

- ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
 - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
 - ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
 - КРАСНОЯРСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
 - кафедра «Системы обеспечения движения»
 - по дисциплине «**Электрические измерения**»
 - Презентации лекций
 - **Красноярск 2020**
- 

ТЕМА 1. 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 измерений 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

О погрешностях измерения

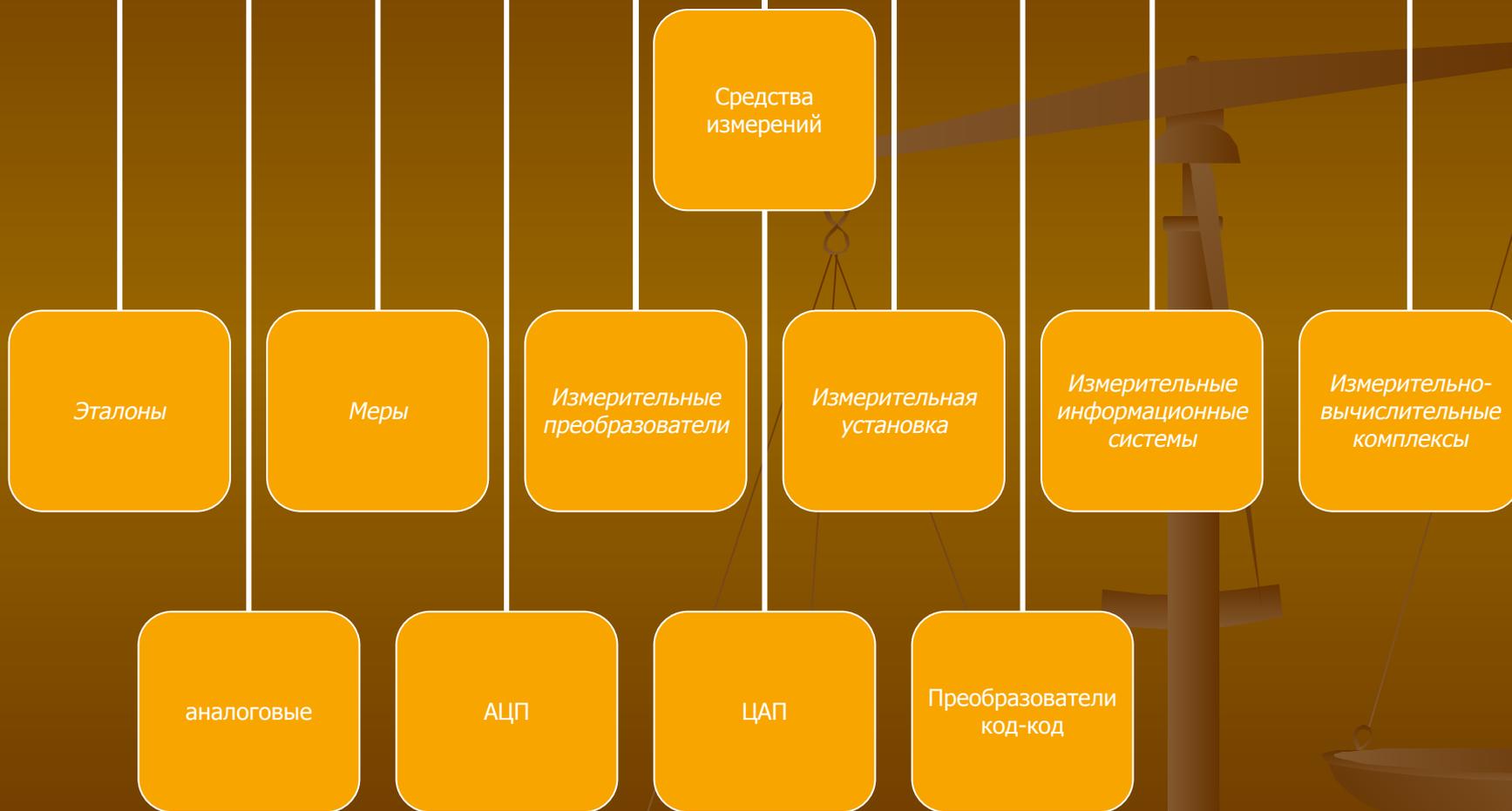
- Погрешность это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины
- По форме погрешности делят на абсолютную и относительную

$$\Delta = A - A_{\text{ист}}$$

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

ТЕМА 2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

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

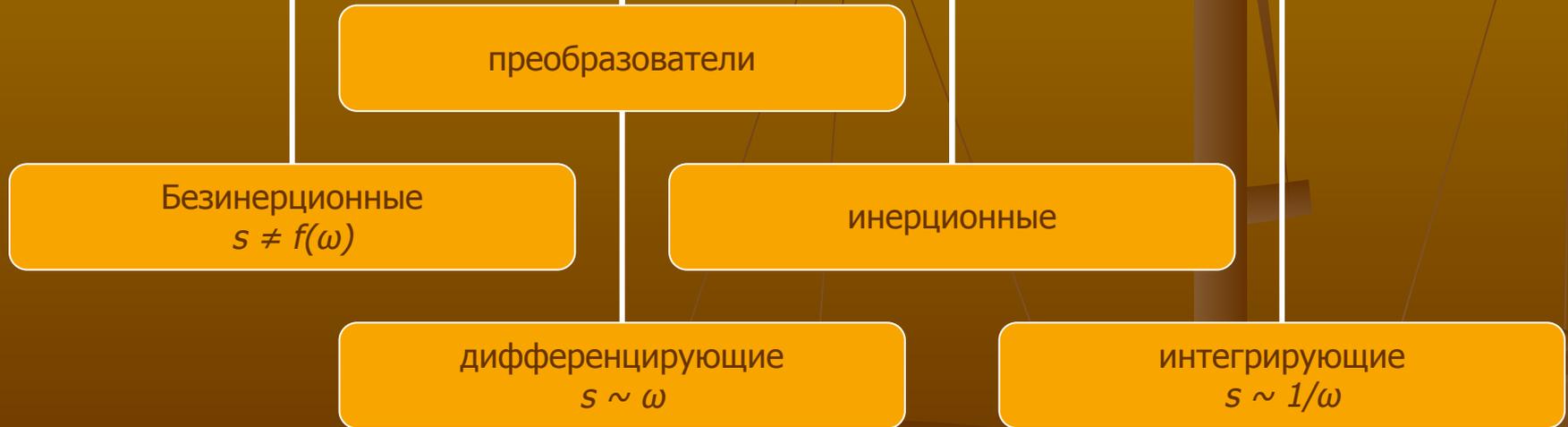


3.1. Статические характеристики и параметры СИ

- **Уравнением преобразования** называют однозначную функциональную зависимость между выходной величиной y и входной величиной x , 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

3.2. 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



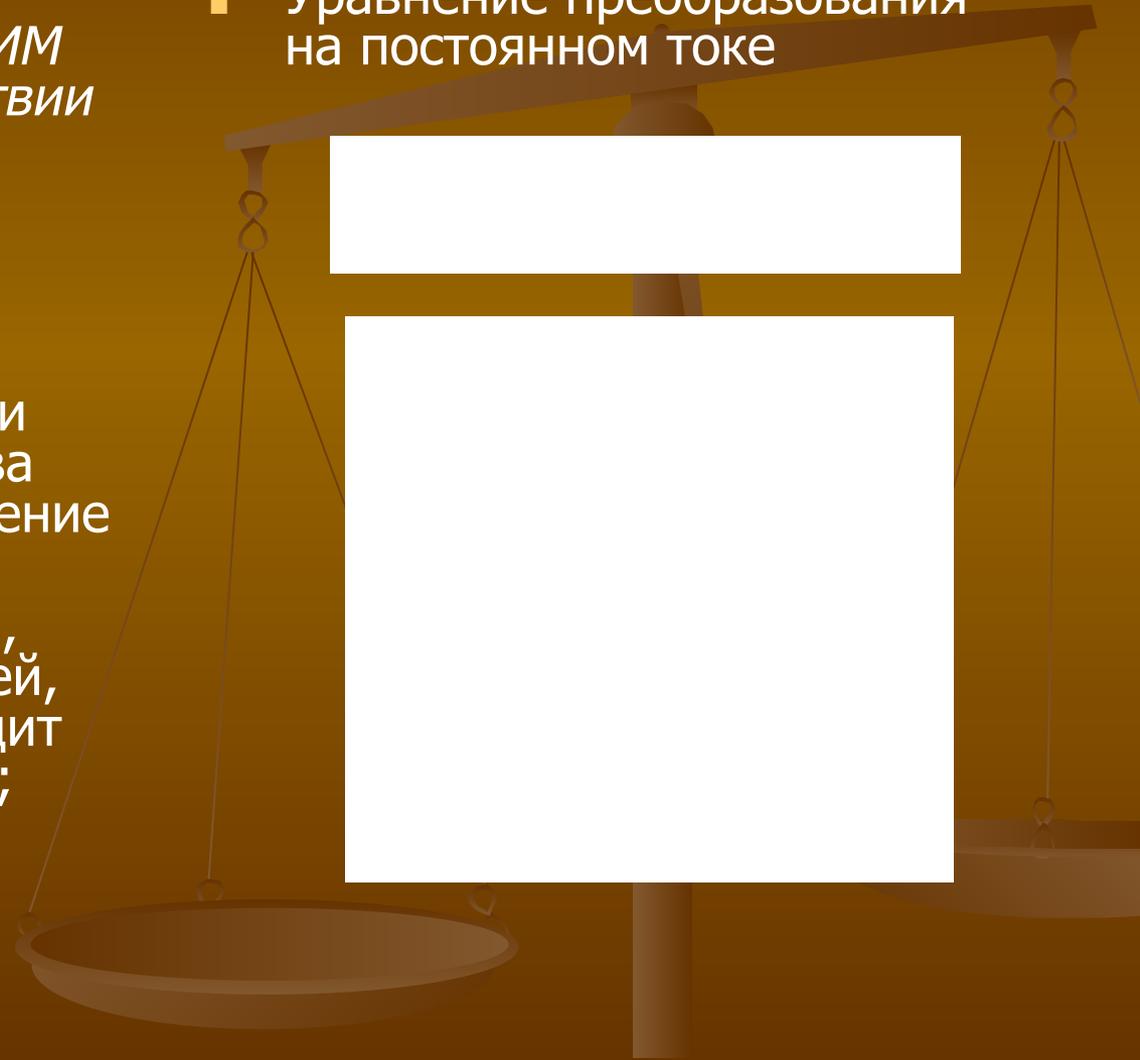
Электродинамический измерительный механизм

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;

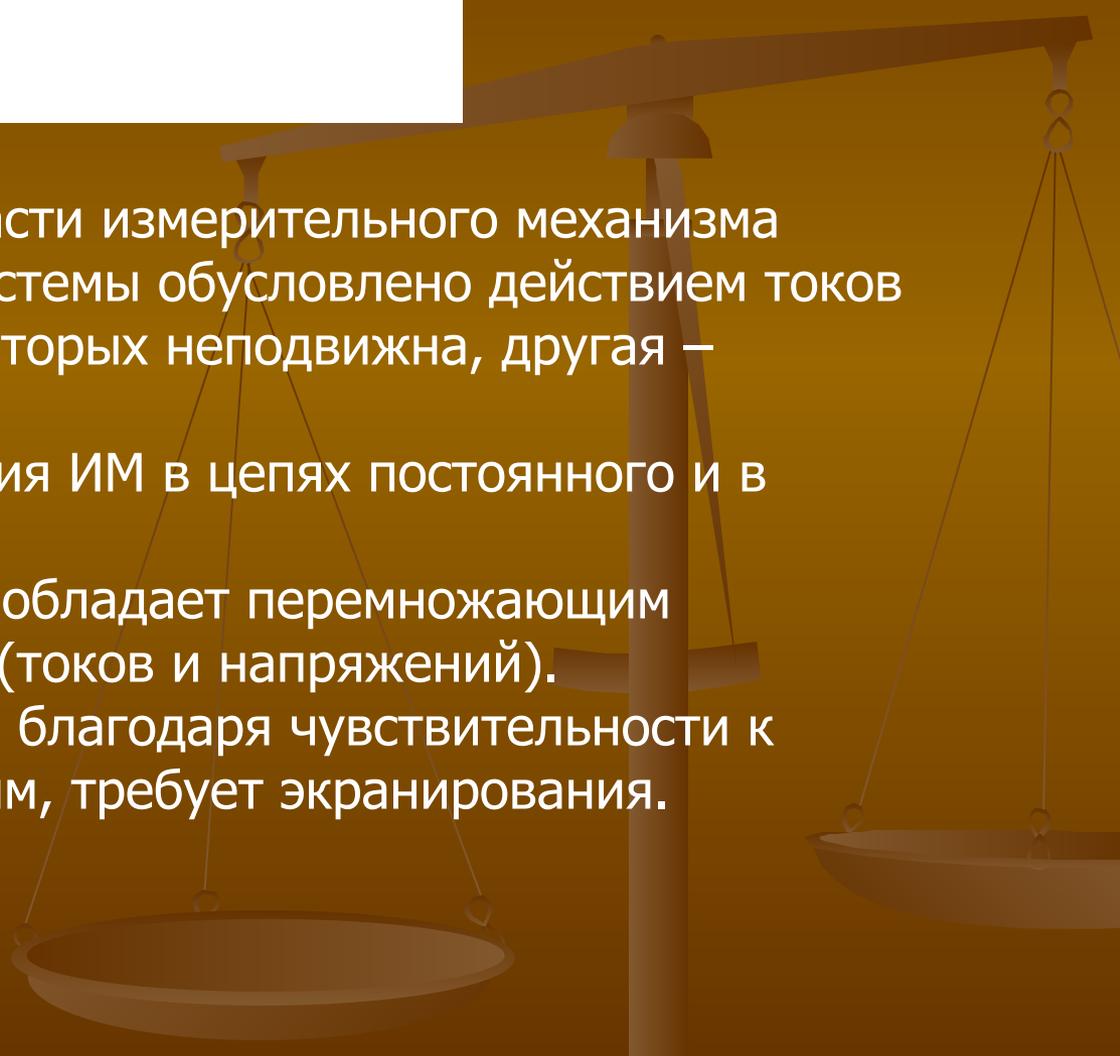
- Уравнение преобразования на постоянном токе



Уравнение преобразования электродинамического ИМ на переменном токе

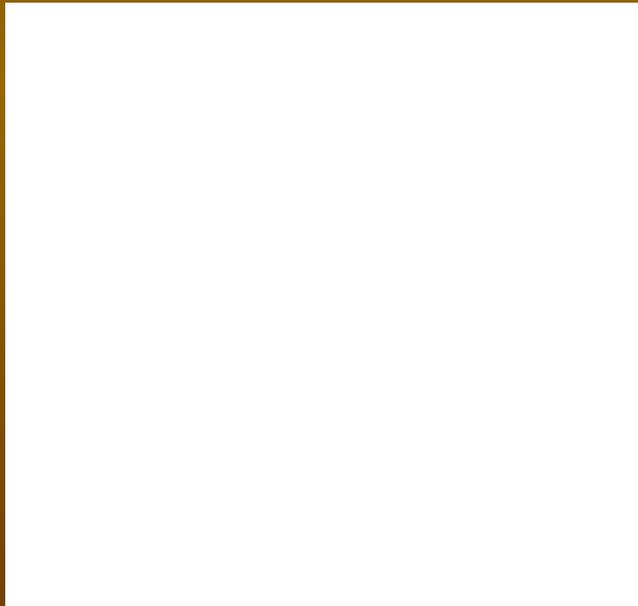


- Отклонение подвижной части измерительного механизма электродинамической системы обусловлено действием токов двух катушек, одна из которых неподвижна, другая — подвижна.
- Возможность использования ИМ в цепях постоянного и в цепях переменного тока.
- Измерительный механизм обладает перемножающим свойством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



Магнитоэлектрический измерительный механизм

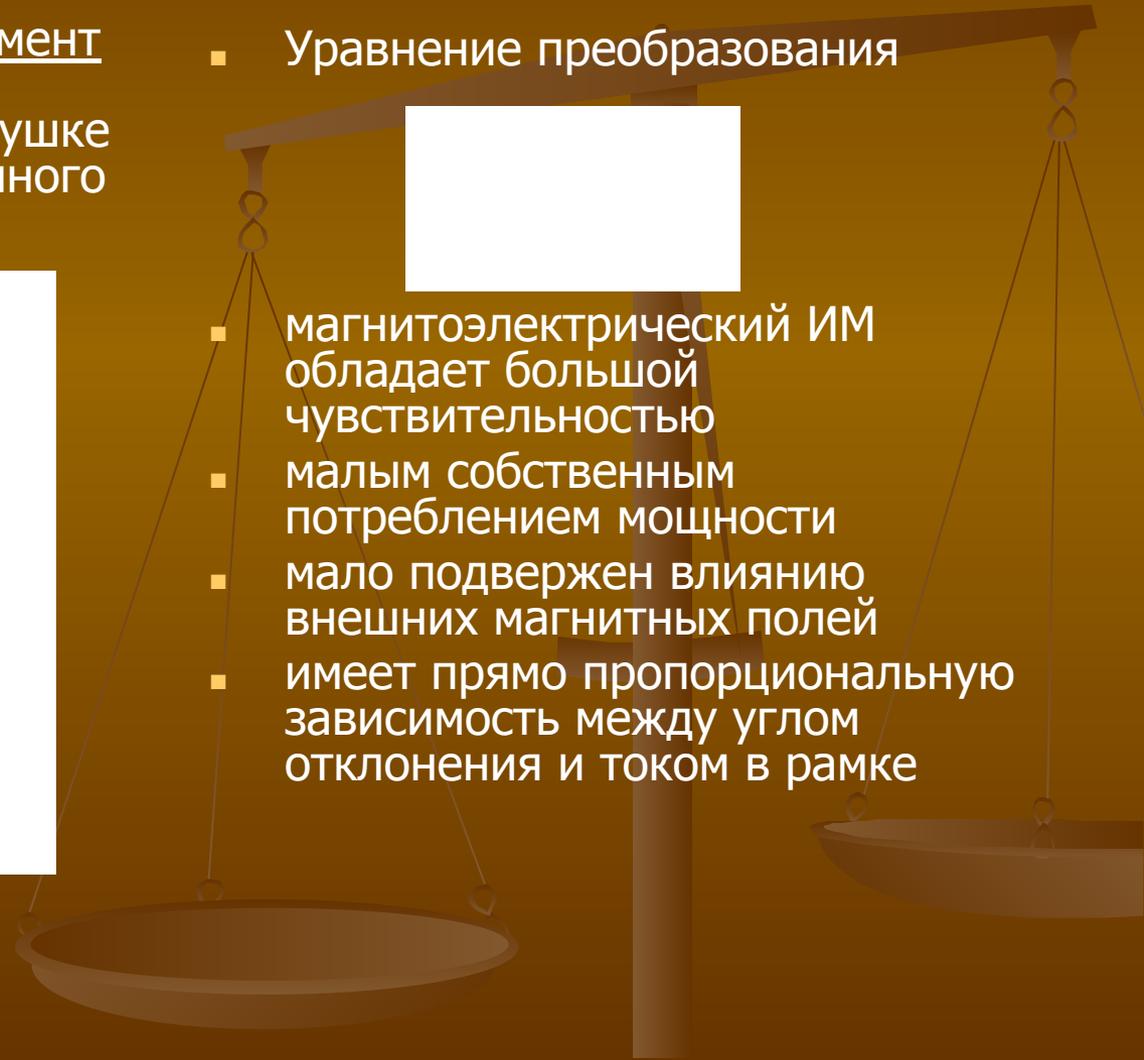
- В магнитоэлектрическом механизме вращающий момент возникает в результате взаимодействия тока в катушке и магнитного поля постоянного магнита



- Уравнение преобразования



- 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

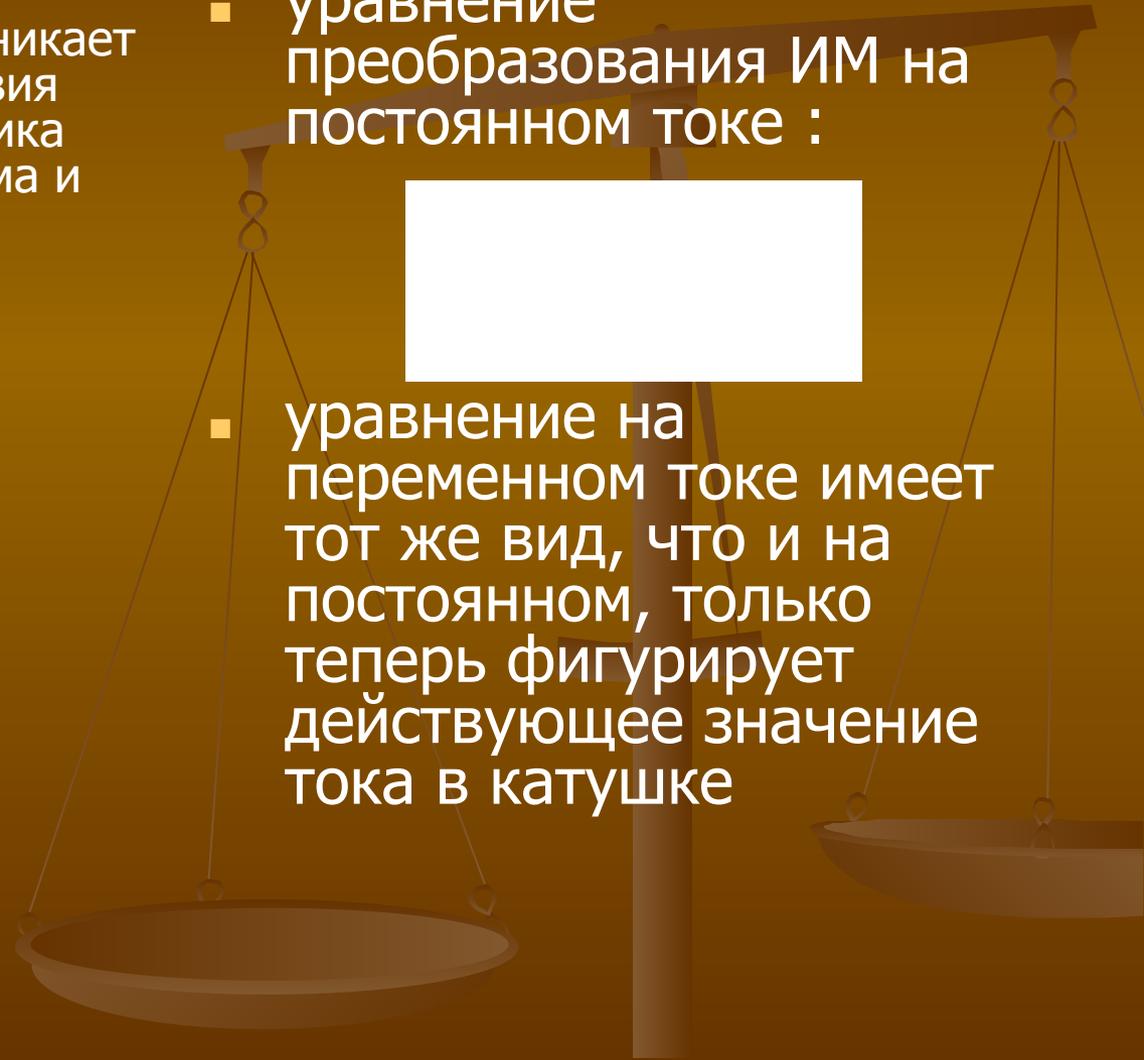
- Вращающий момент в электромагнитном ИМ возникает в результате взаимодействия ферромагнитного сердечника подвижной части механизма и магнитного поля плоской катушки с током



- уравнение преобразования ИМ на постоянном токе :

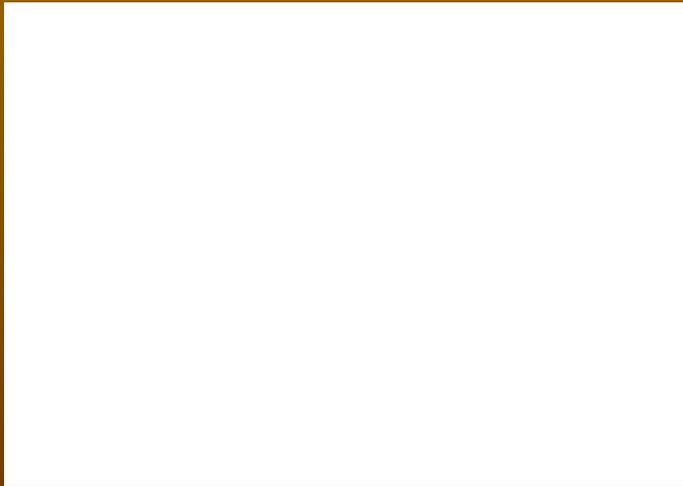


- уравнение на переменном токе имеет тот же вид, что и на постоянном, только теперь фигурирует действующее значение тока в катушке



Электростатический измерительный механизм

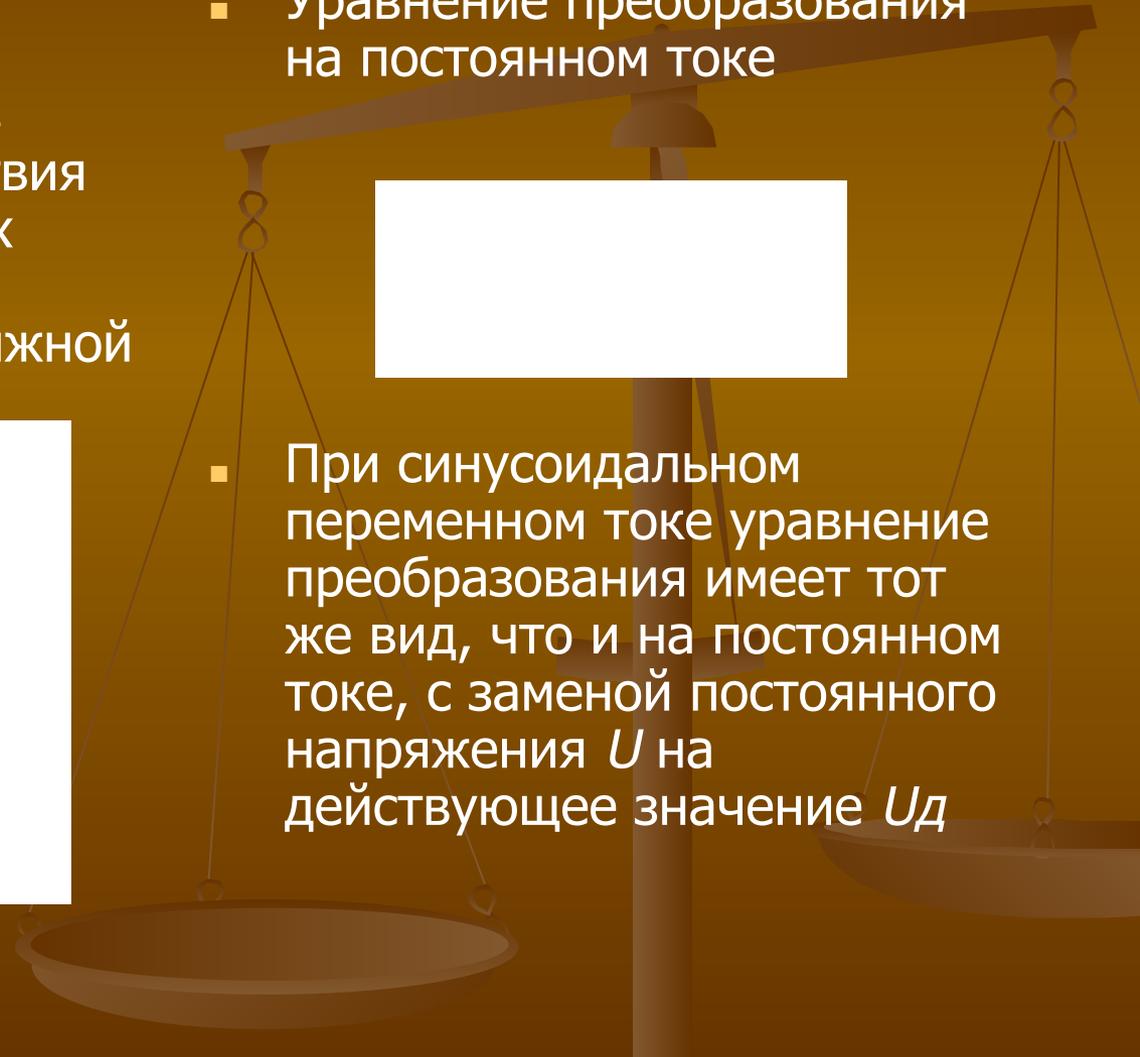
- Вращающий момент в электростатических механизмах возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых является подвижной



- Уравнение преобразования на постоянном токе



- 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 α .
- 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

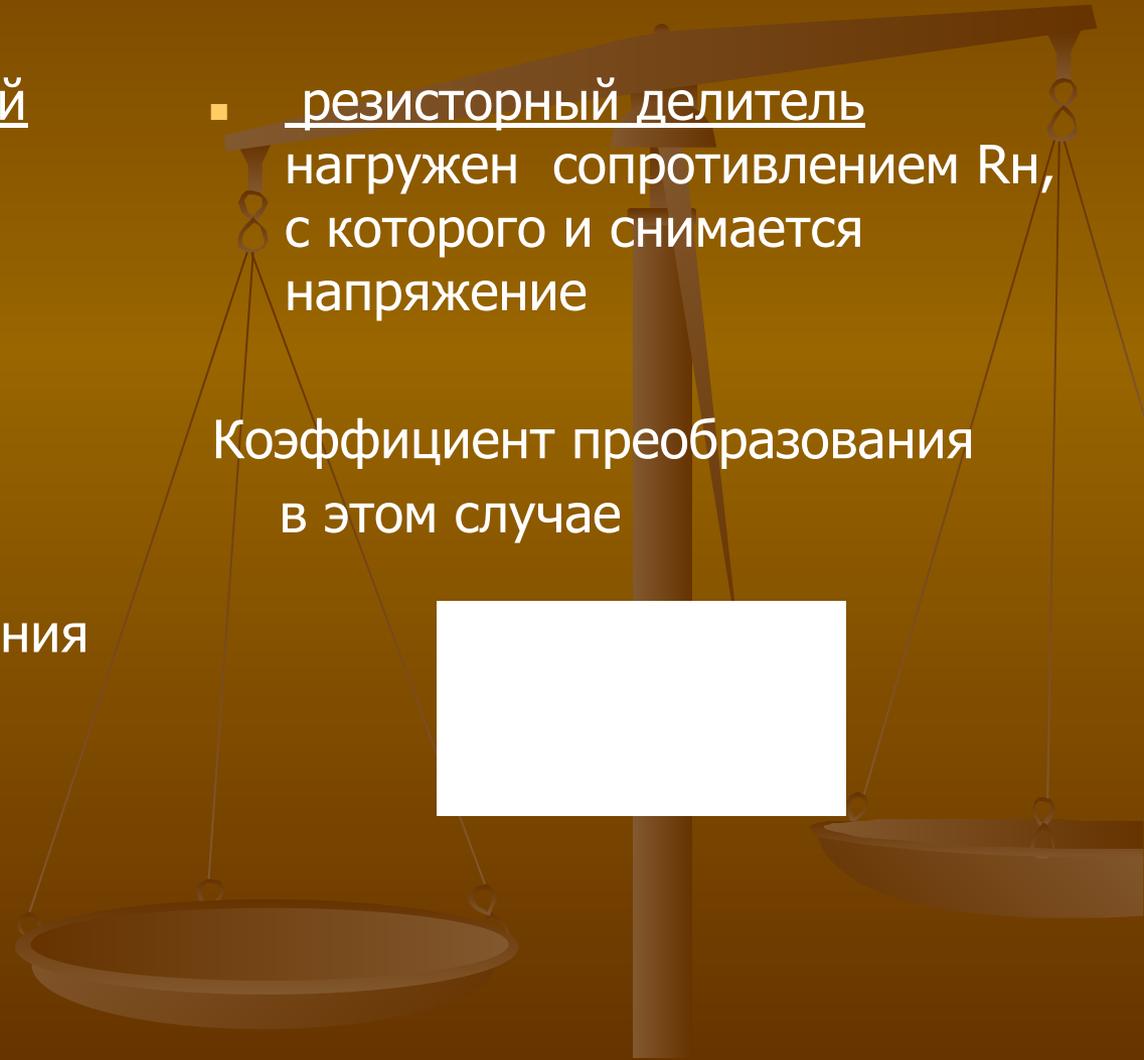


Коэффициент преобразования



- резисторный делитель нагружен сопротивлением R_n , с которого и снимается напряжение

Коэффициент преобразования
в этом случае



Делители напряжения на переменном токе

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



- 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



- пределе низких частот



- 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



- МДС в сердечнике



- 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 δ обусловлено наличием гистерезиса и вихревых токов в сердечнике (или другими словами потерями в сердечнике)
- Видно, что токи и не совпадают по фазе на угол δI , который, таким образом, определяет угловую погрешность преобразования

Основные соотношения, полученные с помощью диаграммы

- Ток в первичной обмотке

[Redacted]

[Redacted]

- Действительный коэффициент трансформации

[Redacted]

- Токовая погрешность

[Redacted]

- Угловая погрешность

[Redacted]

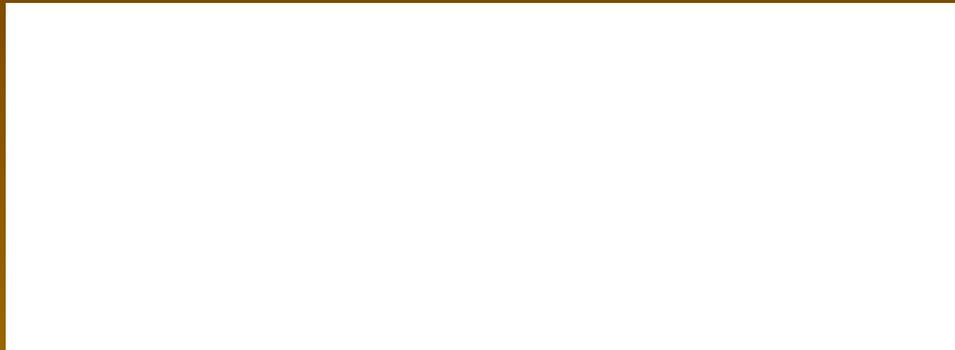
[Redacted]

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 Φ_{σ} 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 ψ_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)

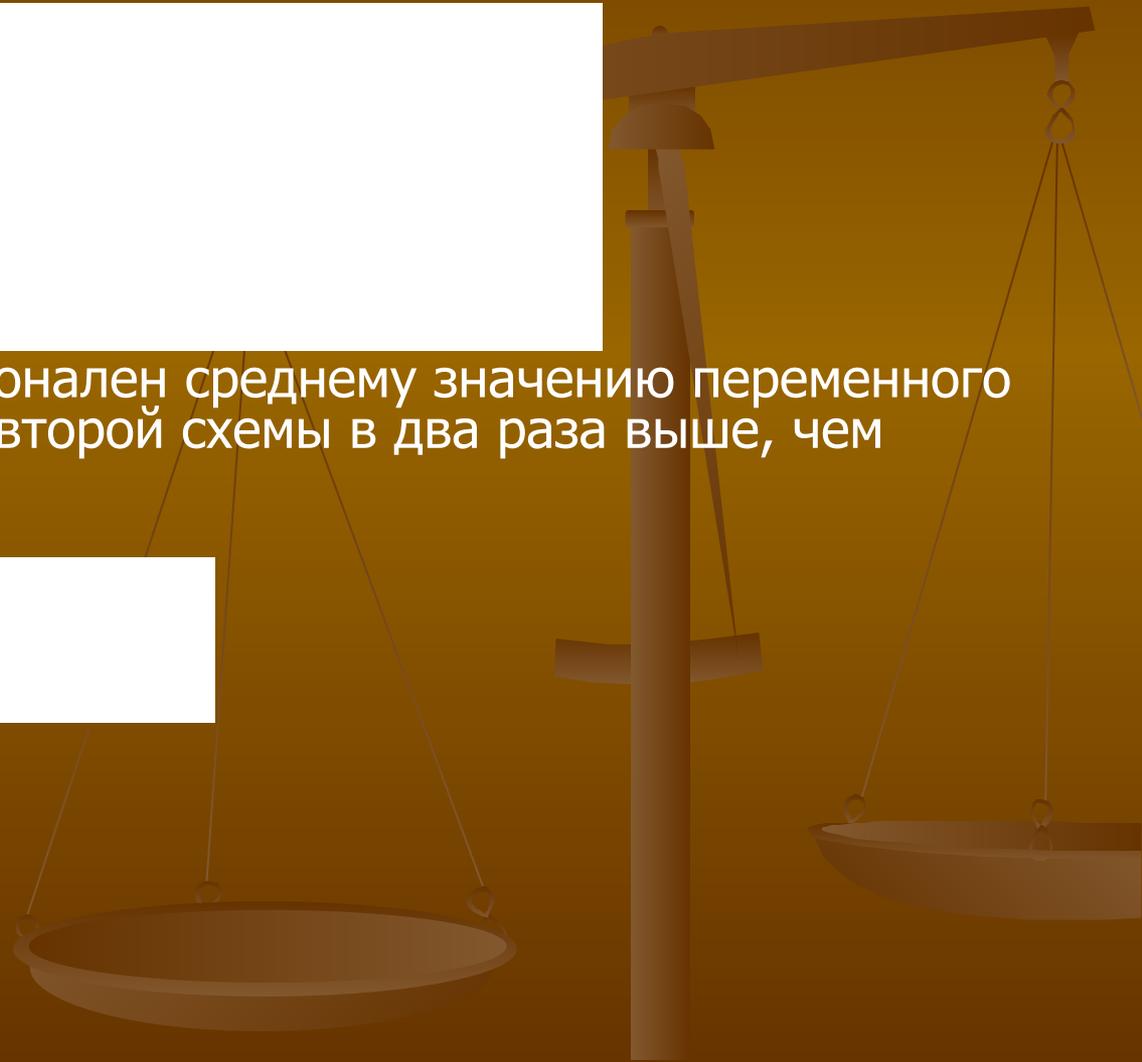


- Отсчет по ИМ пропорционален среднему значению переменного тока, чувствительность второй схемы в два раза выше, чем первой

- а)



- б)



Измерительные выпрямители максимального значения

- Если постоянная времени $R_n C \gg T$, где T период напряжения U_x , то на R_n 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 – $\psi=0^\circ$

- При $\psi=90^\circ$

$$I_{\text{ср}}=0.$$

- При произвольном значении ψ



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

$$I_p = E_N / R_y$$

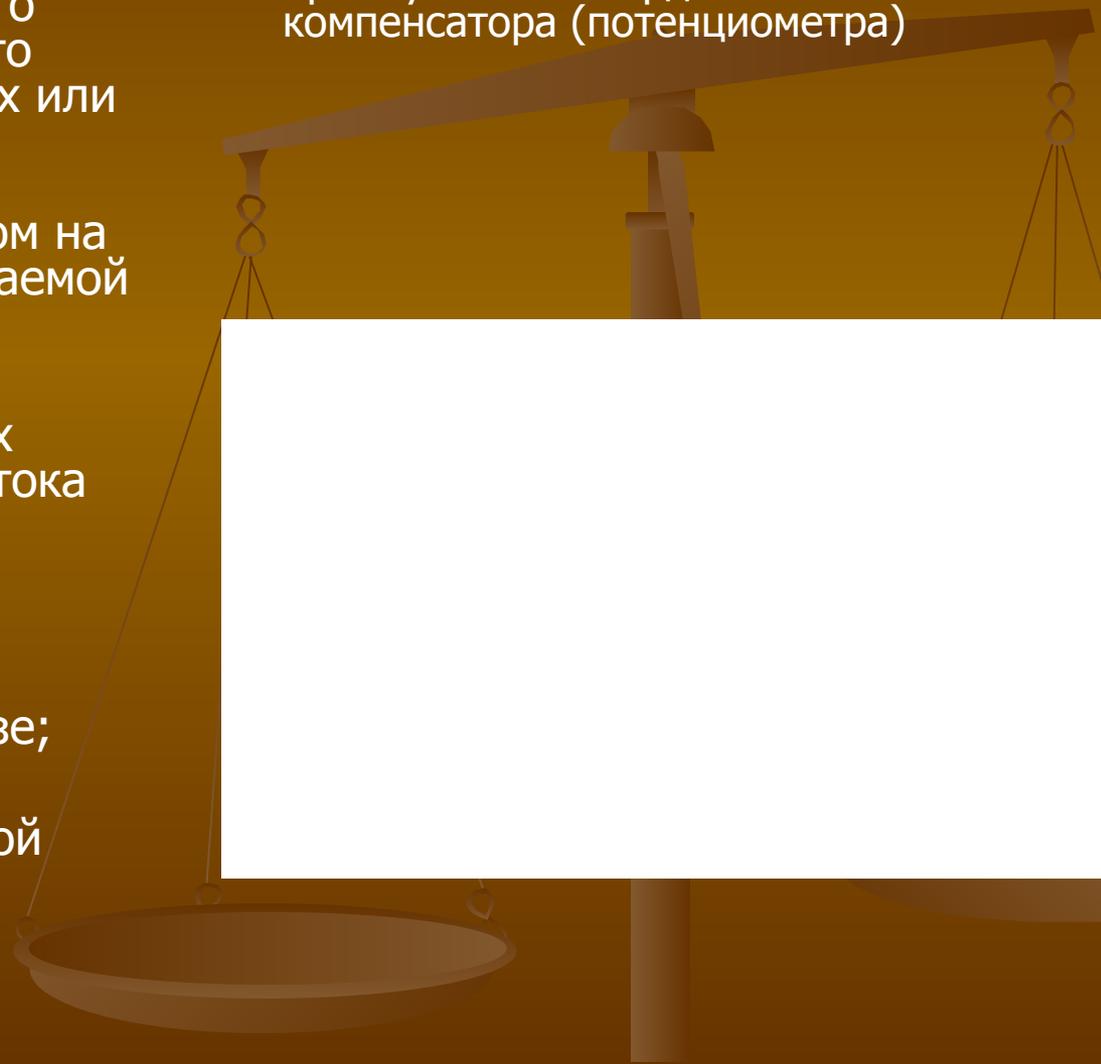
- Функциональная схема компенсатора



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



- схема двойного моста моста



- Измеряемое сопротивление



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

Уравновешенные мосты переменного тока

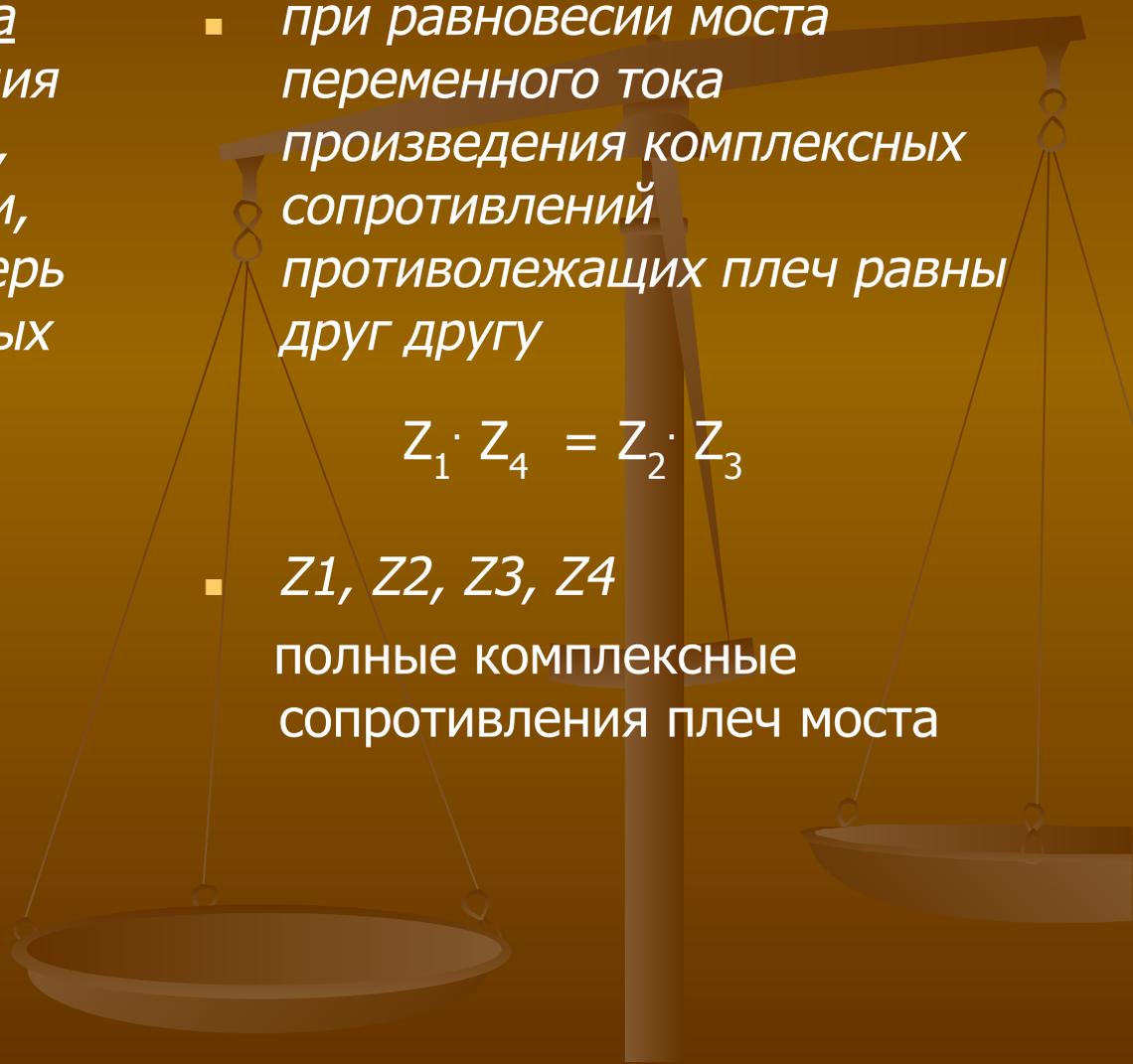
- Мосты переменного тока применяют для измерения емкости, индуктивности, взаимной индуктивности, добротности и угла потерь для электроизоляционных материалов



- 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*:

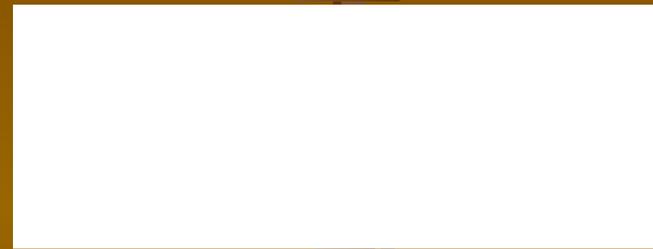


- При синусоидальном изменении u и i , при сдвиге фаз между ними φ , выражение для активной мощности синусоидального тока

$$P = UI \cos \varphi$$

где U и I действующие значения переменного напряжения и тока

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

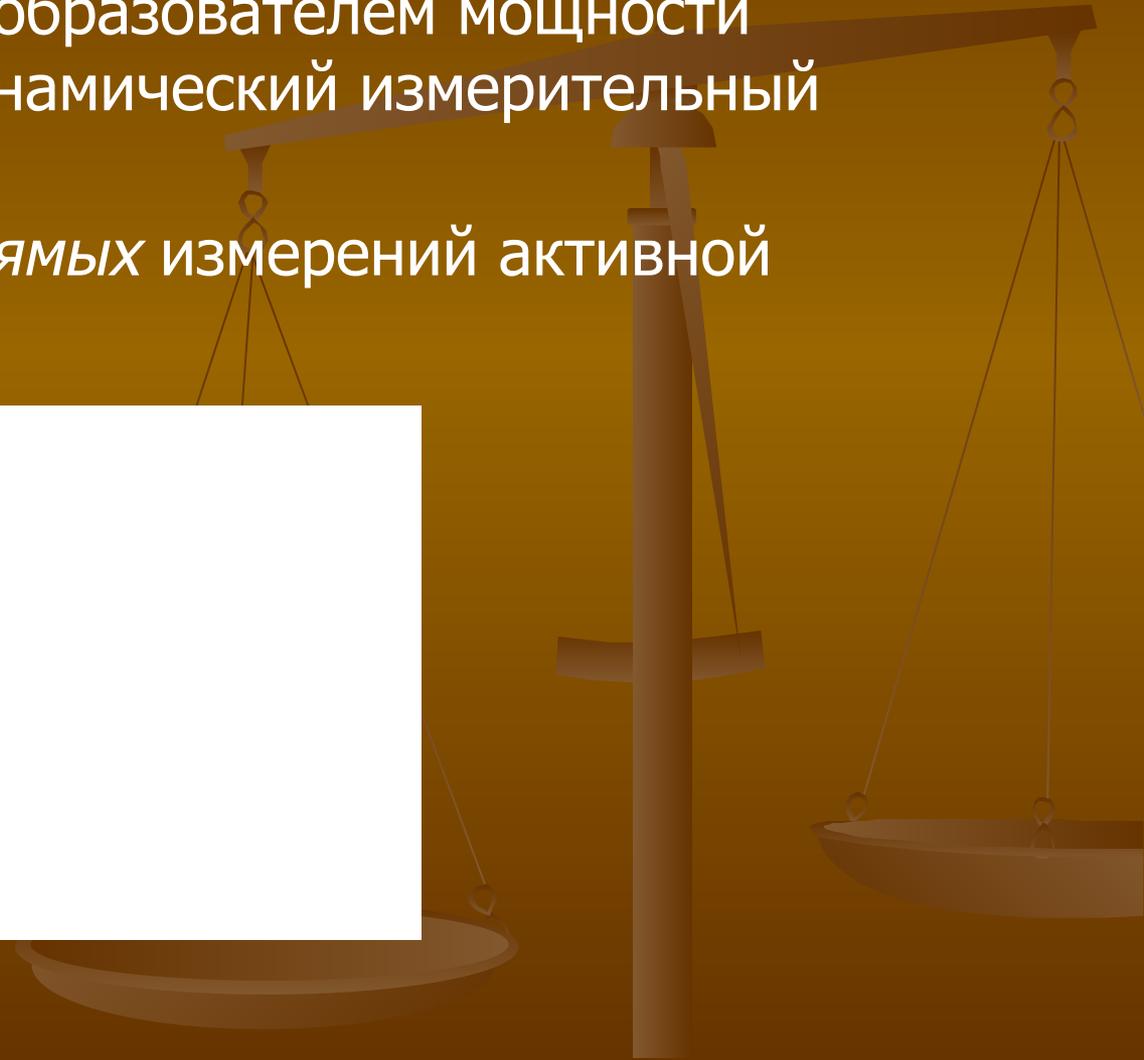
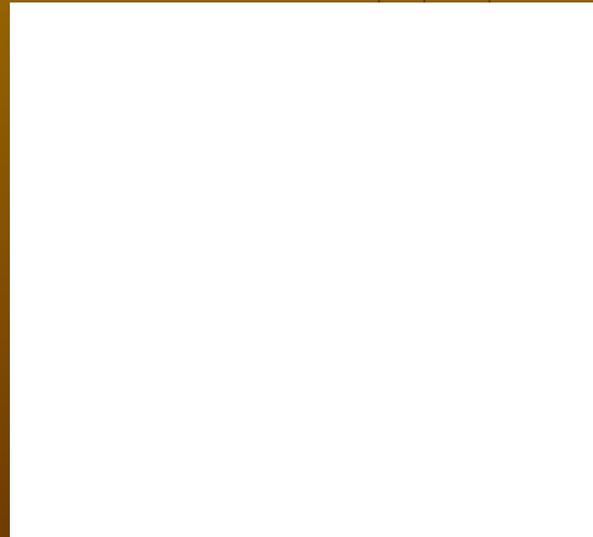


В качестве перемножителей в ваттметрах используют:

- 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

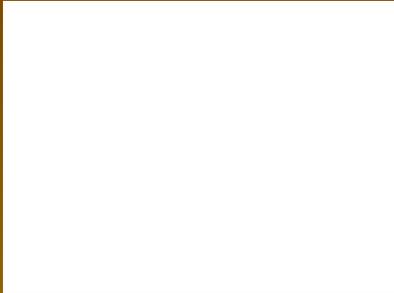
- U_u (сигнал пропорциональный напряжению на нагрузке) в амплитуду импульсов
- U_i (сигнал пропорциональный току в нагрузке) в длительность импульсов
- Площадь каждого из импульсов на выходе АМ пропорциональна мгновенной мощности при условии, что изменением U_i и U_u за период T_0 можно пренебречь
$$s(t)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



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

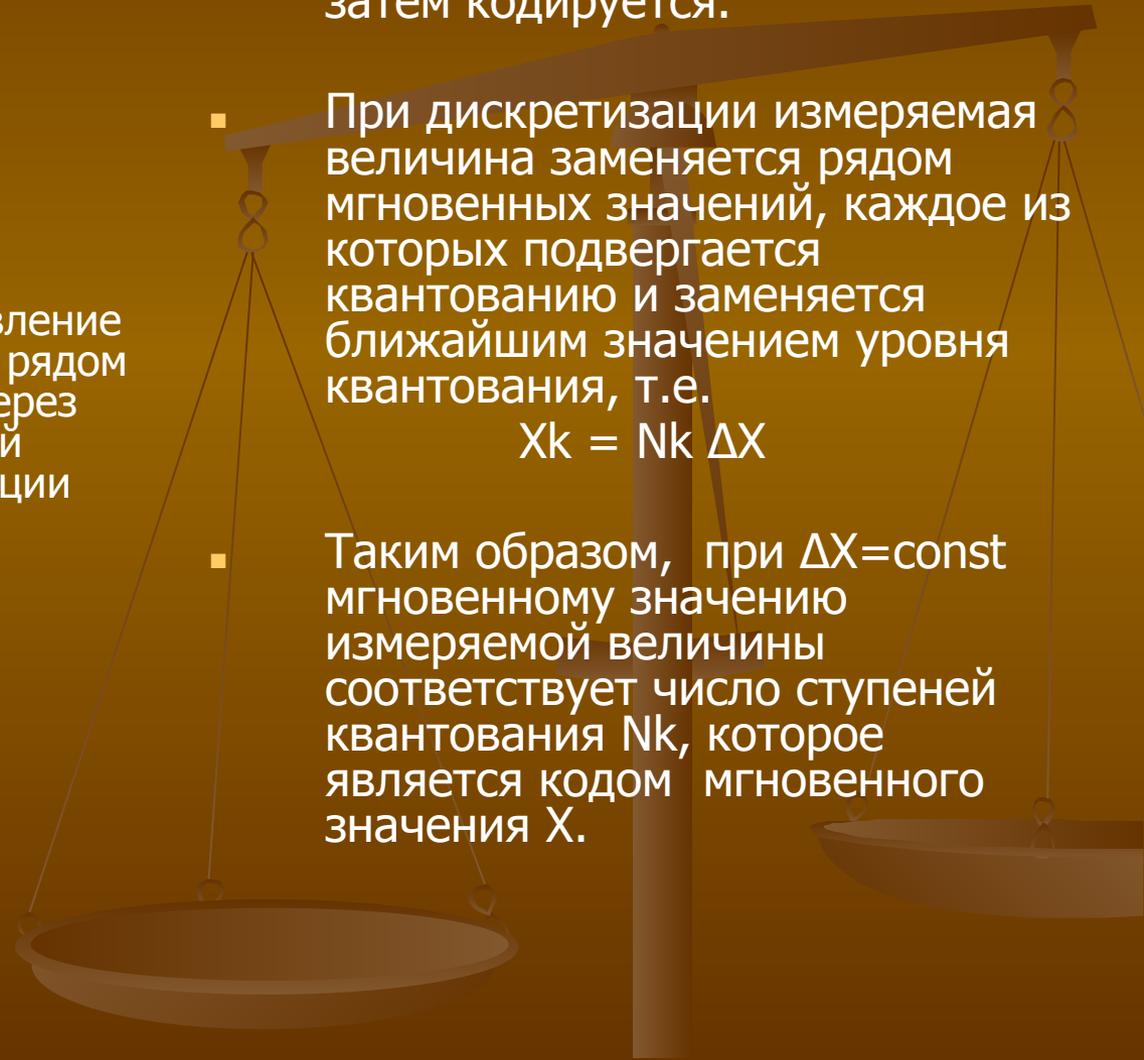


- В АЦП измеряемый сигнал подвергается одновременному квантованию и дискретизации, а затем кодируется.

- 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

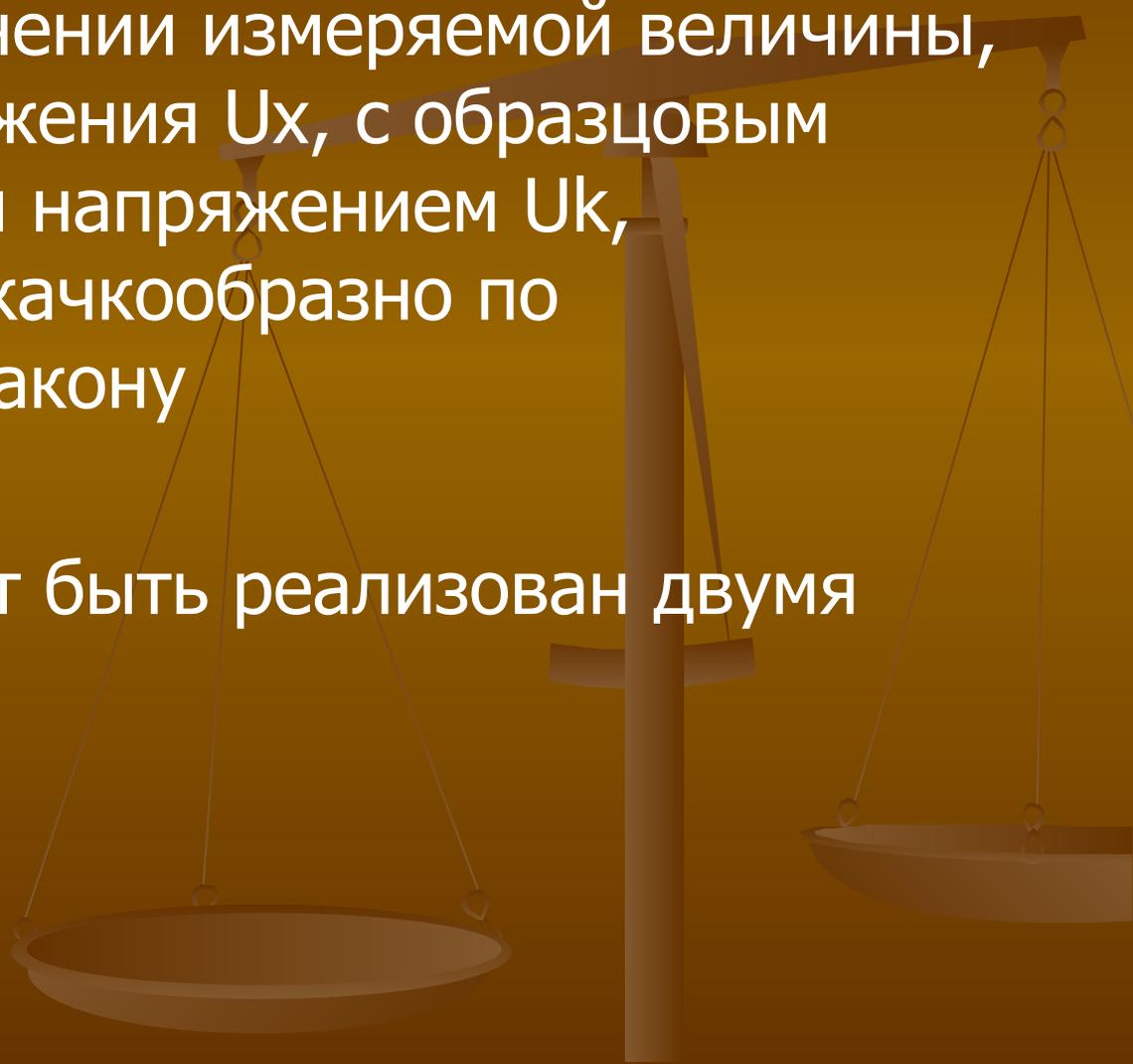
- $T_x = a U_x(t) = a U_x(t)$
- $N_x = f_0 T_x$
- $N_x = a f_0 U_x$

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
Ук 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



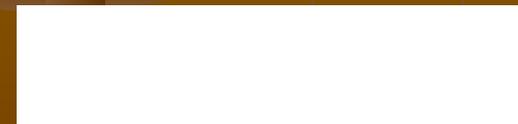
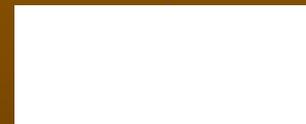
Метод прямого преобразования аналоговой величины в число импульсов

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



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

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



То есть частота f_x линейно связана с измеряемым напряжением