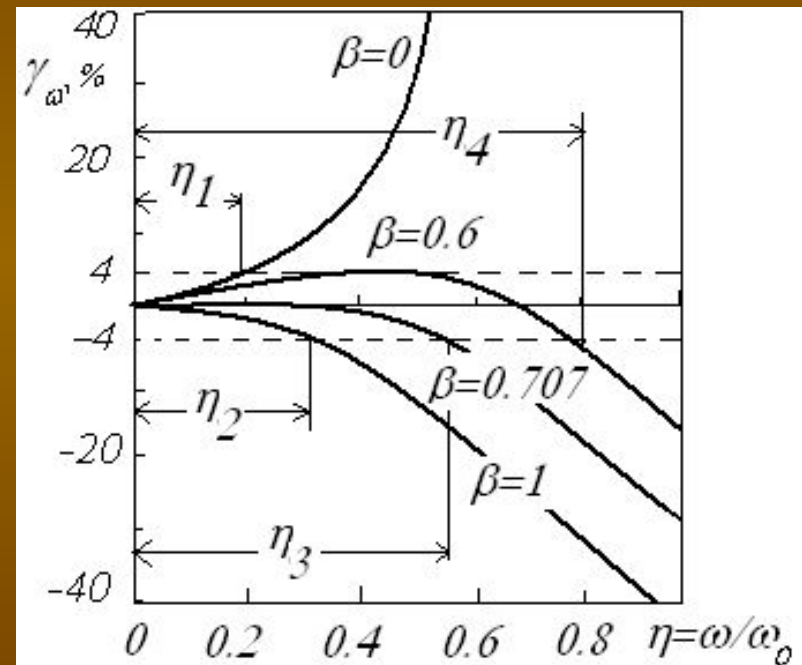
Выделяются три крайних случая

- $\beta=0$ , т.е. успокоение отсутствует  $\gamma_{\omega} = \frac{\eta^2}{1-\eta^2}$
- $\beta=1$ , критическое успокоение  $\gamma_{\omega} = \frac{1}{1+\eta^2} - 1 = -\frac{\eta^2}{1+\eta^2}$
- $\beta=0,707=\sqrt{2}/2$ ,  $\gamma_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{1+\eta^2}} - 1$

# Погрешность колебательного преобразователя при разных степенях успокоения

- $\beta=0$
- $\eta < 1$  ( $\omega < \omega_0$ ) погрешность быстро возрастает;
- $\eta = 1$  ( $\omega = \omega_0$ ) погрешность  $\rightarrow \infty$ ;
- $\eta > 1$  ( $\omega > \omega_0$ ) погрешность становится отрицательной и быстро увеличивается по абсолютной величине.
- $\beta=1$
- Видно, что погрешность при всех частотах отрицательна и быстро возрастает с ростом частоты.
- $\beta=0,707=\sqrt{2}/2$
- погрешность также всюду остается отрицательной, но возрастает значительно медленнее, чем при  $\beta=1$

Для  $\beta=0,6$ , то видно, что с изменением частоты погрешность изменяется наиболее благоприятно



# Электродинамический измерительный механизм

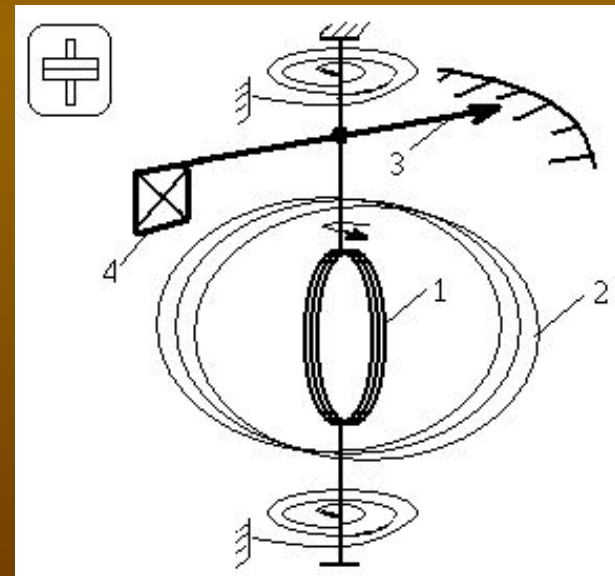
## Принцип действия

*электродинамического ИМ основан на взаимодействии магнитных потоков, созданных токами двух катушек:*

- подвижной катушки 1, закрепленной на оси вращения с возвратными пружинами (Рис. 1, слева вверху указано обозначение данного ИМ);
- неподвижной катушки 2, состоящей из двух частей, между которыми проходит ось подвижной катушки;

- Уравнение преобразования на постоянном токе

$$\alpha = \frac{1}{k} I_1 I_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} = \frac{I_2}{k} \left( \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} \right) I_1$$





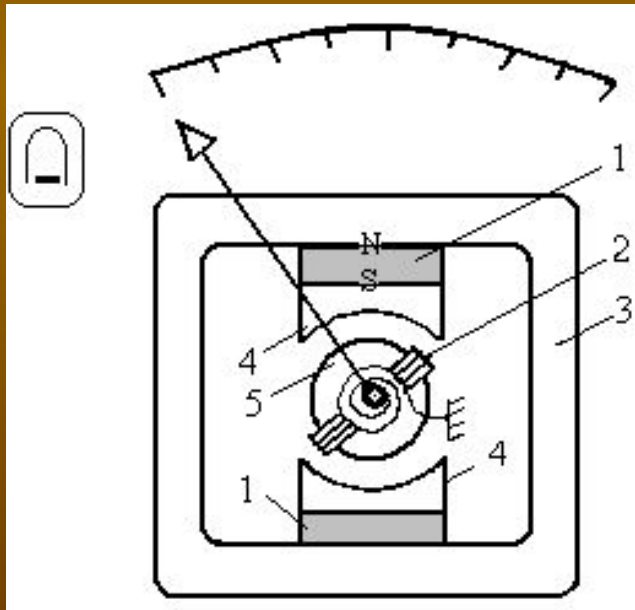
# Уравнение преобразования электродинамического ИМ на переменном токе

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha} I_1 I_2 \cos \varphi$$

- Отклонение подвижной части измерительного механизма электродинамической системы обусловлено действием токов двух катушек, одна из которых неподвижна, другая – подвижна.
- Возможность использования ИМ в цепях постоянного и в цепях переменного тока.
- Измерительный механизм обладает перемножающим свойством двух величин (токов и напряжений).
- Измерительный механизм, благодаря чувствительности к внешним магнитным полям, требует экранирования.

# Магнитоэлектрический измерительный механизм

- В магнитоэлектрическом механизме вращающий момент возникает в результате взаимодействия тока в катушке и магнитного поля постоянного магнита



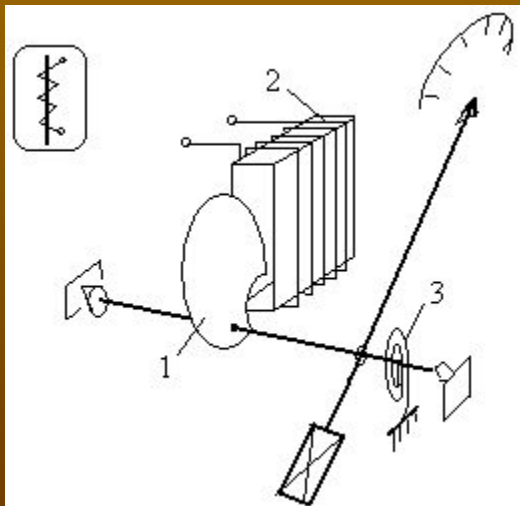
- Уравнение преобразования

$$\alpha = \frac{BSw}{k} I$$

- магнитоэлектрический ИМ обладает большой чувствительностью
- малым собственным потреблением мощности
- мало подвержен влиянию внешних магнитных полей
- имеет прямо пропорциональную зависимость между углом отклонения и током в рамке

# Электромагнитный измерительный механизм

- Вращающий момент в электромагнитном ИМ возникает в результате взаимодействия ферромагнитного сердечника подвижной части механизма и магнитного поля плоской катушки с током



- уравнение преобразования ИМ на постоянном токе :

$$\alpha = \frac{1}{2k} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha}$$

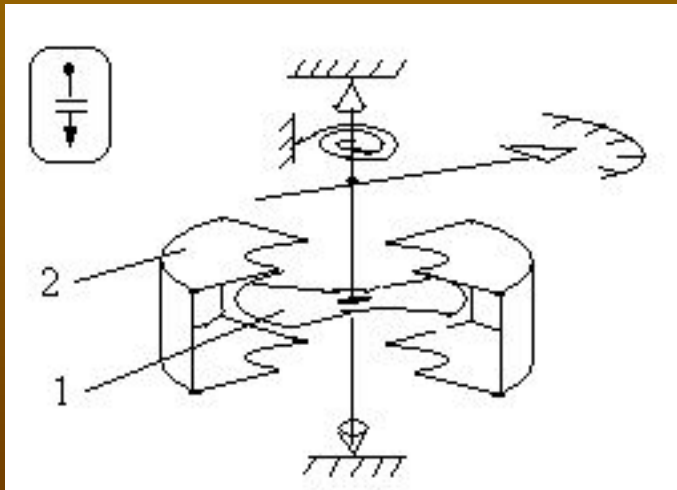
- уравнение на переменном токе имеет тот же вид, что и на постоянном, только теперь фигурирует действующее значение тока в катушке

# Электростатический измерительный механизм

- Вращающий момент в электростатических механизмах возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых является подвижной

- Уравнение преобразования на постоянном токе

$$\alpha = \frac{1}{2k} \frac{\partial C}{\partial \alpha} U^2$$



- При синусоидальном переменном токе уравнение преобразования имеет тот же вид, что и на постоянном токе, с заменой постоянного напряжения  $U$  на действующее значение  $U_d$

# Свойства электростатического ИМ

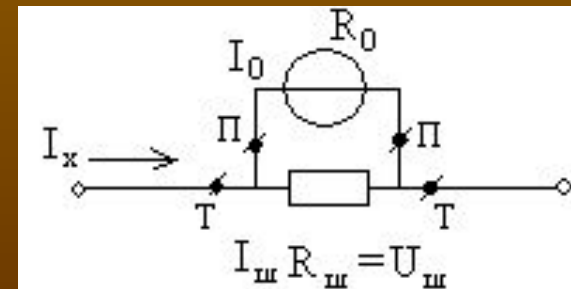
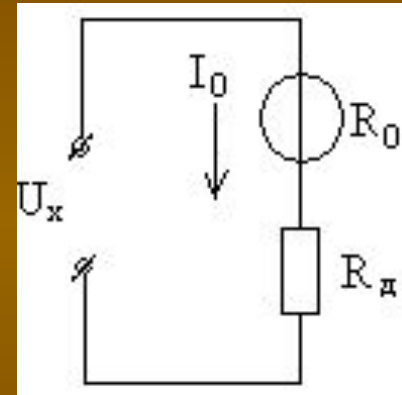
- Видно, что угол поворота электростатического механизма от измеряемого напряжения зависит нелинейно. Линейную зависимость получают путем изготовления пластин специальной формы, при которой является требуемой функцией от угла  $\alpha$ .
- Электростатический механизм имеет малое собственное потребление мощности от измеряемой цепи (на постоянном токе потребление равно нулю).
- На результат измерения малое влияние оказывают температура окружающей среды, частота и форма измеряемого напряжения.
- Отсутствует влияние магнитных полей, но влияют внешние электростатические поля, для защиты от которых используют металлические экраны.

# Масштабные преобразователи

## Добавочный резистор и шунт

- Резистор, включенный последовательно с ИМ, вращающий момент которого зависит от тока, и используемый для измерения напряжения, называется добавочным резистором
- Резистор, включенный параллельно с ИМ, вращающий момент которого зависит от тока, называется шунтом.

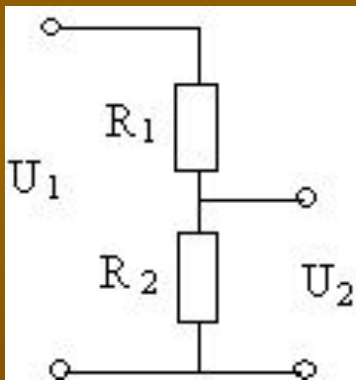
ИМ, например, магнитоэлектрический



# Делители напряжения на постоянном токе

Делители напряжения предназначены для получения определенного соотношения между входным напряжением  $U_1$  и выходным напряжением  $U_2$  при  $U_2 < U_1$ .

- Простейший резисторный делитель не нагружен



Коэффициент преобразования

$$S = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$$

- резисторный делитель нагружен сопротивлением  $R_H$ , с которого и снимается напряжение

Коэффициент преобразования в этом случае

$$S_H = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} \left( 1 + \frac{R_2}{R_H} \right)}$$

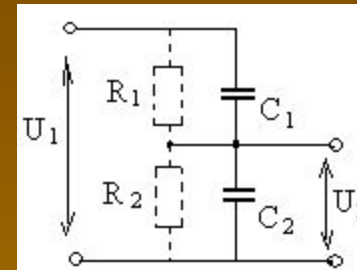
# Делители напряжения на переменном токе

- На переменном токе в общем случае коэффициент преобразования является комплексной величиной

$$S = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}}$$

- $Z_1, Z_2$ - полные комплексные сопротивления соответствующих участков делителя.
- на переменном токе между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  появляется угол сдвига, который является *угловой погрешностью делителя*.

- Простейший конденсаторный делитель



- в пределе высоких частот

$$S_C = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

- пределе низких частот

$$S_R = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

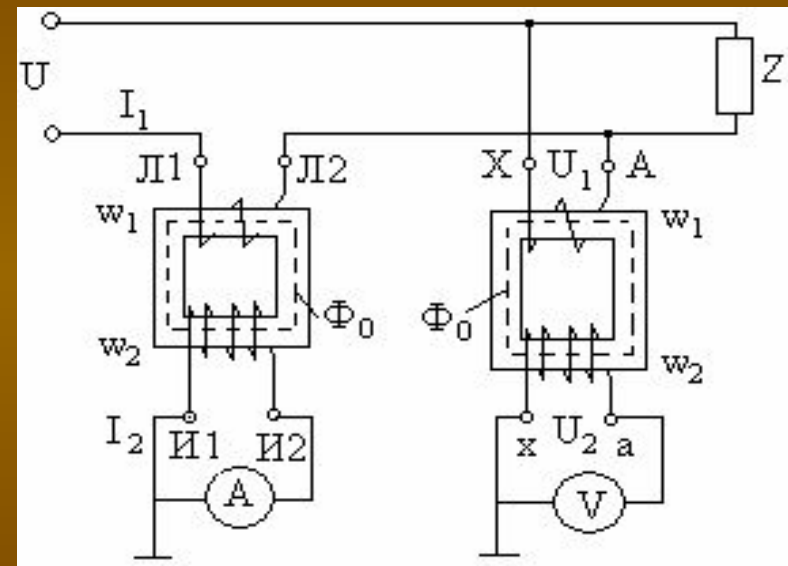
- $R_1, R_2$  –сопротивления изоляции конденсаторов



# Измерительные трансформаторы переменного тока и напряжения

- Измерительные трансформаторы тока и напряжения применяют в качестве преобразователей больших переменных токов и напряжений в относительно малые величины, измерение которых возможно стандартными приборами с относительно небольшими пределами измерений.

## ■ Включение



- Номинальный коэффициент трансформации

$$K_{\text{НОМ}} = w_2 / w_1$$

# Векторная диаграмма трансформатора тока

- Падения напряжения во вторичной цепи

$$\dot{U}_H = R_H \dot{I}_2 + jX_H \dot{I}_2$$

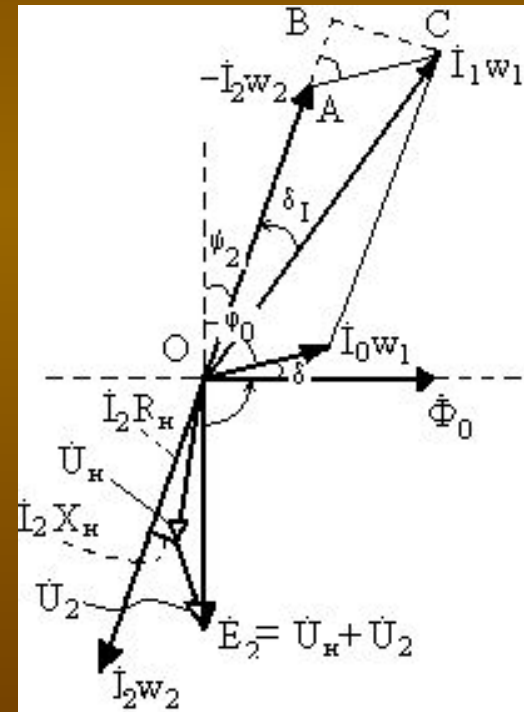
$$\dot{U}_2 = R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_H + \dot{U}_2$$

- МДС в сердечнике

$$w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = w_1 \dot{I}_0$$

- Векторная диаграмма



## Выводы по диаграмме

- МДС оказывает размагничивающее действие на сердечник («—» в законе ЭМИ), т.к. индукционный ток сдвинут по фазе по отношению к почти на  $180^0$
- Вектор МДС , не совпадает по фазе с созданным им потоком . Отставание потока на угол  $\delta$  обусловлено наличием гистерезиса и вихревых токов в сердечнике (или другими словами потерями в сердечнике)
- Видно, что токи и не совпадают по фазе на угол  $\delta I$ , который, таким образом, определяет угловую погрешность преобразования

# Основные соотношения, полученные с помощью диаграммы

- Ток в первичной обмотке

$$I_1 w_1 = \frac{OB}{\cos \delta_I} = \frac{I_2 w_2 + I_0 w_1 \cos(\varphi_0 - \psi_2)}{\cos \delta_I} \quad I_1 = \frac{w_2}{w_1} I_2 + I_0 \cos(\varphi_0 - \psi_2)$$

- Действительный коэффициент трансформации

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} + \frac{I_0}{I_2} \cos(\varphi_0 - \psi_2)$$

- Токовая погрешность

$$\gamma_I = \frac{K_{I_{ном}} - K_I}{K_I} 100\% = \frac{I_0 w_1}{I_2 w_2} \cos(\varphi_0 - \psi_2) 100\%$$

- Угловая погрешность

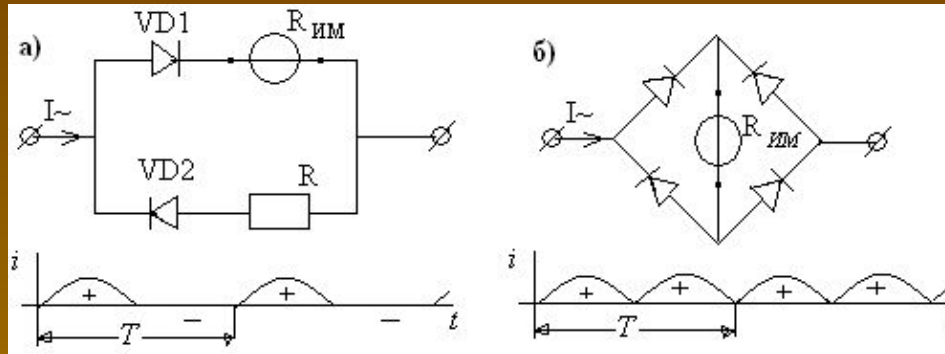
$$\operatorname{tg} \delta_I \approx \delta_I = \frac{BC}{OB} = \frac{I_0 w_1 \sin(\varphi_0 - \psi_2)}{I_2 w_2 + I_0 w_1 \cos(\varphi_0 - \psi_2)} \quad \delta_I = \frac{I_0 w_1 \sin(\varphi_0 - \psi_2)}{I_2 w_2}$$

## Из анализа полученных уравнений можно сделать следующие выводы:

- При возрастании сопротивления вторичной обмотки или ее разрыве ( $I_2=0$ ) происходит возрастание МДС  $I_0 w_1$  до  $I_1 W_1$ , это в свою очередь вызывает резкое увеличение потока  $\Phi_{\sigma}$  сопровождающееся
  - а) ростом потерь в сердечнике и его перегрев,
  - б) ростом ЭДС  $E_2$ , что может вызвать аварийную ситуацию пробоя
- Увеличение сопротивления нагрузки вторичной цепи, например, за счет включения большого числа приборов, приводит к росту  $I_0$  и тем самым к росту токовой и угловой погрешностей.  $I_0$  будет тем меньше, чем выше магнитная проницаемость сердечника и чем меньше магнитные потери, а также при уменьшении индукции до  $\sim 0,05-0,15$  Тл
- Увеличение индуктивного сопротивления нагрузки приводит к увеличению угла  $\psi_2$  и следовательно к увеличению токовой погрешности (растёт значение косинуса) и уменьшению угловой погрешности (значение синуса уменьшается)

# Измерительные выпрямители

- Неуправляемые измерительные выпрямители среднего значения однополупериодный (а) и двухполупериодный (б)



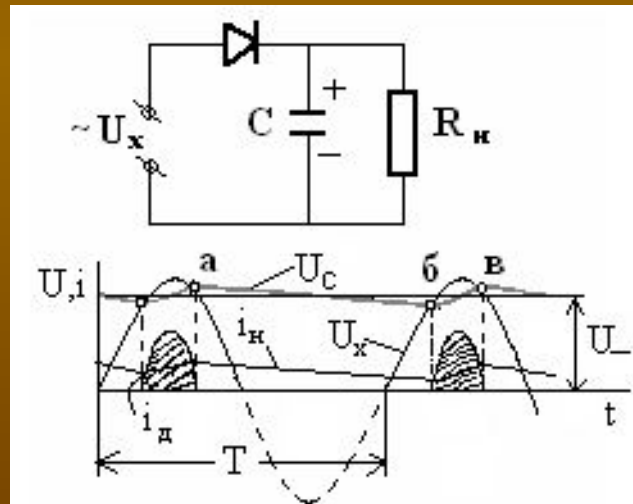
- Отсчет по ИМ пропорционален среднему значению переменного тока, чувствительность второй схемы в два раза выше, чем первой

- а) 
$$\alpha = S \left( \frac{1}{T} \int_0^T i dt \right) = S \frac{1}{2} \left( \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt \right) = S \frac{I_{cp}}{2} = S' I_{cp}$$

- б) 
$$\alpha = S \left( \frac{1}{T} \int_0^T i dt \right) = S I_{cp} = 2S' I_{cp}$$

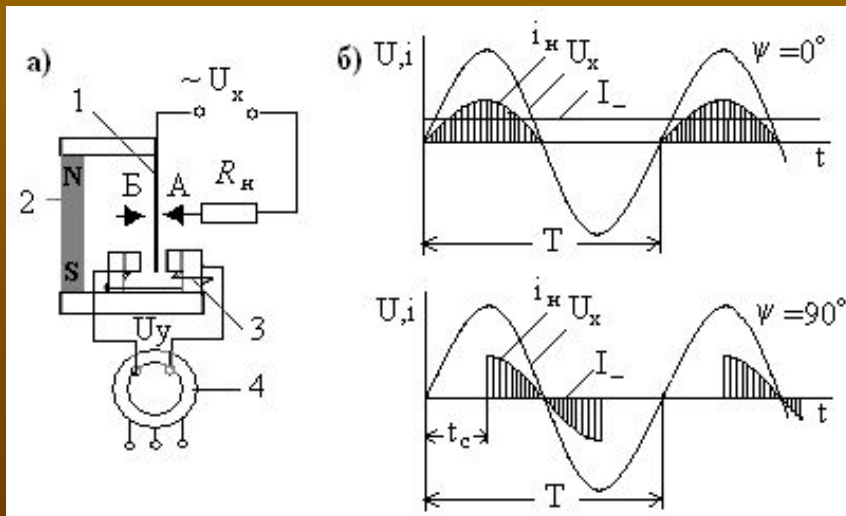
# Измерительные выпрямители максимального значения

- Если постоянная времени  $R_H C \gg T$ , где  $T$  период напряжения  $U_x$ , то на  $R_H$  всегда будет напряжение  $U \sim U_m$  и данный выпрямитель можно использовать для измерения максимального значения переменного напряжения



# Управляемые измерительные выпрямители

- Электромеханический выпрямитель может замыкать контакт А цепи измеряемого напряжения  $U_x$  на время равное половине периода управляющего напряжения  $U_y$



- При совпадении фаз обоих напряжений–  $\psi=0^\circ$

$$I_- = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt \right) = \frac{1}{2} I_{cp}$$

- При  $\psi=90^\circ$

$$I_- = 0.$$

- При произвольном значении  $\psi$

$$I_- = \frac{1}{T} \int_{t_c}^{t_c+T/2} i dt = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_{t_c}^{t_c+T/2} I_m \sin \omega t dt \right) = \frac{1}{2} I_{cp} \cos \psi$$



# Компенсаторы постоянного тока – потенциометры

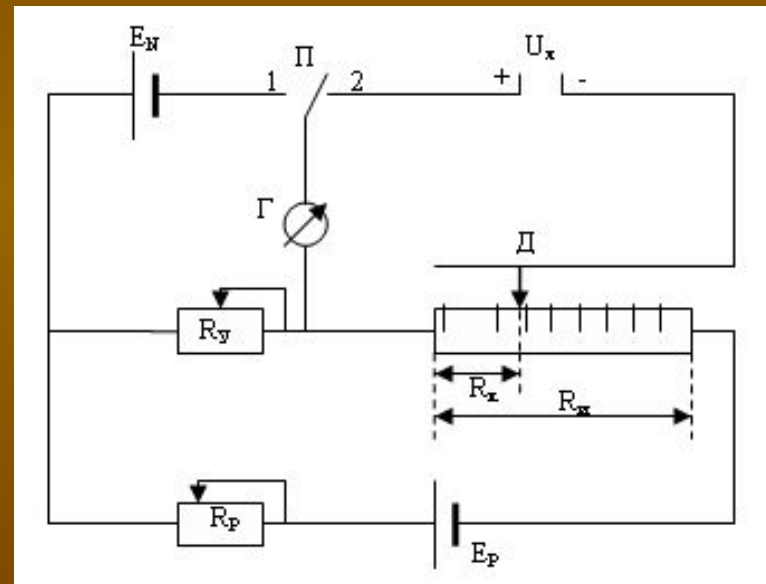
- В потенциометрах осуществляется непосредственное сравнение измеряемого напряжения  $U_x$  (или ЭДС) с известным падением напряжения  $U_k$  на образцовом сопротивлении  $R_k$
- В результате сравнения измеряемое напряжение определяется как:

$$U_x = U_k = I_p R_k$$

где  $R_k$  и  $I_p$  это известное сопротивление компенсатора и ток в нем

$$I_p = E_N / R_y$$

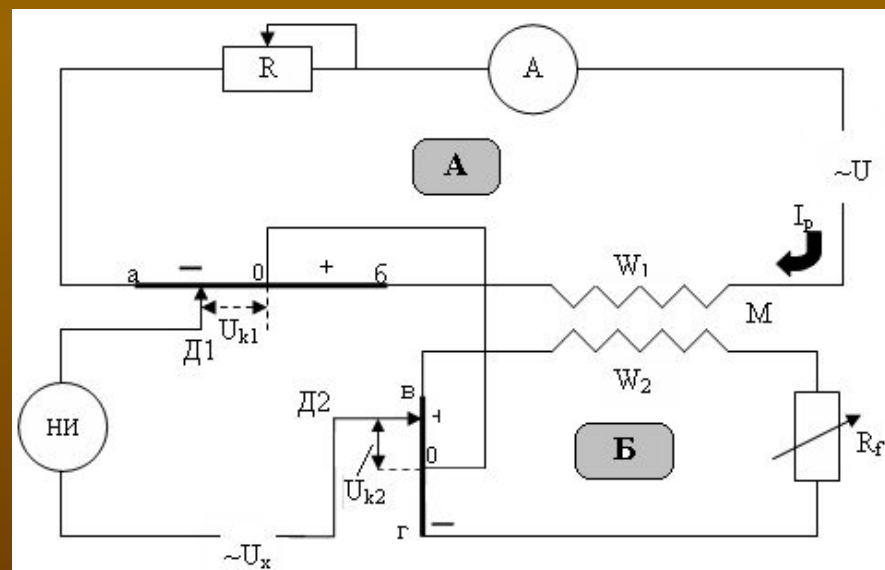
- Функциональная схема компенсатора



# Компенсаторы переменного тока – потенциометры

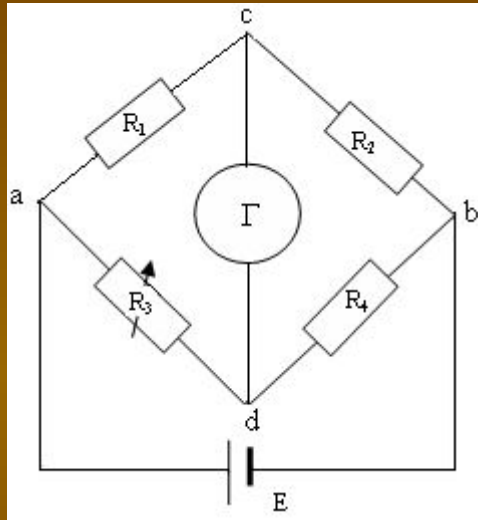
- Принцип действия компенсаторов переменного тока заключается в том, что измеряемое напряжение  $U_x$  или ЭДС уравниваются известным напряжением, создаваемым рабочим током на участке рабочей цепи, питаемой напряжением  $U$ .
- Для уравнивания двух напряжений переменного тока необходимо соблюдение следующих условий:
- равенство напряжений по модулю;
- противоположность по фазе;
- равенство частот;
- идентичность формы кривой напряжений.

- Функциональная схема прямоугольно-координатного компенсатора (потенциометра)



# МОСТЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- схема одинарного моста



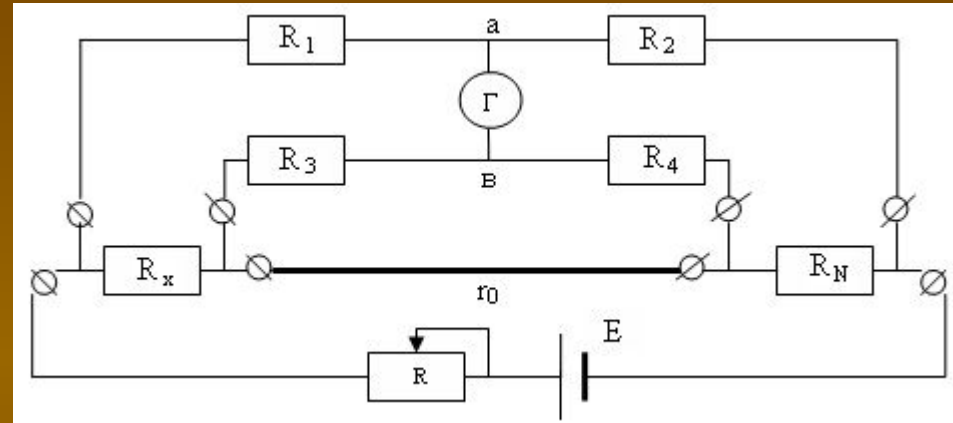
- Условие равновесия моста

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

- Измеряемое сопротивление

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}$$

- схема двойного моста



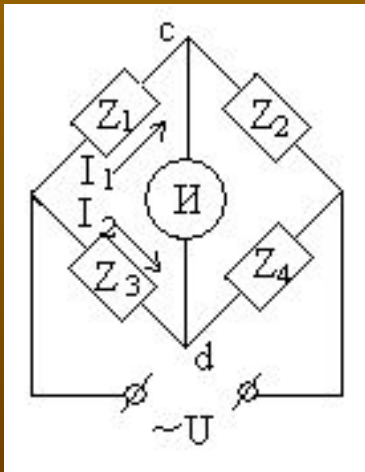
- Измеряемое сопротивление

$$R_x = \frac{R_1 R_N}{R_2} + \frac{R_4 r_0}{R_3 + R_4 + r_0} \left[ \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right]$$

- Измерение сопротивлений с помощью мостов осуществляется с погрешностью 0,001-0,005 %.

# Уравновешенные мосты переменного тока

- Мосты переменного тока применяют для измерения емкости, индуктивности, взаимной индуктивности, добротности и угла потерь для электроизоляционных материалов



- при равновесии моста переменного тока произведения комплексных сопротивлений противоположных плеч равны друг другу

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

- $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  полные комплексные сопротивления плеч моста

# Отличительная особенность мостов переменного тока

- Из равенства двух комплексных чисел следует, что должны быть равны их реальные (вещественные) и мнимые части:
  - $r_1 r_4 - X_1 X_4 = r_2 r_3 - X_2 X_3$
  - $r_1 X_4 + r_4 X_1 = r_2 X_3 + r_3 X_2$
- 1) два независимых уравнения позволяют определить мостом переменного тока *одновременно две независимые величины*;
- 2) для достижения равновесия моста переменного тока необходимо регулировать *не менее двух параметров*, входящих в уравнения равновесия
- Из показательной формы представления комплексных величин условия равновесия конкретизируются
$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \qquad \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$$
- $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – модули полных сопротивлений плеч,
- $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – углы фазового сдвига тока относительно напряжения

# Измерение электрической мощности

- Мощность в электрической цепи – это энергия, потребляемая нагрузкой от источника в единицу времени

- Среднее значение за период называют *активной мощностью*:

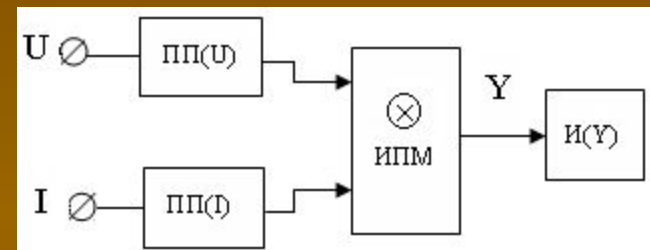
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

- При синусоидальном изменении  $u$  и  $i$ , при сдвиге фаз между ними  $\varphi$ , выражение для активной мощности синусоидального тока

$$P = UI \cos \varphi$$

где  $U$  и  $I$  действующие значения переменного напряжения и тока

- Приборы, реализующие электрический метод *прямого* измерения мощности в соответствии формулой имеют структурную схему

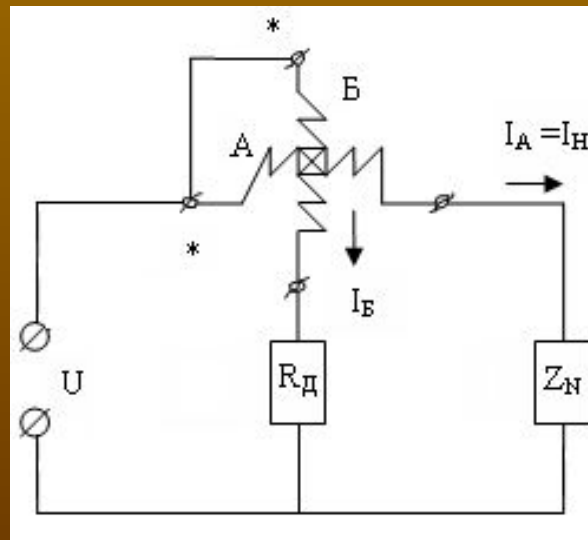


В качестве перемножителей в ваттметрах используют:

- электродинамический,
- электростатический
- индукционный ИМ,
- перемножители на преобразователях Холла, электронные лампы, диоды, транзисторы и интегральные микросхемы

# Электродинамический ваттметр

- измерительным преобразователем мощности является электродинамический измерительный механизм
- Реализует метод *прямых* измерений активной мощности



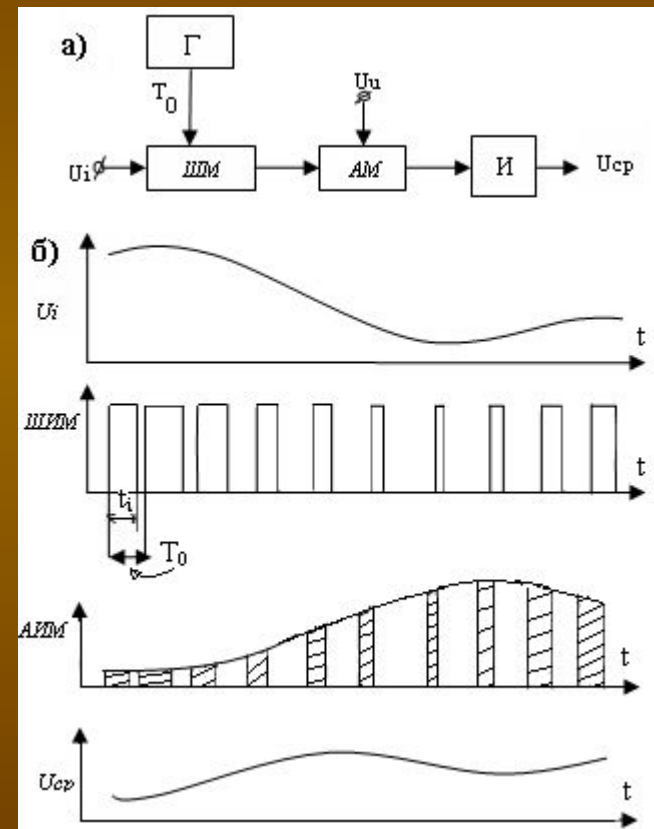
# Модуляционный ваттметр

## Принцип действия :

аналоговые входные сигналы преобразуются

- $U_u$  (сигнал пропорциональный напряжению на нагрузке) в амплитуду импульсов
- $U_i$  (сигнал пропорциональный току в нагрузке) в длительность импульсов
- Площадь каждого из импульсов на выходе АМ пропорциональна мгновенной мощности при условии, что изменением  $U_i$  и  $U_u$  за период  $T_0$  можно пренебречь
$$s(t) = U_u(t) t_i(t) = k U_u(t) U_i(t)$$
- Интегрирование (И - интегратор) напряжения на выходе АМ дает среднее за период входных сигналов значение мощности

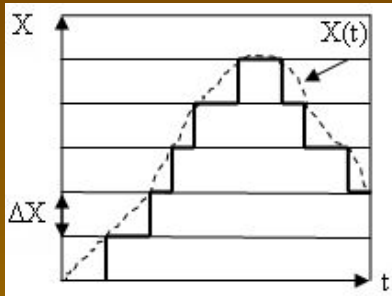
- Структурная схема и временные диаграммы



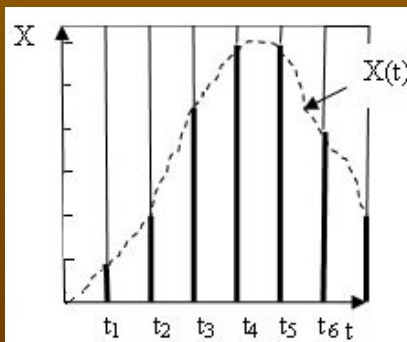


# Квантование, дискретизация и кодирование сигналов

- Квантование—это разделение измеряемой величины  $X$  на ступени квантования  $\Delta X$



- Дискретизация — это представление непрерывной функции  $X = f(t)$  рядом ее мгновенных значений  $X_k$  через интервал времени  $\Delta t$ , который называется шагом дискретизации



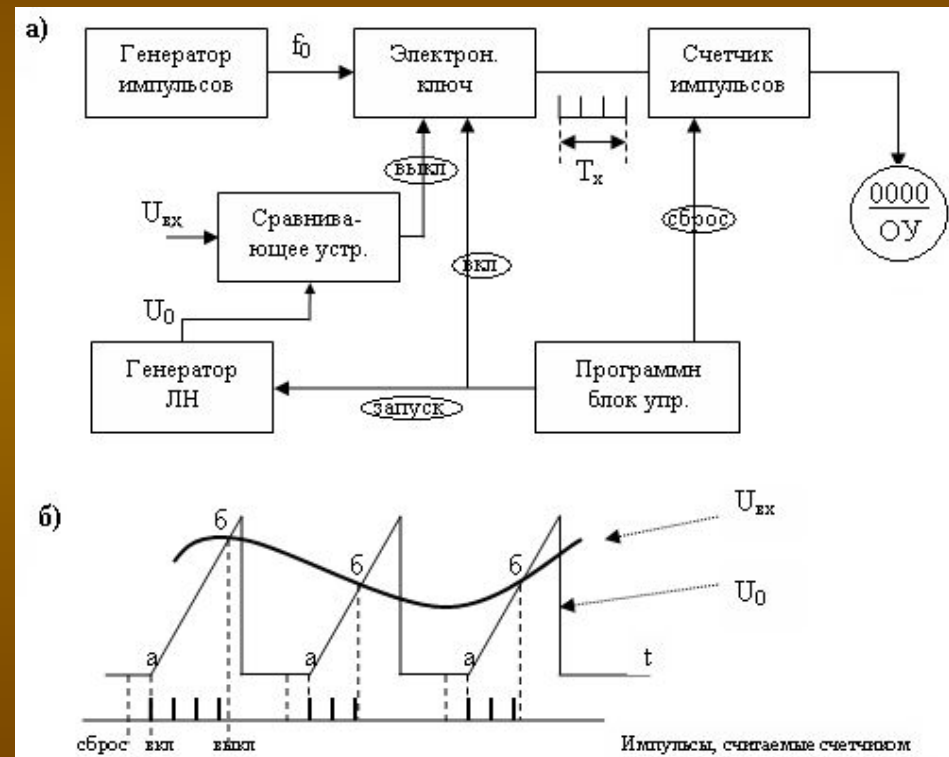
- В АЦП измеряемый сигнал подвергается одновременному квантованию и дискретизации, а затем кодируется.
- При дискретизации измеряемая величина заменяется рядом мгновенных значений, каждое из которых подвергается квантованию и заменяется ближайшим значением уровня квантования, т.е.  
$$X_k = N_k \Delta X$$
- Таким образом, при  $\Delta X = \text{const}$  мгновенному значению измеряемой величины соответствует число ступеней квантования  $N_k$ , которое является кодом мгновенного значения  $X$ .

# Времяимпульсный метод преобразования

- основан на преобразовании измеряемой величины в пропорциональный интервал времени, в течение которого на счетчик поступают импульсы строго стабильной частоты, так что число импульсов, сосчитанных за этот интервал времени, оказывается пропорциональным значению измеряемой величины

- $T_x = aU_x(\delta) = aU_0(\delta)$
- $N_x = f_0 T_x$
- $N_x = a f_0 U_x$

в данном случае код, которым является число импульсов  $N_x$ , пропорционален  $U_x$ .

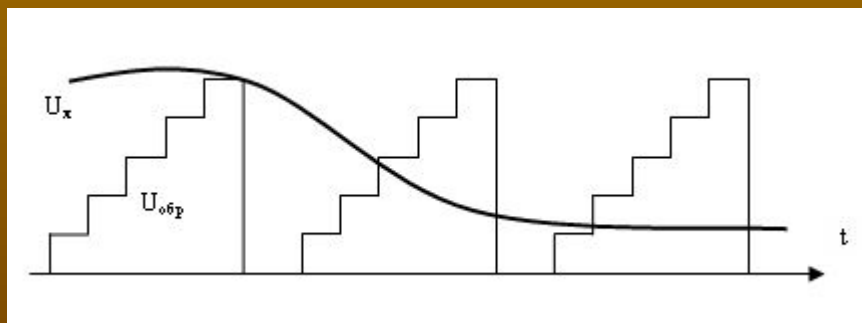


# Кодоимпульсный метод преобразования

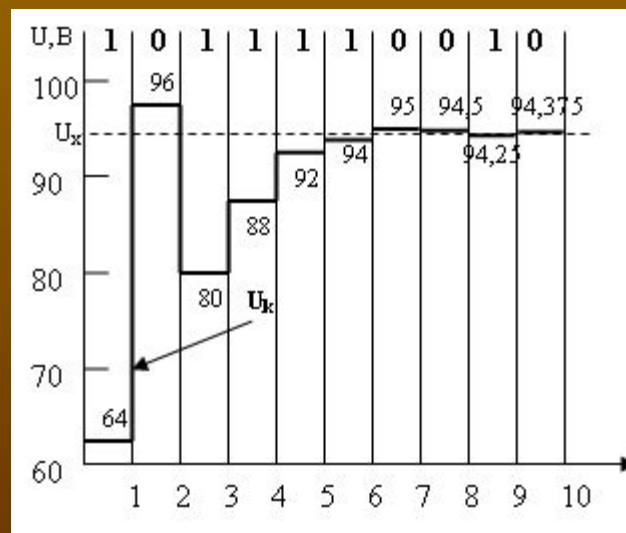
- Основан на сравнении измеряемой величины, например, напряжения  $U_x$ , с образцовым компенсирующим напряжением  $U_k$ , изменяющимся скачкообразно по определенному закону
- Этот метод может быть реализован двумя способами.

# Два способа реализации кодоимпульсного метода

- Способ ступенчатого изменения  $U_k$  заключается в сравнении измеряемого напряжения  $U_x$  с рядом последовательно возрастающих (или убывающих) образцовых напряжений

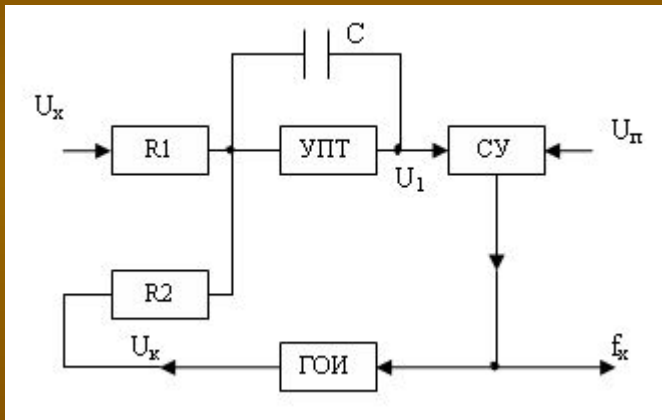


- Способ взвешивания основан на использовании преобразователей поразрядного кодирования, в которых измеряемое напряжение последовательно сравнивается с некоторой суммой образцовых напряжений



# Метод прямого преобразования аналоговой величины в число импульсов

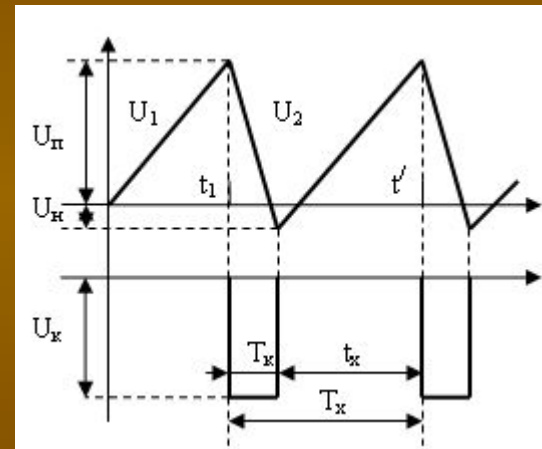
- В схеме данного преобразователя используется интегрирующий усилитель постоянного тока УПТ с двумя входами



- При подаче напряжений на оба входа осуществляется интегрирование их алгебраической суммы

То есть частота  $f_x$  линейно связана с измеряемым напряжением

- $T_k + t_x = T_x$  – период повторения процесса нарастания и спада выходного напряжения при  $U_x = const$



$$T_k + t_x = \frac{U_k T_k R_1}{R_2 U_x} \quad f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{R_2}{U_k T_k R_1} U_x = k U_x$$