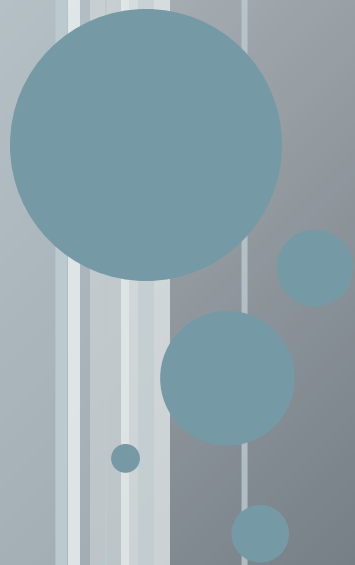


ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА (ИИТ)

***Преподаватель: Саломатин Александр
Федорович***

ЛЕКЦИЯ №1



ИЗМЕРЕНИЕ — НАХОЖДЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ.

Признаки измерения:

- Измерять можно свойства только реально существующих объектов (т.е. физические величины);
- Измерения требуют проведения опытов (экспериментов);
- Для проведения опытов (измерений) требуются специальные технические средства – средства измерений;
- Результатом измерений является нахождение значений физической величины.



- Значение физической величины – это ее количественная оценка. Эта физическая величина должна быть представлена именованным числом.
- Развитие науки неразрывно связано с прогрессом в области измерений. Измерение – один из способов познания. Поэтому большинство научных исследований сопровождаются измерением.

- Основоположник отечественной метрологии – Д.И. Менделеев. Он выразил значение измерения следующим образом: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять», «Точная наука немыслима без меры». А известный английский физик Уильям Кельвин указывал на то, что «каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить»



- В 1932 г. повышение точности измерений плотности воды привело к открытию дейтерия.
- В 1745 г. российский физик Г.В. Рихман создал первый измерительный прибор.



- Понятие физической величины дается в документе РМГ-29-99 – рекомендация по межгосударственной стандартизации.
- Физическая величина (ФВ) – одно из свойств физического объекта.
- Физическая величина – это измеренное свойство физических объектов и процессов, с помощью которых они могут быть изучены.



СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

- Совокупность физических величин, образованных в связи с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются их функциями, называются системой ФВ.
- Системой ФВ в РФ является система СИ (SI – Systeme International). Она принята в 1960 г. Одиннадцатой генеральной конференцией по мерам и весам.
- ГОСТ 8.417-2002 ввел использование в РФ системы СИ.
- ГСИ (государственная система измерений) – совокупность нормативных документов, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единиц измерений в РФ при требуемой точности.
- Главный законодательный акт о системе физических величин – закон РФ «об обеспечении единства измерений» (102-ФЗ от 26.06.2008 г., редакция от 30.11.2011 г.)



СИСТЕМА СИ

Состоит из 7 основных и 2 дополнительных единиц физических величин.

Основные единицы ФВ:

- Длина [м];
- Масса [кг];
- Время [с];
- Сила электрического тока [А];
- Термодинамическая температура [К];
- Количество вещества [моль];
- Сила света [Кд] (Канделла).

Дополнительные единицы ФВ:

- Плоский угол [рад];
- Телесный угол [ср] (стерадиан).



НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

- Метр – расстояние, которое проходит свет за $1/299792458$ секунды в вакууме.
- Килограмм – масса цилиндра из сплава платины и иридия высотой 39,17 мм.
- Частота измеряется в Гц (с^{-1});
- Сила (вес) измеряется в Н ($\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$);
- Мощность измеряется в Вт ($\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$);
- Электрическое напряжение измеряется в В ($\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$).



- Средство измерения – техническое устройство, используемое в измерительном эксперименте и имеющее нормированные характеристики точности.



ПОГРЕШНОСТИ

- Результат измерений всегда отличается от истинной величины.
- При измерении возникает погрешность из-за ряда факторов:
 - Несовершенство способов измерения средств;
 - Несовершенство измерительных средств;
 - Влияние окружающей среды;
 - Несовершенство самого человека.



АБСОЛЮТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ

- Абсолютная погрешность – разность между измеренной и истинной величиной.
- $\Delta x = x - X_{\text{И}}$

Где x – измеренная величина;

$X_{\text{И}}$ - истинная величина.



- При определении погрешности находится не сама погрешность, а ее границы. Границы можно оценить, зная класс точности прибора.
- Класс точности – обобщенная характеристика средств измерений, определяющая пределы основных и дополнительных погрешностей. Класс точности не является непосредственным показателем точности измерений.
- Точность прибора – понятие, обратное погрешности.



МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (МХ)

- Метрологические характеристики – те характеристики средств измерений, которые определяют точность замеров с помощью средств измерений.
- Они обязательно нормированы для обеспечения единства измерений.
- Отличительной особенностью МХ является наличие нормирующих величин. Обычно под нормирующей величиной понимается предел измерения прибора.



ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ

○ Относительная погрешность = $\frac{\text{абсолютная погрешность}}{\text{нормирующая величина}}$

○ Рассмотрим пример:

$$I_{\text{ИСТ}} = 1,1 \text{ А}; I_{\text{ИЗМ}} = 1 \text{ А};$$

$$\Delta I = 1,1 \text{ А} - 1 \text{ А} = 0,1 \text{ А (абсолютная);}$$

$$\delta I = 0,1 \text{ А} / 1 \text{ А} = 0,1 \text{ о.е (относительная).}$$

○ Обычно под нормирующей величиной понимается предел измерений прибора.



The left side of the slide features a series of vertical stripes in various shades of blue and grey, ranging from dark to light. To the right of these stripes, there are several overlapping circles of different sizes, also in shades of blue and grey, creating a modern, abstract design.

ЛЕКЦИЯ №2

ПЕРЕЧИСЛИМ ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- 1) Функция преобразования - зависимость выходного параметра от входного параметра средств измерений.

$$\Pi_{\text{ВЫХ}} = f(\Pi_{\text{ВХ}})$$

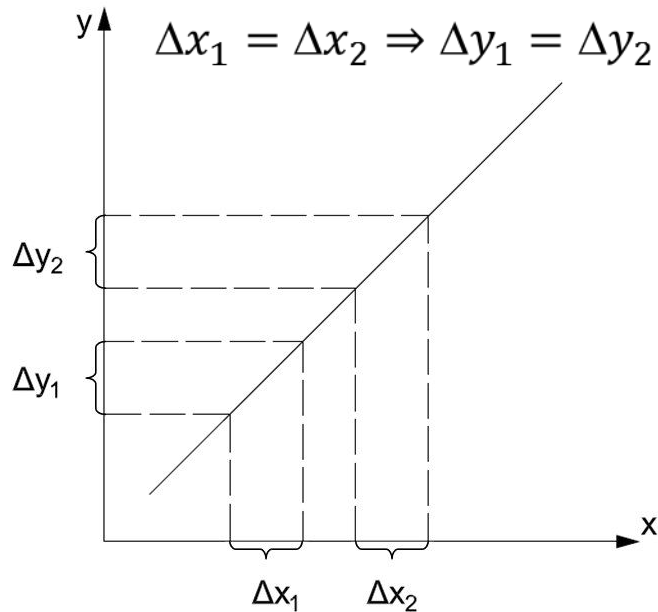
- 2) Чувствительность – отношение приращения выходного сигнала к приращению входного сигнала.

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

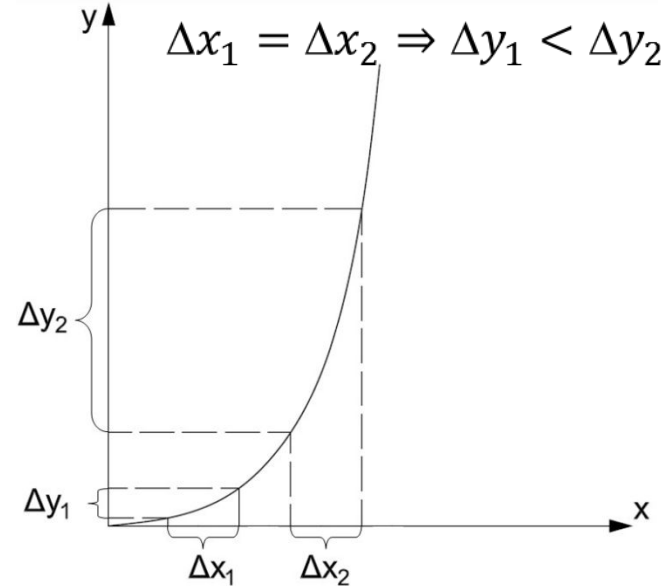
Чувствительность показывает на сколько будет отклоняться стрелка прибора при изменении входного сигнала.

- Если функция преобразования линейна, то чувствительность постоянна ($S = \text{const}$). При нелинейной функции преобразования чувствительность меняется при изменении входной величины.

□ Линейная



□ Нелинейная



- Приборы, имеющие линейную функцию преобразования, имеют линейную шкалу. Линейная шкала – шкала, в которой длина делений одинакова в начальной и конечной части. Она характерна для магнито-электрических приборов, у электромагнитных шкала нелинейная.

3) Постоянная прибора (С) – величина, обратная чувствительности.

$$C = \frac{1}{S}$$

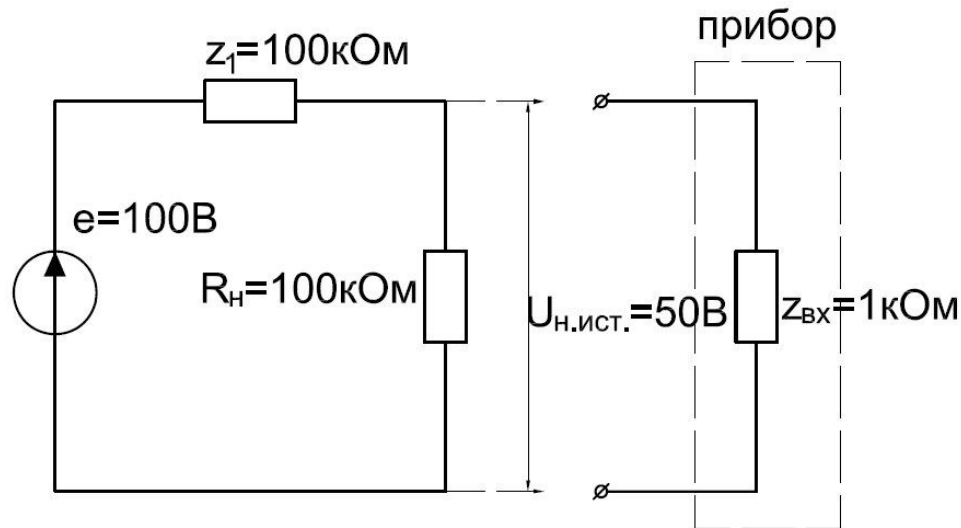
4) Деления шкалы – участки шкалы, на которые она делится с помощью меток.

5) Порог чувствительности прибора – минимальное значение входной величины, которое можно обнаружить с помощью данного средства измерения.

6) Диапазон измерений – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допустимые погрешности измерений. Он имеет минимальное и максимальное значения. У линейной шкалы минимальное значение 0, у нелинейной может быть и не 0. Для снижения погрешностей вводятся поддиапазоны измерений. При переходе от одного поддиапазона к другому могут меняться погрешности.



7) Полное входное сопротивление



$$U_{\text{н.изм.}} = \frac{E}{R_1 + R_{\text{ЭКВ}}} \times R_{\text{ЭКВ}} = \frac{100}{100 + 1} \times 1 \approx 1 \text{ В}$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_H \parallel z_{\text{ВХ}} \approx 1 \text{ кОм}$$

$$\Delta U = U_{\text{изм}} - U_{\text{ист}} = 1 - 50 = 49 \text{ В}$$

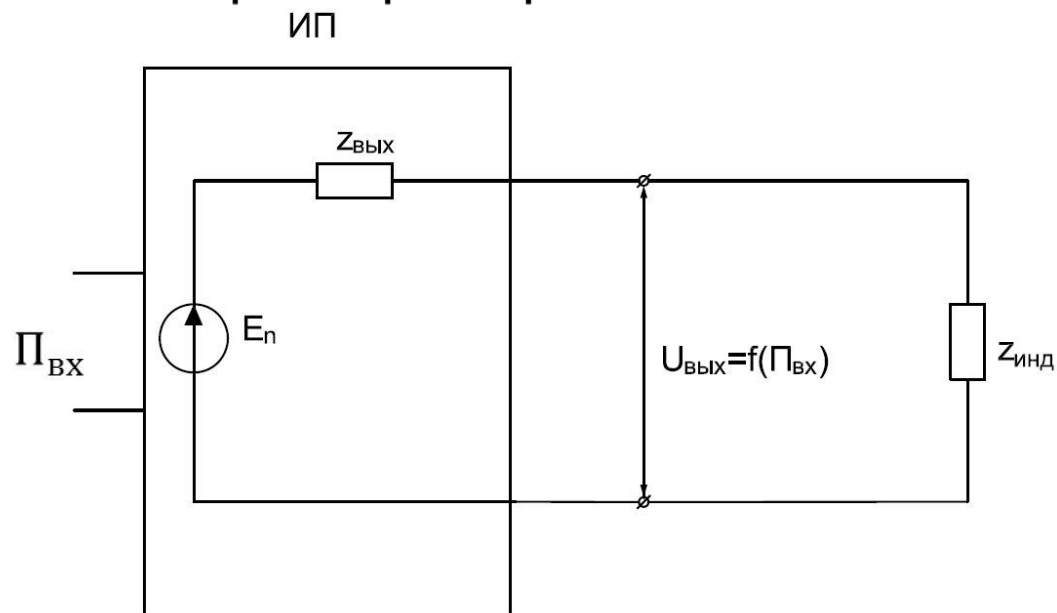
$$\delta = \frac{\Delta U}{U_{(\text{изм.})\text{ист.}}} * 100\% = \frac{49 * 100}{1} = 4900\%$$

Чем больше $z_{\text{ВХ}}$ вольтметра, тем больше вольтметр приближается к идеальному. Входное сопротивление идеального вольтметра стремится к бесконечности.

8) Выходное сопротивление

Представляет интерес для измерительных преобразований.

Рассмотрим пример:



При холостом ходе $U_{\text{ВЫХ}} = E_{\Pi}$

Нагрузочный режим: $U_{\text{ВЫХ}} = \frac{E_{\Pi}}{Z_{\text{ВЫХ}} + Z_{\text{ИНД}}} * Z_{\text{ИНД}}$

Чем меньше $Z_{\text{ВЫХ}}$, тем погрешность меньше.



9) Погрешность

Отражается в трех основных видах (типах):

а) абсолютная

$$\Delta x = x_{\text{изм.}} - x_{\text{ист.}}$$

Измеряется в единицах измеряемой величины.

б) приведенная

При этом абсолютная погрешность приводится к нормирующей величине.

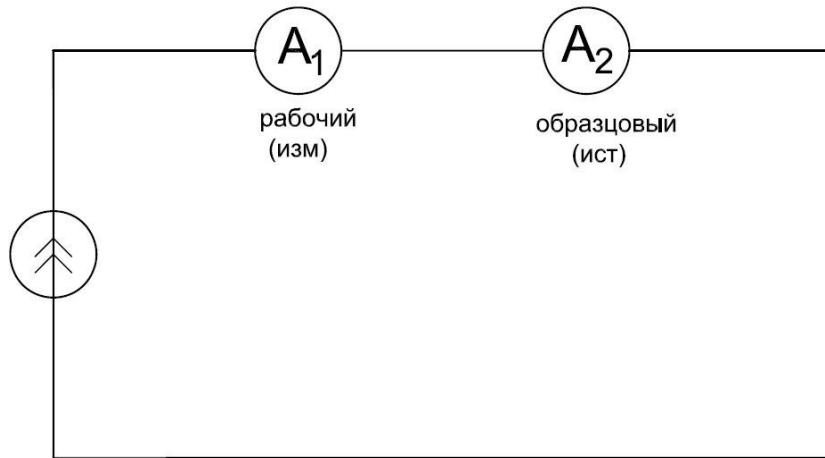
$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_{\text{н}}} * 100\%$$

в) относительная

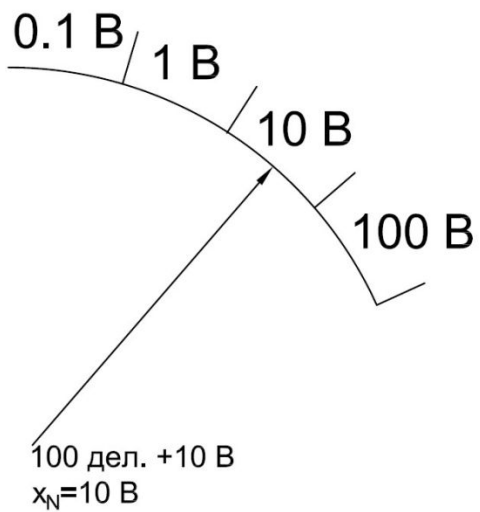
$$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\text{ист}}} * 100\% \approx \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} * 100\%$$



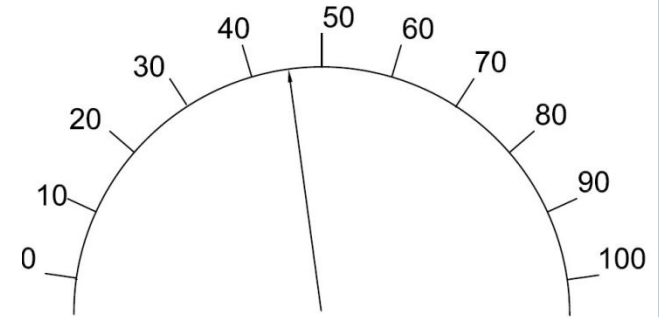
- Проверка означает, что показания опытов должны сравниваться с показаниями идеальных приборов.



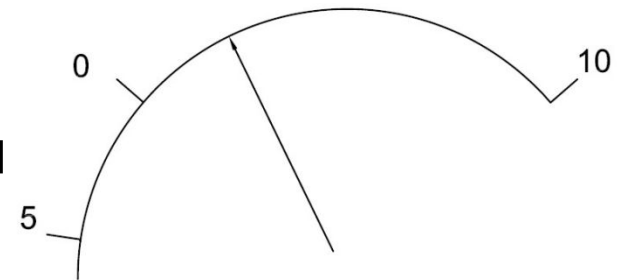
- Класс точности образцового прибора может отличаться от класса точности рабочего не более чем на 4 ступени шкалы.
- $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$ ($n = 0, \pm 1, -2$).
- Для большинства приборов класс точности задается в виде приведенной погрешности. Также он может быть задан в виде допустимой абсолютной погрешности $\Delta x = \pm (a + bx)$.



- Для приборов с равномерной и степенной шкалой, когда нулевая отметка находится по краю диапазона, за нормирующую величину принимается предел измерений используемого диапазона.



- Если нулевая отметка расположена внутри диапазона, то за нормирующую величину принимается больший из поддиапазонов, а для электроизмерительных приборов допускается в качестве нормирующей величины использовать сумму модулей пределов двух диапазонов.



- ⦿ Если шкала неравномерная, под нормирующей величиной принимается длина шкалы в мм ($x_H = L_{\text{ШК}}$ [мм]). Обозначается \surd^{10} .

Пример: омметр.

- ⦿ ② означает, что класс точности задаётся в виде относительной погрешности.
- ⦿ $\Delta x = [c + d * (\frac{x_k}{x} - 1)]$ означает, что класс точности задается в виде абсолютной погрешности, если она зависит от измеряемой величины.
- ⦿ x_k - конечное значение измеряемого диапазона.

Пример: отечественные цифровые измерительные приборы (c/d).



The left side of the slide features a decorative vertical band with several thin, parallel lines in shades of light blue and white. To the right of these lines are five circles of varying sizes, also in shades of light blue, arranged in a descending, staggered pattern.

ЛЕКЦИЯ №3

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

- Методическая погрешность

Возникает из-за недостаточных знаний об объекте измерений, допущений при выводе применяемых формул, влияния измерительного прибора на объект измерений.

- Инструментальная погрешность

Возникает из-за несовершенства средств измерений.

- Субъективная погрешность

Возникает из-за индивидуальных свойств человека.

- Погрешность вычислений

Возникает из-за неточностей вычислений при косвенных, совместных и совокупных измерениях.



В целом погрешности можно сгруппировать на систематические и случайные.

Систематические постоянны от измерения к измерению (пример: методические и инструментальные).

Случайные возникают случайным образом из-за влияния внешней среды.

Также погрешности можно сгруппировать на основные и дополнительные.

Основная погрешность возникает под влиянием окружающей среды, а дополнительная возникает из-за нарушения нормальных условий. Может выражаться следующим образом: $\sqrt{2}$. Например, для приборов, имеющих неравномерную шкалу. При этом за нормирующую величину принимается длина шкалы в мм.

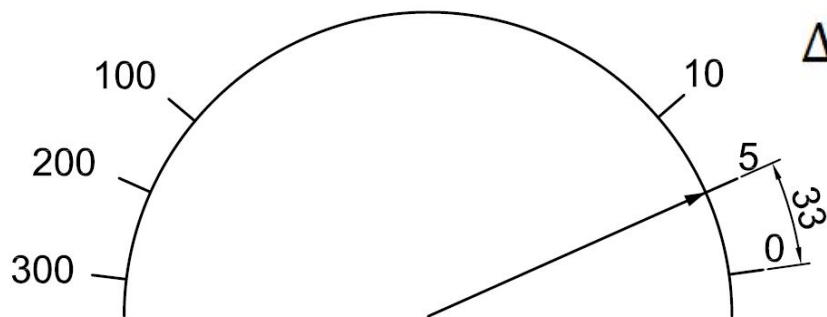
Рассмотрим пример:

Омметр с неравномерной шкалой показывает измеренное значение сопротивления, равное 5 Ом. Длина шкалы 100 мм. Найти значение абсолютной погрешности прибора.

Решение:

Найдем абсолютную погрешность в мм:

$$\Delta h_{\text{мм}} = \frac{L_{\text{шкалы}} \cdot \gamma}{100\%} = \frac{100_{\text{мм}} \cdot 2\%}{100\%} = 2_{\text{мм}}$$



Зная абсолютную погрешность, можно вычислить относительную погрешность:

$$\delta R = \frac{\Delta R_{\text{мм}}}{R_{\text{изм мм}}} \cdot 100\% = \frac{2_{\text{мм}}}{33_{\text{мм}}} \cdot 100\% = 6.06\%$$

Находим значение абсолютной погрешности в Омах:

$$\Delta R_{\text{Ом}} = \frac{\delta R \cdot R_{\text{изм Ом}}}{100\%} = \frac{6.06\% \cdot 5 \text{ Ом}}{100\%} = 0.303 \text{ Ом}$$



Виды и методы измерений

ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ:

□ Прямые измерения

При прямых измерениях искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Прямые измерения наиболее точные, так как объект и средство измерения контактируют непосредственно.

Прямые измерения не всегда можно осуществить по двум причинам:

1) прибора, который измеряет искомую величину, может не оказаться в наличии;

2) иногда при условиях режима невозможно провести измерения.



ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ:

□ Косвенные измерения

При косвенных измерениях искомую величину получают на основании известной зависимости между этим значением и величинами, полученными в результате прямых измерений.

Пример: С помощью прямых измерений находятся значения тока и напряжения, на основании этих измерений и известной зависимости (закон Ома) вычисляется значение сопротивления.

Недостатком косвенных измерений обычно является меньшая точность по сравнению с прямыми измерениями.



ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ:

- Совместные измерения – это определение нескольких неоднородных величин для определения зависимости.

Совместное измерение проводится, когда какой-либо параметр можно определить только по нескольким измерениям неоднородных величин.

В результате получается система из нескольких уравнений, которые решаются совместно, и находится неизвестный параметр.

Пример: Сопротивление зависит от температуры и некоторых других параметров:

$R = R_0(1 + At^0 + Bt^0)$ – имеются три неизвестных параметра – R_0 , A , B .
 t^0 – температура; A , B – постоянные величины.

Идет нагревание до t_1 , при которой производятся измерения всех основных параметров:

Получаем $R_{t_1} = R_0(1 + At_1 + Bt_1)$

Аналогично до температуры t_2 : $R_{t_2} = R_0(1 + At_2 + Bt_2)$

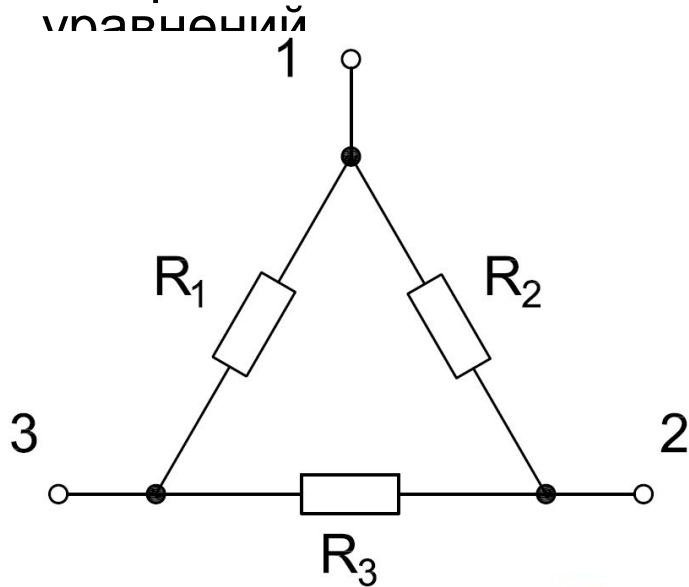
Аналогично идет нагревание до температуры t_3 : $R_{t_3} = R_0(1 + At_3 + Bt_3)$.

Получили систему из трех уравнений. Решая ее совместно, находим неизвестные параметры R_0 , A , B .

ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ:

□ Совокупные измерения.

Производятся измерения нескольких одноименных величин, при которых искомая величина также находится из системы уравнений



Пример: Найти R_1, R_2, R_3

1 опыт:

$$\text{Выводы 1-2: } R_{12} = \frac{R_2 \cdot (R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

2 опыт:

$$\text{Выводы 2-3: } R_{23} = \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$\text{3 опыт: Выводы 1-3: } R_{13} = \frac{R_1 \cdot (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

В итоге можно получить систему уравнений с 3 неизвестными:

$$\begin{cases} R_1 = f_1(R_{1-2}, R_{1-3}, R_{2-3}) \\ R_2 = f_2(R_{1-2}, R_{1-3}, R_{2-3}) \\ R_3 = f_3(R_{1-2}, R_{1-3}, R_{2-3}) \end{cases}$$

Решая данную систему, находим интересующие значения R_1, R_2, R_3 .

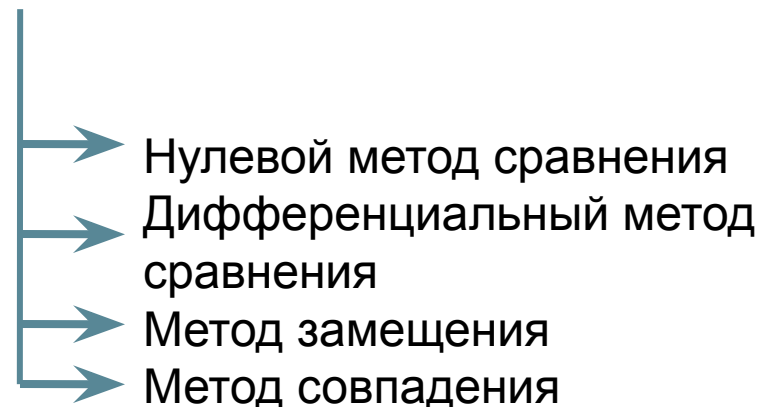
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ:

При оценке величины измеряемого параметра могут быть использованы несколько методов. Они отличаются способом использования меры.

Мера – средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Любое измерение – это сопоставление измеряемой величины и меры.

- Методы измерения
 - Непосредственной оценки
- Методы сравнения



МЕТОД НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

При этом методе измеряемая величина определяется непосредственно по отсчетному механизму. Это наиболее распространенный метод.

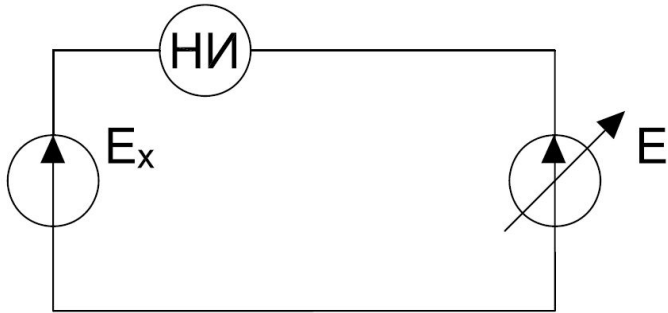
Недостаток: малая чувствительность.

Пример: Требуется измерить напряжение в пределах 100 В с точностью 0.1. Тогда потребуются шкала с 1000 делениями. Создать такой прибор практически невозможно, поэтому существуют методы сравнения, когда измеряемая величина сравнивается с мерой



МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ

□ Нулевой метод сравнения



Пример: Определить E_x

НИ – нуль-индикатор

Величина E известна и может меняться.

Если $E_x > E$ – стрелка НИ отклоняется вправо

$E_x < E$ – стрелка НИ отклоняется влево

$E_x = E$ – стрелка показывает 0

При этом с отсчетного механизма E снимается величина E_x .
Чувствительность метода определяется чувствительностью нуль-индикатора.

Метод хорошо используется в мостах постоянного и переменного тока.



МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ

□ Дифференциальный метод сравнения

Схож с нулевым методом сравнения. Отличием дифференциального метода сравнения от нулевого является то, что вместо нуля-индикатора используется прибор соответствующего класса точности.

При дифференциальном методе сравнения измеряется разность: $U_{\text{изм.приб.}} = E_x - E.$

При этом прибор может иметь низкий предел измерения, обеспечивающий хорошую точность.



МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ

- Метод замещения.

При этом методе на вход прибора поочередно подаются измеряемая величина и известная величина. Они фиксируются. Известная величина изменяется, пока величины не совпадут.

Пример: старый осциллограф без оцифрованной шкалы.

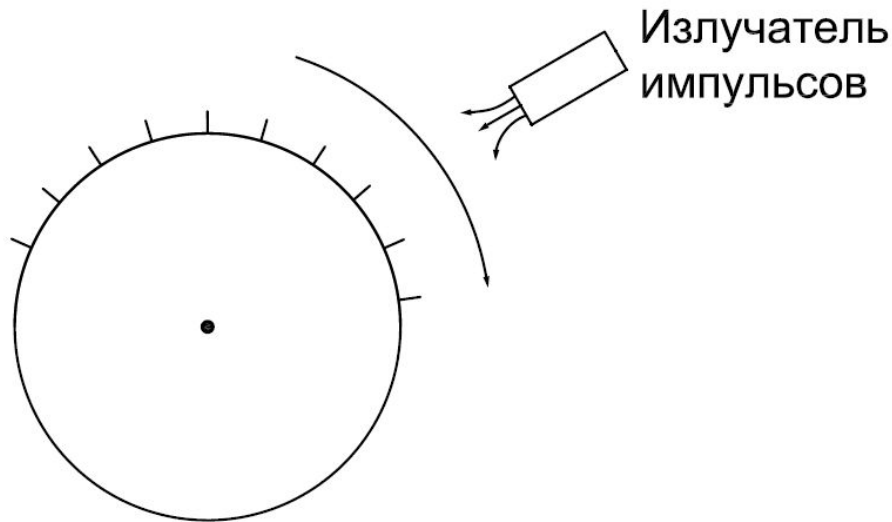


МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ

□ Метод совпадения

Измеряется разность между измеряемой величиной и воспроизводимой мерой, используя совпадения периодических сигналов или совпадения отметок шкал.

Используется обычно для оценки временных интервалов, а также в стробоскопах.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пусть $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Где y – выходная величина

Пример: $P = l^2 r$; $P \sim y$; $x_1 \sim l$; $x_2 \sim r$.

При измерении x_1, x_2, \dots, x_n внесены погрешности. Тогда образуется погрешность y выходной величины:

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$$

Это выражение можно разложить в ряд Тейлора. При разложении ограничимся первой производной и получим:

$$y + \Delta y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} \Delta x_3$$

Сократив y и $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, получаем:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} \Delta x_3$$



РАССМОТРИМ ПРИМЕР:

$$\square \circ P = \frac{U^2}{R} = U^2 * R^{-1},$$

$$\circ \Delta P = \left| \frac{2U}{R} * \Delta U \right| + \left| (-U^2 * R^{-2} * \Delta R) \right|,$$

$$\circ \delta P = \frac{\Delta P}{P} * 100\% = \left(\frac{2U * \Delta U}{R} * \frac{R}{U^2} + \frac{U^2 * \Delta R}{R^2} * \frac{R}{U^2} \right) * 100\% = \\ = 2\delta U + \delta R.$$



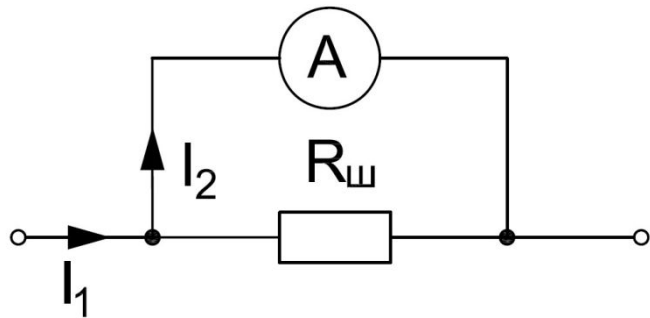
The left side of the slide features a series of vertical stripes in various shades of blue and grey, ranging from dark to light. To the right of these stripes, there are several overlapping circles of different sizes, also in shades of blue and grey, creating a modern, abstract design.

ЛЕКЦИЯ №4

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

1) Шунт

- Шунт применяется для уменьшения силы тока в n раз. Как правило шунт представляет собой манганиновое сопротивление (Cu, Mn – 11,5 ÷ 13,5%, Ni – 2,5 ÷ 3,5%). Этот сплав имеет малый температурный коэффициент сопротивления (ТКС), т.е. мало зависит от температуры.
- Используется для измерения больших токов (100 ÷ 200А) или для расширения диапазона измерений.
- Прибор на 200А имел бы катушку с большим сечением, был бы габаритный.



$$(I_1 - I_2) * R_{\text{ш}} = I_2 * R_A$$

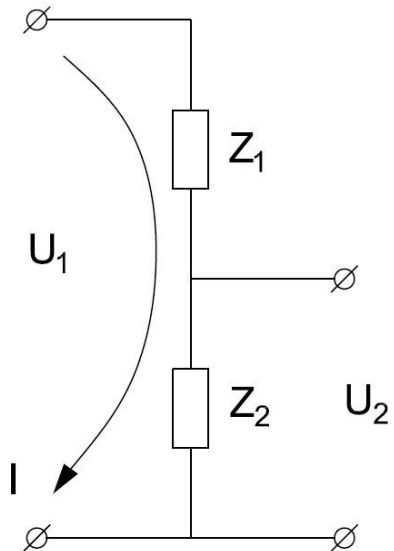
$$R_{\text{ш}} = \frac{I_2}{I_1 - I_2} * R_A$$

I_2 – допустимый ток через амперметр

- Шунт обычно используется в цепях постоянного тока, т.к. при переменном токе появляется дополнительная погрешность из-за того, что при изменении частоты $R_{\text{ш}}$ и R_A изменяются непропорционально, т.к. $R_{\text{ш}}$ – чисто активное, а R_A имеет индуктивность.

2) ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ (ДН)

☐ ДН применяется для уменьшения напряжения в n раз.



z_1 и z_2 - в общем случае комплексные

$$I = \frac{U_1}{z_1 + z_2} = \frac{U_2}{z_2}$$

$$U_1 * z_2 = U_2 * (z_1 + z_2)$$

$$U_2 = U_1 * \frac{z_2}{z_1 + z_2}$$

Для постоянного тока используют ДН на активное сопротивление. Для переменного тока возможен ДН на емкость или индуктивность. Недостаток активного сопротивления – необходимость рассеивать мощность. На емкостном сопротивлении происходит незначительное выделение мощности. Если использовать активно-емкостные сопротивления, то рассеиваемая активная мощность в значительной степени снижается. На 500 кВ используют емкостные ДН. Он снижает класс изоляции для ТН. ТН становится дешевле.

3) ДОБАВОЧНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (ДС)

- Используется с вольтметром для расширения диапазона измерений.

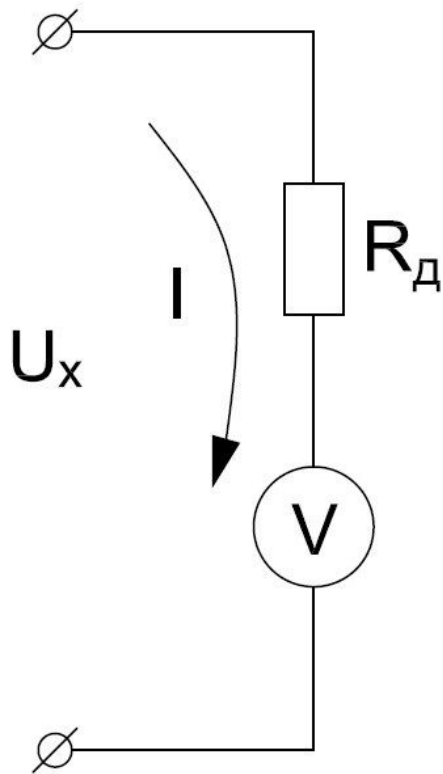
$$I = \frac{U_x}{R_D + R_v} = \frac{U_v}{R_v}$$

$$U_x * R_v = U_v * (R_D + R_v) = U_v * R_D + U_v * R_v$$

$$U_x * R_v - U_v * R_v = U_v * R_D$$

$$R_v * (U_x - U_v) = U_v * R_D$$

$$R_D = R_v * \frac{U_x - U_v}{U_v}$$



ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ (ИМ)

□ Электрическая энергия входного сигнала преобразуется в механическую энергию. Под действием механической энергии начинает двигаться подвижный элемент.

□ Типы электромеханических ИМ:

- 1) Магнитоэлектрический 
- 2) Электромагнитный 
- 3) Электродинамический 
- 4) Ферродинамический 
- 5) Электростатический 
- 6) Индукционный 

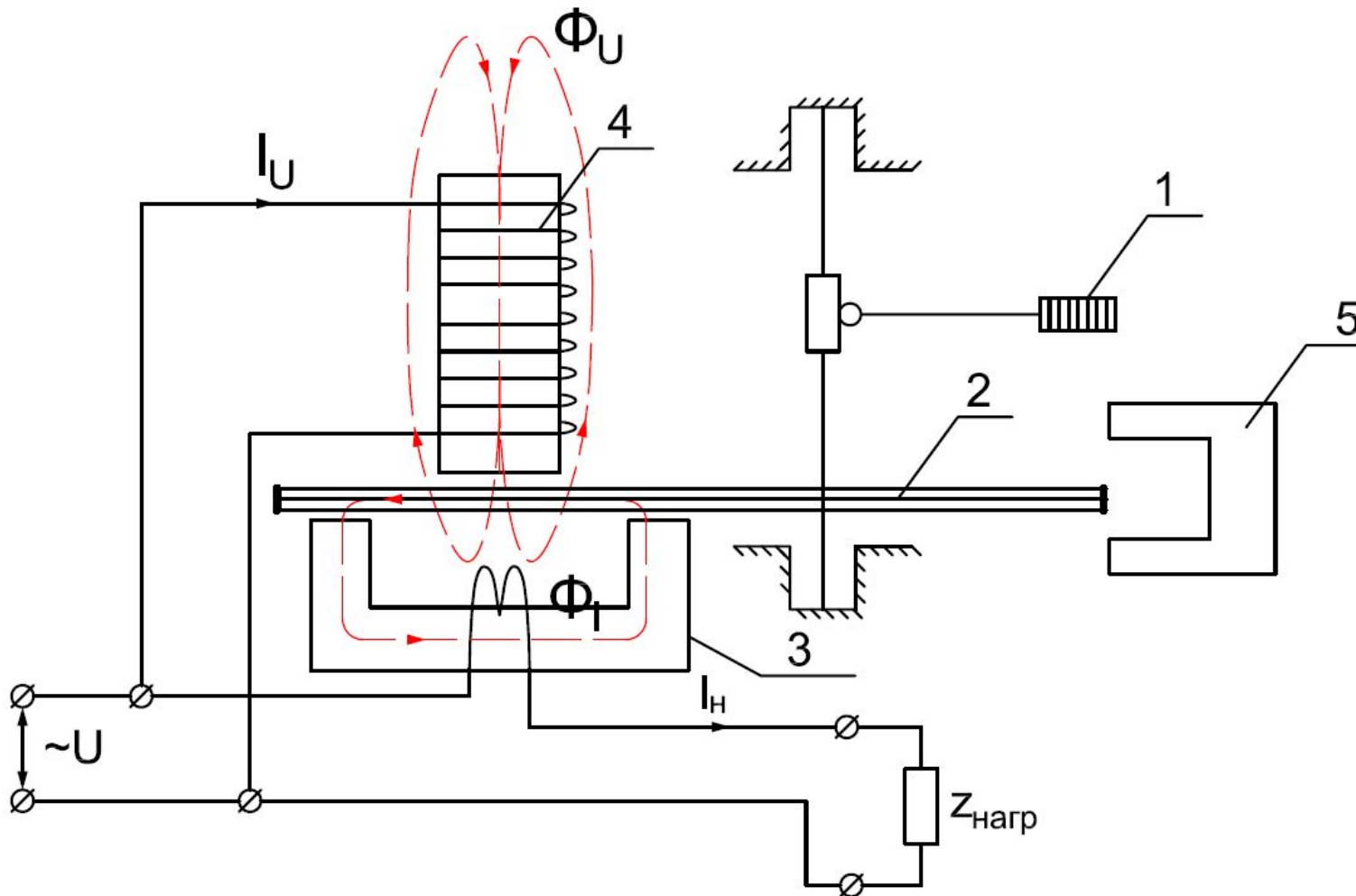


- Эти же 6 типов ИМ заложены в конструкцию электромеханических реле. В устройствах релейной защиты и автоматики используют электромагнитные и индукционные реле тока.
- На любой ИМ действует противодействующий (тормозной) момент, который формируется чаще всего механическим (пружина), а иногда электрическим способом (в логометрических ИМ).



Индукционный ИМ (ПРИБОР ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ)

Рассмотрим на базе индукционного счетчика электрической энергии



1 – отсчетный механизм (механический счетчик оборотов дисков);

2 – алюминиевый диск;

3 – ферромагнитный шихтованный (из тонких пластин) стальной магнитопровод с токовой обмоткой;

4 – ферромагнитный шихтованный (из тонких пластин) стальной магнитопровод с обмоткой напряжения;

5 – постоянный магнит.

Диск закреплен на оси. Ось закреплена на подшипнике. На оси закреплена шестерня, которая передает вращение отсчетному механизму.





ЛЕКЦИЯ №5

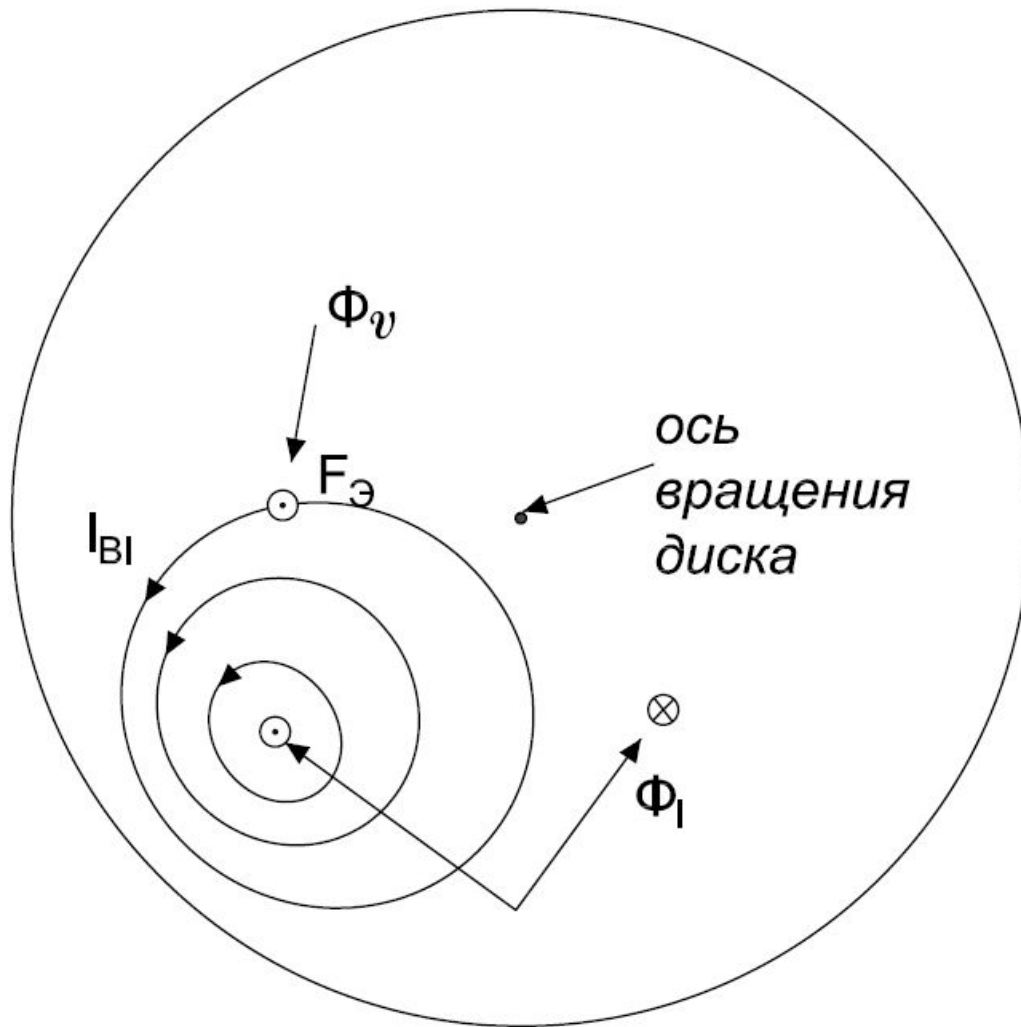
- Требования к диску: легкость, электропроводность, не магнитный.
- Диск выполняется из алюминия.
- В сердечниках применяется шихтованная электротехническая сталь. Толщина пластин – 0,5 мм. Шихтованные сердечники применяются для уменьшения вихревых токов.
- Обмотка тока имеет малое число витков проводов относительно небольшого диаметра, чтобы обмотка тока имела малое сопротивление.
- Обмотка напряжения имеет большое число витков относительно малого диаметра, поэтому обмотка напряжения имеет большое сопротивление. Если бы было малое сопротивление, она бы шунтировала источник питания.
- Постоянный магнит создает тормозной момент при вращении диска.



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ:

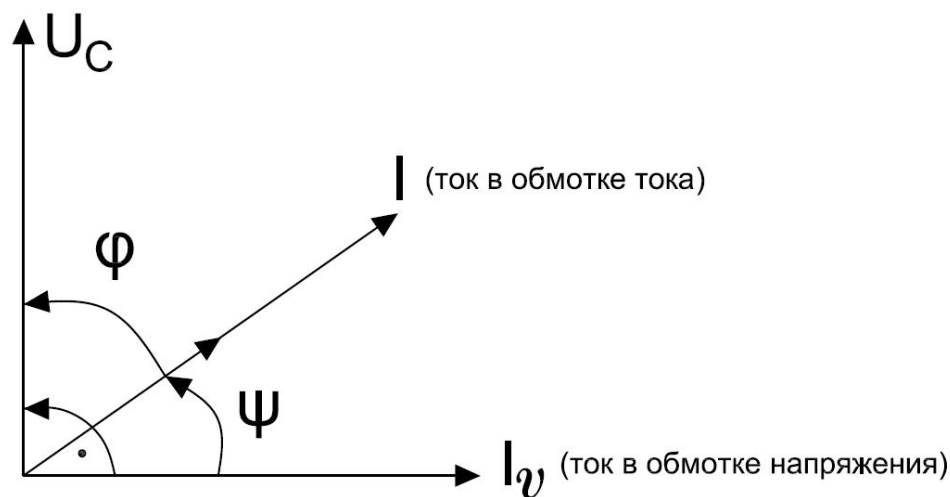
- При протекании тока нагрузки в сердечнике возникает магнитный поток в токовой обмотке.
 - Так как диск является не магнитным, Φ_I не замыкается по диску, а пронизывает его в 2 точках и замыкается по воздуху.
 - Φ_I - магнитный поток в токовой обмотке
 - К обмотке напряжения подводится напряжение сети. Возникает ток I_v . Этот ток в обмотке напряжения создает магнитный поток Φ_v .
 - Φ_v - магнитный поток в обмотке напряжения
 - Φ_v пронизывает диск в 1 точке. Φ_I и Φ_v индуцируют в диске вихревые токи I_{BI}, I_{Bv} (токи Фуко).
- $\left[\begin{array}{l} I_{BI} - \text{вихревой ток от магнитного потока токовой обмотки,} \\ I_{Bv} - \text{вихревой ток от магнитного потока обмотки} \end{array} \right.$
напряжения.

Вид СВЕРХУ:



Вихревой ток обмотки тока находится по правилу Буравчика и замыкается в виде concentric окружностей, часть диска которых можно представить элементарным проводником.

- ❑ Деревянный диск не будет вращаться, т.к. нет вихревых токов. Нет взаимодействия вихревых токов и магнитных потоков.
- Вращающий момент:
- $M_{вр} = k * \Phi_I * \Phi_v * \sin\psi$,
- ψ – угол между магнитными потоками.
- Векторная диаграмма:



$$M_{вр} = k * \Phi_I * \Phi_v * \sin(90^\circ - \varphi) = k * \Phi_I * \Phi_v * \cos\varphi =$$

$$= k_1 * I * U * \cos\varphi \equiv P$$



⦿ Постоянный магнит создает магнитный поток $\Phi_{\text{ПМ}}$, который пронизывает диск. Диск вращается в элементарных проводниках, при пересечении магнитных потоков постоянного магнита возникает ε и создается тормозной момент $M_{\text{Торм}}$. Когда диск стоит, $\Phi_{\text{ПМ}}$ не оказывает влияния на диск.

⦿ $M_{\text{ПМ}} = M_{\text{Торм}} = k_2 \frac{d\alpha}{dt}$,

⦿ $\frac{d\alpha}{dt}$ - скорость вращения диска,

⦿ α – угол поворота диска.

⦿ Если момент вращения $M_{\text{Вр}} = M_{\text{ПМ}}$, диск вращается равномерно (без ускорений).

⦿ Тогда $M_{\text{Вр}} = k * \Phi_I * \Phi_v * \sin \psi = k_1 * I * U * \cos \varphi = k_2 \frac{d\alpha}{dt}$,

⦿ Отсюда $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{k_1}{k_2} I * U * \cos \varphi (1)$



⦿ При трогании и торможении диска возникает момент инерции:

⦿ $M_{и} = D * \frac{d^2\alpha}{dt^2},$

⦿ $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ - ускорение,

⦿ D – постоянная инерции.

⦿ Чем больше масса диска, тем больше $M_{и}$.

⦿ $U * I * \cos\varphi \equiv$ активной мощности.

⦿ Потребленная энергия $W_{потр} = P * t$. Если бы нагрузка была постоянной, то, чтобы знать потребленную энергию, нужно было бы произвести такие вычисления, но вследствие непостоянной нагрузки, чтобы получить энергию, нужно постоянно производить интегрирование активной мощности за малые моменты времени.

Счетчик активной энергии – диск – интегрирующий элемент.



☐ Число оборотов диска:

- $\mathbf{N} = k_3 \int_0^T \frac{d\alpha}{dt} dt (*)$,

- k – коэффициент пропорциональности,

- T – период – время, за которое потребляется энергия.

- В (*) подставим (1):

- $\mathbf{N} = \frac{k_3}{k_2} \int_0^T k_1 * I * U * \cos\varphi dt = \frac{W}{c}$,

- c – постоянная диска,

- $c = \frac{k_2}{k_1 * k_3}$,

- $c = \frac{1}{S}$,

- S – чувствительность,

- W – электроэнергия,

- k_1, k_2, k_3 не постоянны,

- k_2 - коэффициент пропорциональности постоянного магнита (изменяется при размагничивании постоянного магнита),

- k_3 определяет пропорциональность всего механизма (изменяется при изменении состояния смазки в подшипниках),

- В итоге постоянная счетчика c изменяется со временем и под действием внешних факторов.

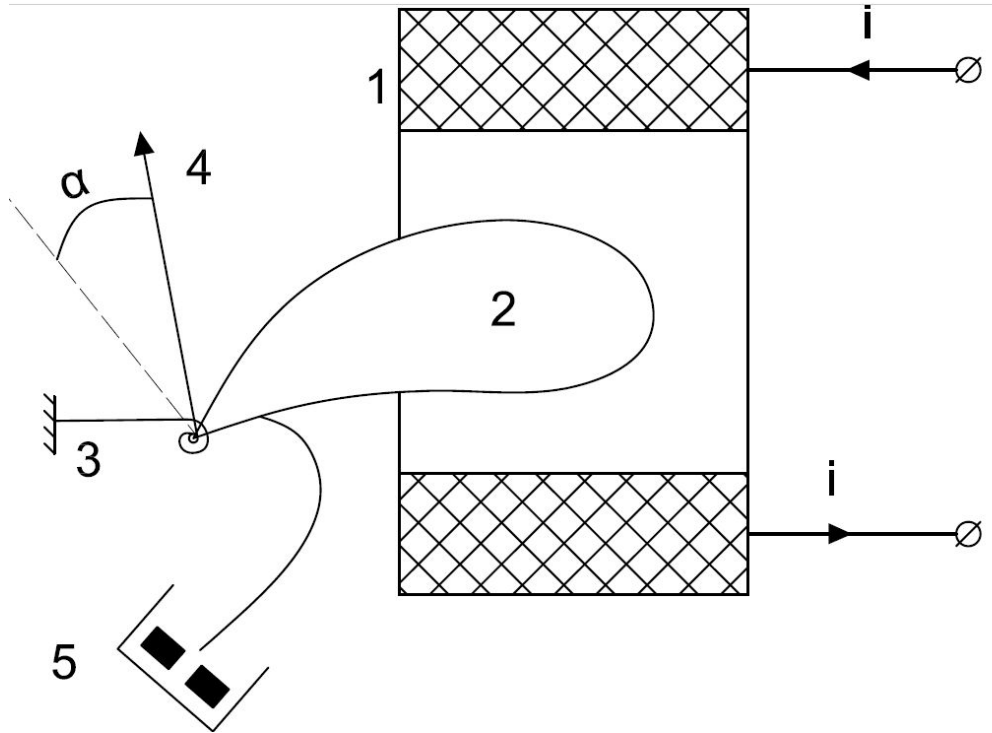
- ❶ С определяет погрешность счетчика.
- Относительная погрешность счетчика:
- $\delta = \frac{c - c_{\text{НОМ}}}{c} * 100\%$.
- δ задается в виде класса точности (число) в паспорте прибора. Например: 0,5
- Порог чувствительности счетчика:
- $\Delta S = \frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{НОМ}}} * 100\%$ (в ГОСТ),
- При I_{min} диск устойчиво вращается.
- Порог чувствительности – важная величина, т.к. при малом токе потребитель может потреблять энергию бесплатно. Этого быть не должно. Порог чувствительности стараются сделать меньше. Счетчики не должны иметь самоход (вращение диска при отсутствии входных величин).
- Счетчики подлежат поверке. Во время неё счетчики проверяются на соответствие класса точности, порога чувствительности и самоход. Не соответствующие требованиям счетчики подлежат ремонту или отбраковке.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ

- Состоит из неподвижной катушки с токовой обмоткой и подвижного ферромагнитного сердечника.
- Вращающий момент на ферромагнитном сердечнике возникает из-за взаимодействия электромагнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника.



КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА:



- 1 – катушка (течек измеряемый ток),
- 2 – ферромагнитный сердечник (соединен с осью),
- 3 – пружина (создает тормозной момент),
- 4 – стрелка,
- 5 – демпфер (успокоитель) – поршень с калиброванным отверстием (может быть индукционного типа).



□ $W_{\text{эм}} = \frac{L \cdot i^2}{2},$

○ $M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{L \cdot i^2}{2}\right)}{d\alpha}.$

○ При повороте стрелки будет меняться L , $I = \text{const}.$

○ $M_{\text{вр}} = \frac{1}{2} * I^2 * \frac{dL}{d\alpha}$ - в цепях постоянного тока.

○ $i = I_m * \sin(\omega t)$ – переменный ток,

○ $M_{\text{вр}} = \frac{1}{2} * I_m^2 * (\sin(\omega t))^2 * \frac{dL}{d\alpha} = \frac{1}{4} * I_m^2 * (1 - \cos(2\omega t)) * \frac{dL}{d\alpha},$

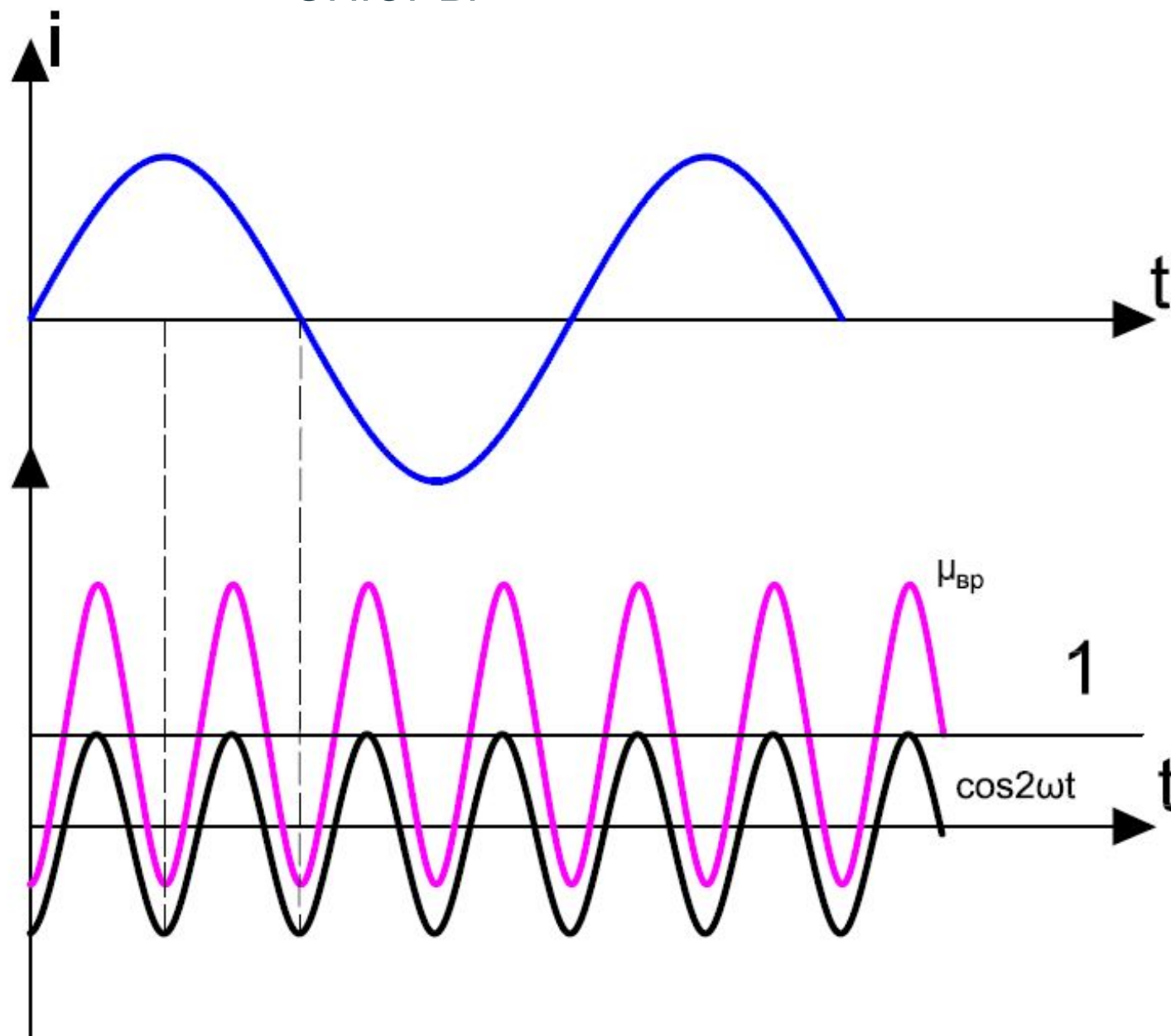
○ $M_{\text{вр}} = \frac{1}{4} * I_m^2 * (1 - \cos(2\omega t)) * \frac{dL}{d\alpha}$ - мгновенное значение в цепях переменного тока.



The left side of the slide features a vertical stack of decorative elements. At the top, there are several thin, parallel vertical lines in shades of light blue and white. Below these, a large, semi-transparent light blue circle is positioned. To its right and slightly lower, there are four smaller circles of varying sizes, also in shades of light blue, arranged in a descending, staggered pattern.

ЛЕКЦИЯ №6

ЭПЮРЫ



- Результирующий $M_{вр}$ имеет постоянный знак, но меняет свое значение в каждый момент времени.
- Если стрелка легкая, то в соответствии с законом $M_{вр}$ она будет двигаться по шкале от 0 до \max . Для предотвращения этого ставят демпфер (интегрирующий элемент), который сглаживает колебания стрелки. Из-за этого стрелка показывает постоянное среднее значение.
- Среднее значение:

$$\begin{aligned}
 M_{вр} &= \frac{1}{T} \int_0^T M_{вр}(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{4} I_m^2 (1 - \cos 2\omega t) \frac{dL}{d\alpha} d\omega t = \\
 &= \frac{1}{4} \frac{I_m^2}{2\pi} \frac{dL}{d\alpha} \int_0^{2\pi} (1 - \cos 2\omega t) d\omega t = \frac{1}{4} \frac{2\pi * I_m^2}{2\pi} \frac{dL}{d\alpha} = \frac{(\sqrt{2} I_D)^2}{4} \frac{dL}{d\alpha} = \frac{I_D^2}{2} * \frac{dL}{d\alpha}
 \end{aligned}$$

$$M_{вр} = \frac{I_D^2}{2} * \frac{dL}{d\alpha}$$



- Шкала градуируется в действующих значениях. Повороту стрелки препятствует пружина.

- $M_{\text{пр}} = k * \alpha,$

- k – коэффициент упругости,

- α – угол поворота стрелки,

- $M_{\text{пр}}$ - момент пружины.

- Если стрелка остановилась: $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}},$

- $k * \alpha = \frac{I_{\text{д}}^2}{2} * \frac{dL}{d\alpha},$

- $\alpha = \frac{I_{\text{д}}^2}{2k} * \frac{dL}{d\alpha},$

- $\alpha \equiv I_{\text{д}}^2$, поэтому шкала будет неравномерной. Но при определенной неправильной форме сердечника шкалу можно сделать частично равномерной.



- Преимущества электромагнитного ИМ: простой, дешевый, надежный.
- Недостатки: низкая чувствительность, подверженность влиянию внешних электромагнитных полей, относительно большая погрешность.
- Причины повышенной погрешности:

1) влияние температуры

При изменении температуры меняется коэффициент упругости пружины.

2) влияние гистерезиса сердечника

Гистерезис явным образом проявляется при измерении постоянных токов и напряжений.

3) влияние вихревых токов в ферромагнитном сердечнике

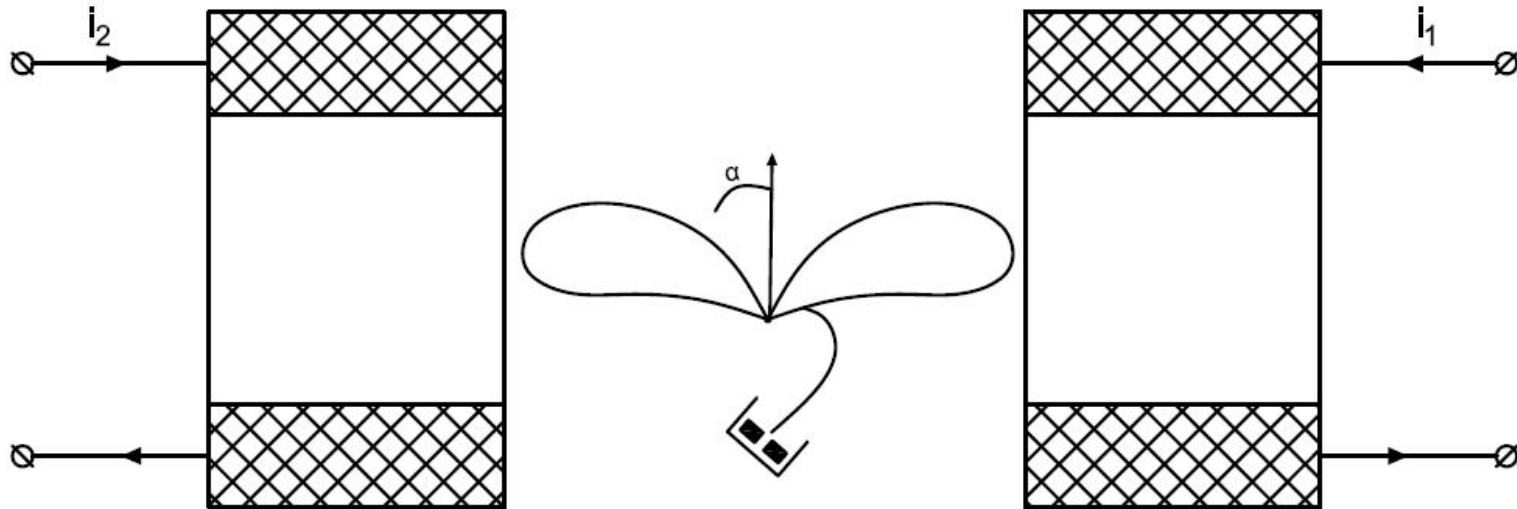


- ⊗ Проявляется на больших частотах, т.к. при увеличении частоты увеличиваются вихревые токи.
- При $\uparrow f \rightarrow \uparrow i_{\text{вихр}}$.
- $E = 4,44 \cdot V \cdot f \cdot S \cdot W_2$.
- Частотный диапазон ограничен. Верхняя граница от 8 до 10 кГц ($f_{\text{верх}} = 8 \div 10$ кГц).



ЛОГОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИМ (ЛОГОМЕТР)

- ❑ Роль пружины выполняет вторая катушка с током.



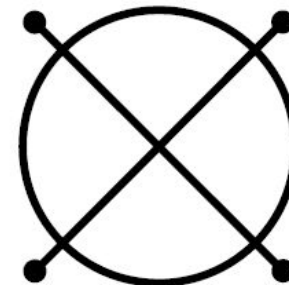
- ❑ При отсутствии i_1 и i_2 сердечники и стрелка находятся в безразличном состоянии. $M_{вр}$ от i_1 и i_2 направлены противоположно. Если $M_{вр}$ одинаковы, стрелка находится в среднем положении.



Обозначение:



ИЛИ



- При $M_2 > M_1$ - стрелка влево,
- При $M_2 < M_1$ - стрелка вправо.
- $\frac{dL_1}{d\alpha} I_1^2 = \frac{dL_2}{d\alpha} I_2^2$ - стрелка в середине шкалы.
- $\Rightarrow \alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$
- Приборы на базе электромагнитного ИМ: амперметр, вольтметр, частотомер.



- ⦿ При использовании амперметра катушка включается непосредственно в токовую цепь. Изменение диапазона измерений выполняется с помощью последовательного или параллельного включения катушек.
- При использовании вольтметра используется добавочное сопротивление $Z_{доб}$.

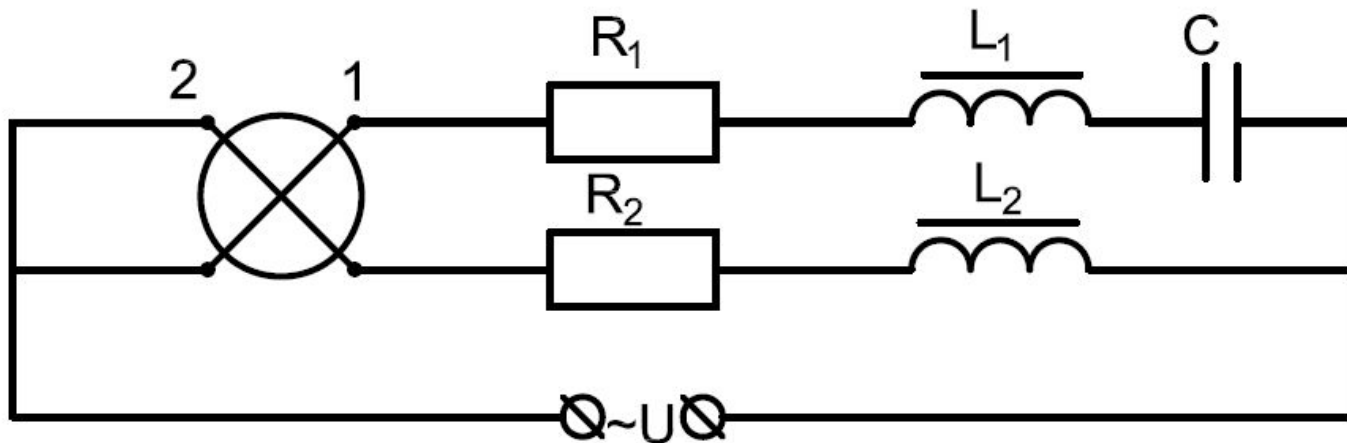
- $$M_{вр} = \frac{dL}{d\alpha} * \frac{U^2}{Z_{доб}^2},$$

- $$\alpha = \frac{1}{2k} * \frac{dL}{d\alpha} * \frac{U^2}{Z_{доб}^2}.$$



СХЕМА ЧАСТОТОМЕРА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЛОГОМЕТРИЧЕСКИЙ ЧАСТОТОМЕР



- L_1, L_2 - катушки,
- z в цепи 1 катушки: R, L, C ,
- z в цепи 2 катушки: R, L .
- При $\uparrow f \rightarrow z_{\text{кат}2} \uparrow$ быстрее, чем $z_{\text{кат}1}$.
- В итоге $M_{\text{вр}} \equiv \Delta f$.

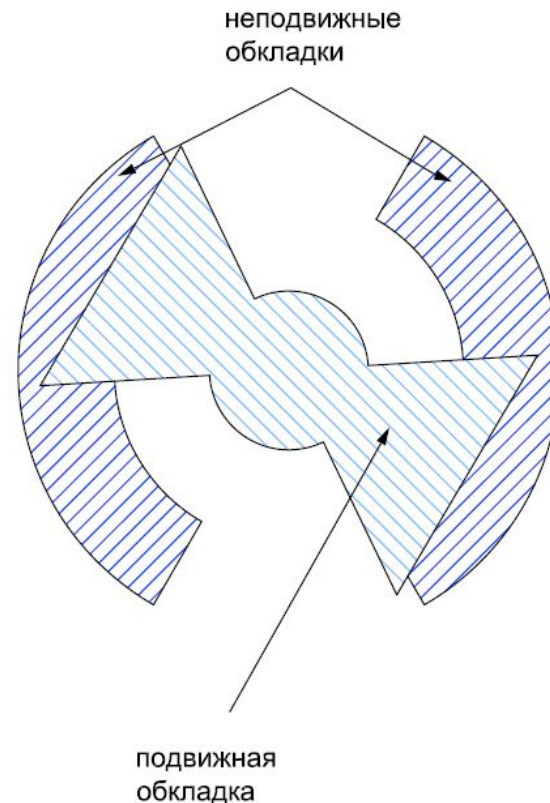
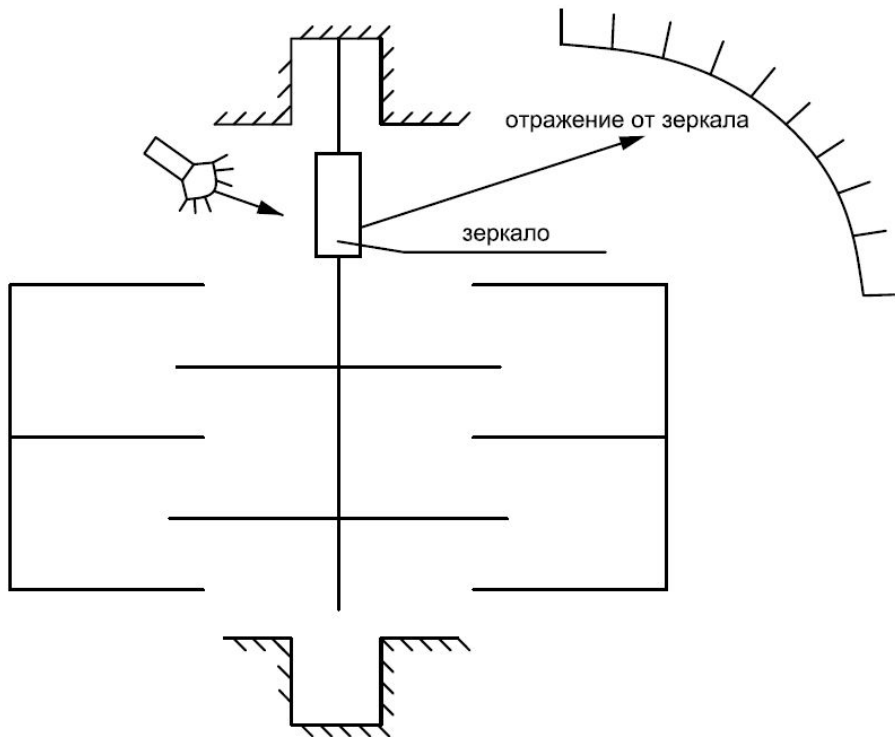
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ИМ

(ПРИБОР ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ)

□ Обозначение:



□ Предназначен для измерения постоянных или переменных напряжений. Представляет из себя воздушный трансформатор. Одна обкладка подвижна, другая нет.



○ Зеркало освещается лампой, зайчик движется по шкале.

○ Энергия электрического поля:

○ $W = \frac{CU^2}{2}$.

○ $M_{вр} = \frac{dW}{d\alpha}$,

○ $M_{вр} = \frac{U^2}{2} * \frac{dC}{d\alpha}$ - при измерении постоянного напряжения

○ При измерении переменного напряжения:

○ $u = U_m \sin(\omega t)$,

○ $M_{вр} = \frac{1}{2} U_m^2 (\sin(\omega t))^2 * \frac{dC}{d\alpha} = \frac{U_m^2 (1 - \cos 2\omega t)}{4} * \frac{dC}{d\alpha}$

○ Также имеется интегрирующий демпфер. Среднее значение под влиянием интегрирующего демпфера:

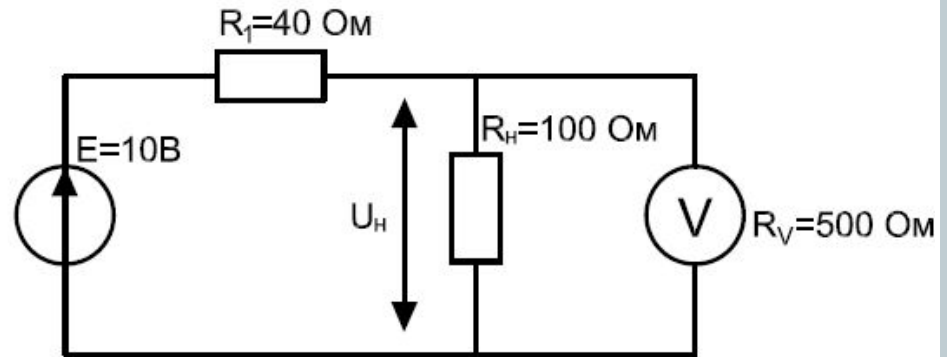
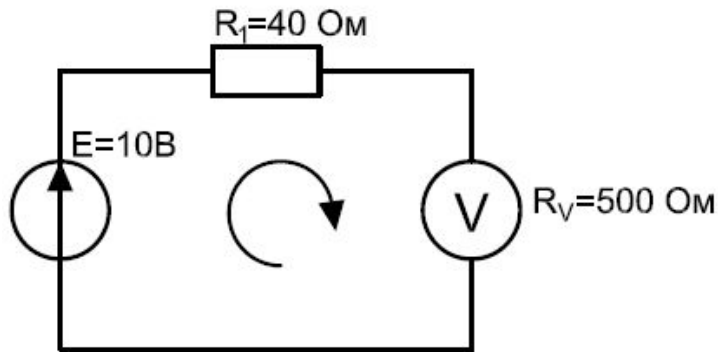
○ $M_{вр} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{U_m^2 (1 - \cos 2\omega t)}{4} * \frac{dC}{d\alpha} d\omega t = \frac{U_D^2}{2} * \frac{dC}{d\alpha}$,

○ $M_{вр} = \frac{U_D^2}{2} * \frac{dC}{d\alpha}$ - при измерении переменного напряжения

- Приборами электромагнитной и электростатической системы описывают одни и те же выражения, только в электромагнитной через токи, в электростатической через напряжения.
- Преимущества: высокое входное сопротивление, малая потребляемая мощность.
- Недостатки: низкая чувствительность, подверженность влиянию внешних электрических полей.



ПРИМЕР (КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2)



- $E_{\text{ист}} = 10\text{В},$
- $E_{\text{изм}} = \frac{E}{R_1 + R_v} * R_v,$
- $\Delta E_{\text{мет}} = E_{\text{изм}} - E_{\text{ист}},$
- $\delta E_{\text{мет}} = \frac{\Delta E_{\text{мет}}}{E_{\text{ист}}} * 100\%.$

- $U_{\text{H ист}} = \frac{E}{R_1 + R_H} * R_H,$
- $U_{\text{H изм}} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_H * R_v}{R_H + R_v}} * \frac{R_H * R_v}{R_H + R_v}.$

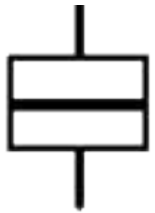


The left side of the slide features a vertical stack of decorative elements: a wide, light blue gradient bar, followed by several thin white vertical lines, and a cluster of five light blue circles of varying sizes arranged in a descending pattern from top to bottom.

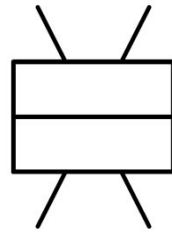
ЛЕКЦИЯ №7

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ (ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЙ) ИМ

- Принцип действия основан на взаимодействии полей подвижной и неподвижной катушки.
- Обозначение:



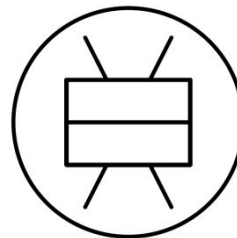
электродинамический



логометрический
электродинамический



ферродинамический



логометрический
ферродинамический



$$W_{\text{эм}} = \frac{L_1 * i_1^2}{2} + \frac{L_2 * i_2^2}{2} + M_{12} * i_1 * i_2,$$

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha} = i_1 * i_2 * \frac{dM_{12}}{d\alpha},$$

$$M_{\text{вр}} = I_1 * I_2 * \frac{dM_{12}}{d\alpha} - \text{для постоянного тока.}$$

Если i_1 и i_2 переменные:

$$i_1 = I_{1\text{max}} \sin(\omega t),$$

$$i_2 = I_{2\text{max}} \sin(\omega t - \varphi).$$

$$M_{\text{вр}} = I_{1\text{m}} * I_{2\text{m}} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * \sin(\omega t) * \sin(\omega t - \varphi) =$$

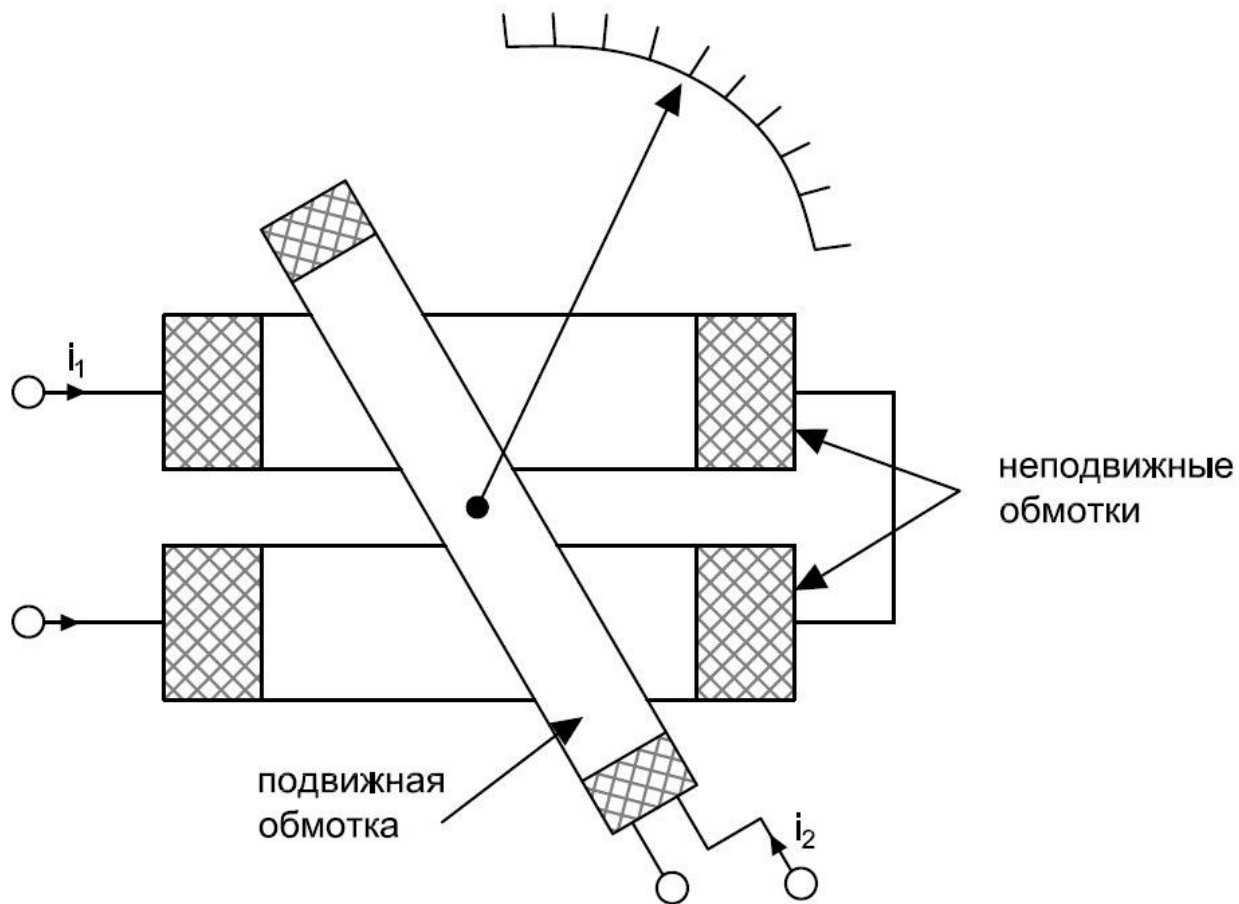
$$= \frac{1}{2} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * I_{1\text{m}} * I_{2\text{m}} * [\cos\varphi - \cos\varphi * \cos 2\omega t - \sin 2\omega t * \sin\varphi].$$

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * I_{1\text{m}} * I_{2\text{m}} * [\cos\varphi - \cos\varphi * \cos 2\omega t - \sin 2\omega t * \sin\varphi] d\omega t =$$

$$= \dots = I_{1\text{д}} * I_{2\text{д}} * \cos\varphi * \frac{dM_{12}}{d\alpha}.$$

$$M_{\text{вр.ср}} = I_{1\text{д}} * I_{2\text{д}} * \cos\varphi * \frac{dM_{12}}{d\alpha} - \text{для переменного тока}$$

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА:



- Есть демпфер.
- Конструкция может быть воздушная (с поршнем) или магнитная.



○ Если противодействующий момент создается пружиной:

○ $M_{\text{торм}} = k * \alpha.$

○ Если $M_{\text{вр}} = M_{\text{торм}}:$

○ $k * \alpha = I_{1д} * I_{2д} * \cos\varphi * \frac{dM_{12}}{d\alpha},$

○ $\alpha = \frac{1}{k} * I_{1д} * I_{2д} * \cos\varphi * \frac{dM_{12}}{d\alpha}.$

○ Т.к. есть произведение двух токов, то шкала неравномерная.

○ Т.к. есть зависимость $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$, можно сделать шкалу частично равномерной за счет применения особой формы подвижной катушки.

○ Т.к. есть произведение двух электрических величин, то на базе электродинамического ИМ можно сделать ваттметр.

○ На базе электродинамического ИМ можно выполнить приборы: амперметр, вольтметр, ваттметр, частотомер, фазометр.

АМПЕРМЕТР

- Подвижная и неподвижная обмотки могут быть соединены последовательно или параллельно.
- При последовательном соединении $i_1 = i_2 = i$, $\cos\varphi = 1$:
- $\alpha_{\text{посл}} = \frac{1}{k} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * I_{\text{Д}}^2$.
- При параллельном соединении $i_1 = k_1 * i$, $i_2 = k_2 * i$, $\cos\varphi = 1$:
- $\alpha_{\text{парал}} = \frac{1}{k} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * I_{\text{Д}}^2 * k_1 * k_2$.
- $f_{\text{верх}} = 10 \text{ кГц}$




ВОЛЬТМЕТР

- Обмотки соединены последовательно, есть добавочное сопротивление.

- $$i = \frac{U}{Z_{\text{приб}} + R_{\text{доб}}},$$

- $Z_{\text{приб}}$ - комплексное сопротивление двух обмоток.

- $$\alpha = \frac{1}{k} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * \frac{U^2}{(Z_{\text{приб}} + R_{\text{доб}})^2}.$$

- Ферродинамический ИМ отличается от электродинамического ИМ введением в катушки ферродинамических сердечников.
 - Достоинство: увеличивается чувствительность прибора.
 - Недостаток: дополнительная погрешность из-за гистерезиса и нелинейности кривой намагничивания сердечника.
- 

○ Причины возникновения погрешностей (для электродинамического и ферродинамического ИМ):

1) влияние температуры

Особенно для вольтметров, т.к. при изменении температуры меняется $R_{\text{доб}}$.

2) изменение частоты сигнала

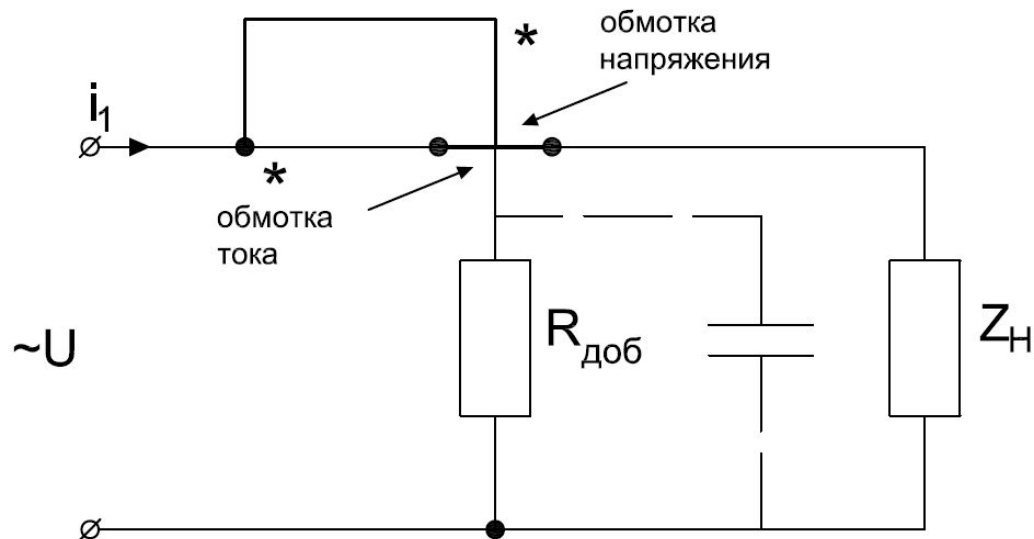
Т.к. при изменении частоты меняется входное сопротивление прибора.

○ Эти погрешности учитываются в классе точности и оговариваются в требованиях температуры и частоты.

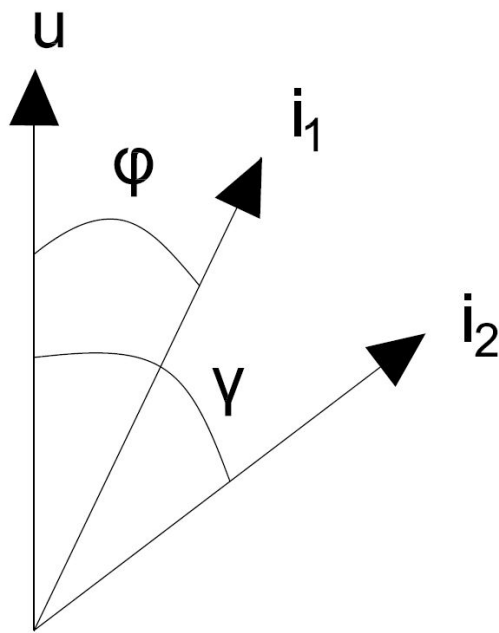


ВАТТМЕТР

- 2 обмотки: обмотка тока + обмотка напряжения



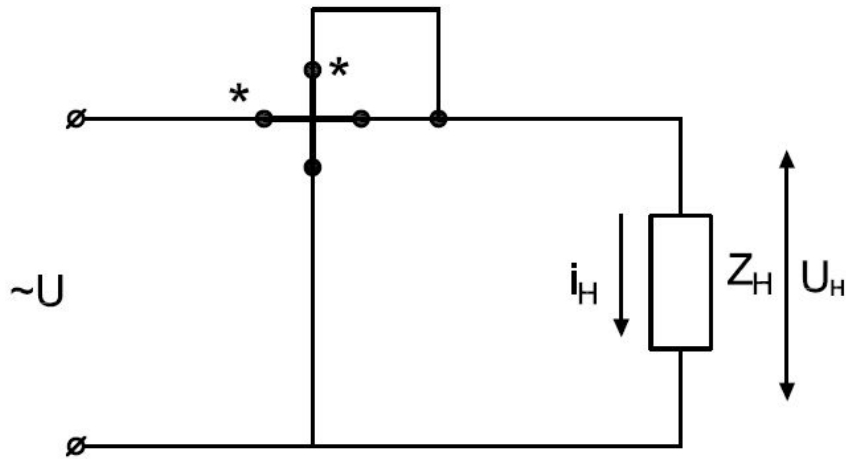
- Векторная диаграмма:



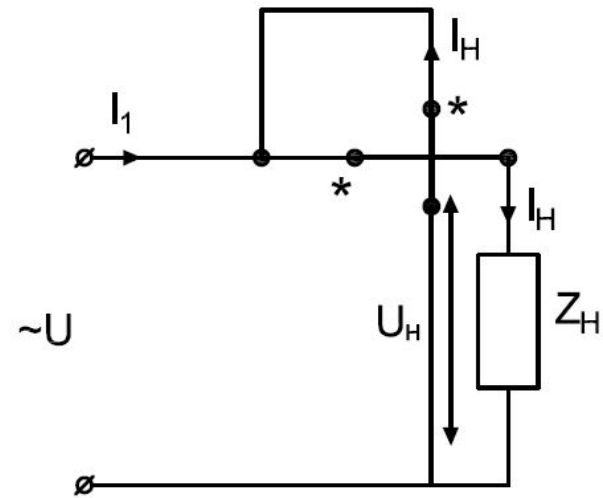
- ⦿ Т.к. в обмотке напряжения больше витков, то она будет приближаться к чисто индуктивной.
- $$\alpha = \frac{1}{k} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * I_{1д} * I_{2д} * \cos(\gamma - \varphi).$$
- Наличие угла γ мешает в чистом виде измерять активную мощность. Поэтому для компенсации напряжения вводят конденсатор.
- $$\alpha = \frac{1}{k} * \frac{dM_{12}}{d\alpha} * I_{1д} * \frac{U_{1д}}{Z_{приб} + R_{доб}} \cos \varphi.$$
- Т.к. есть $\cos \varphi$, то при изменении полярности $\alpha < 0$ и стрелка зашкаливает влево.



- Обмотку напряжения ваттметра можно подключить по двум схемам:



- 1 схема:
- Малые z_H (R-L нагрузка),
- Обмотка напряжения подключается со стороны нагрузки



- 2 схема:
- Большие z_H (R-C нагрузка),
- Обмотка напряжения подключается со стороны генератора



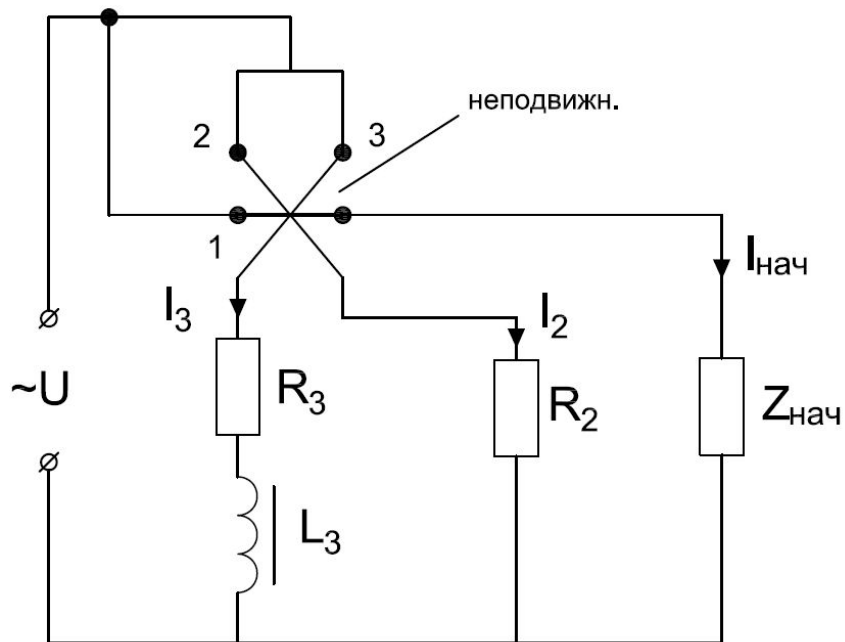
① $P = \Delta U_{\text{нагр}} * I_{\text{нагр}} * \cos\varphi.$

- Если $z_{\text{H}} \approx z_i$, вместо одного напряжения подключили бы двойное (1 схема).
- Если $z_{\text{H}} \approx z_u$, замер будет отличаться от истинного в 2 раза, т.е. $I_1 = I_u + I_{\text{H}} \approx 2I_{\text{H}}$ (2 схема).



ФАЗОМЕТР

- Выполняется на базе логометрического электродинамического ИМ.

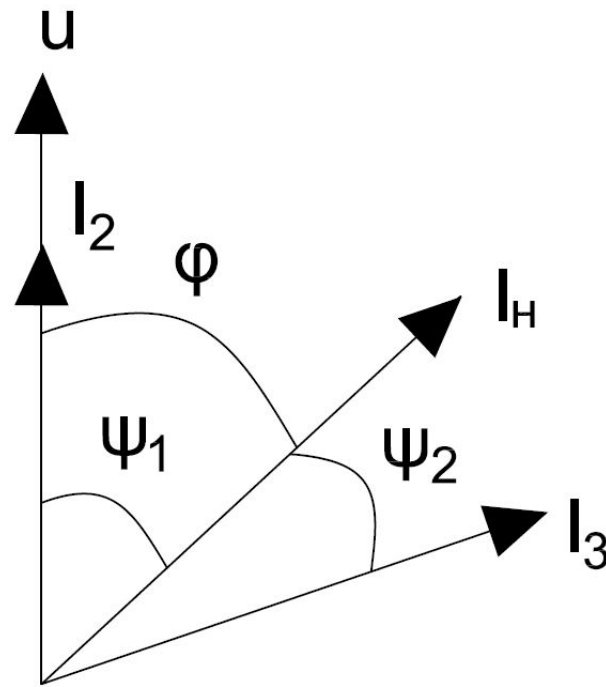


1 – неподвижная обмотка,
2,3 – неподвижные обмотки,
жестко связанные между собой,
 M_1 - от взаимодействия
магнитных потоков токов I_H и I_2 ,
 M_2 - от взаимодействия
магнитных потоков токов I_H и I_3 ,
 M_1 и M_2 противоположны.



- ⊙ $M_1 = k_1 * I_H * I_2 * \cos\psi_1 * f_1(\alpha),$
- ⊙ ψ_1 - угол между векторами I_H и I_2 .
- ⊙ $M_2 = k_2 * I_H * I_3 * \cos\psi_2 * f_2(\alpha),$
- ⊙ ψ_2 - угол между векторами I_H и I_3 .
- ⊙ Если $M_1 = M_2,$
- ⊙ $k_1 * I_H * I_2 * \cos\psi_1 * f_1(\alpha) = k_2 * I_H * I_3 * \cos\psi_2 * f_2(\alpha),$
- ⊙ $\frac{I_2 * \cos\psi_1}{I_3 * \cos\psi_2} = \frac{k_2 * f_2(\alpha)}{k_1 * f_1(\alpha)} = f_3(\alpha).$

⊙ Векторная диаграмма:



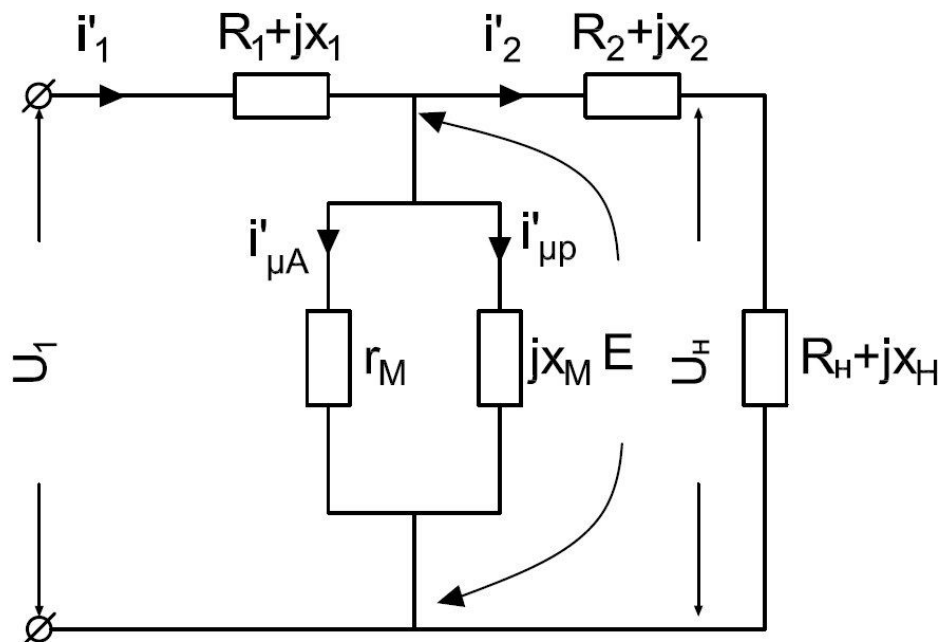
- ⊙ α пропорционален отношению проекций векторов I_2 и I_3 на I_H . Значит при изменении φ : $\alpha \equiv \varphi.$

The left side of the slide features a decorative vertical band with several thin, parallel lines in shades of light blue and white. To the right of these lines are five circles of varying sizes, also in shades of light blue, arranged in a descending, staggered pattern from top to bottom.

ЛЕКЦИЯ №8

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ТОКА

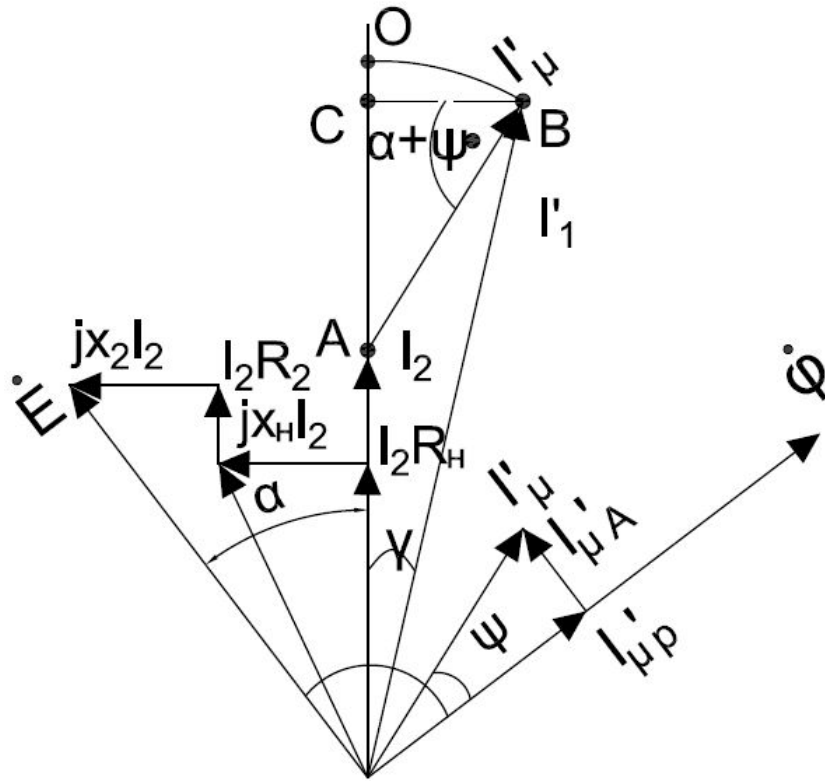
- Назначение: для гальванического разделения первичных и вторичных цепей (для обеспечения ТБ) и для унификации измерительных приборов.
- $I_{2\text{НОМ}} = 1$ и 5 А. Соответственно приборы имеют такие номинальные токи. Это сокращает номенклатуру приборов.
- Схема замещения:



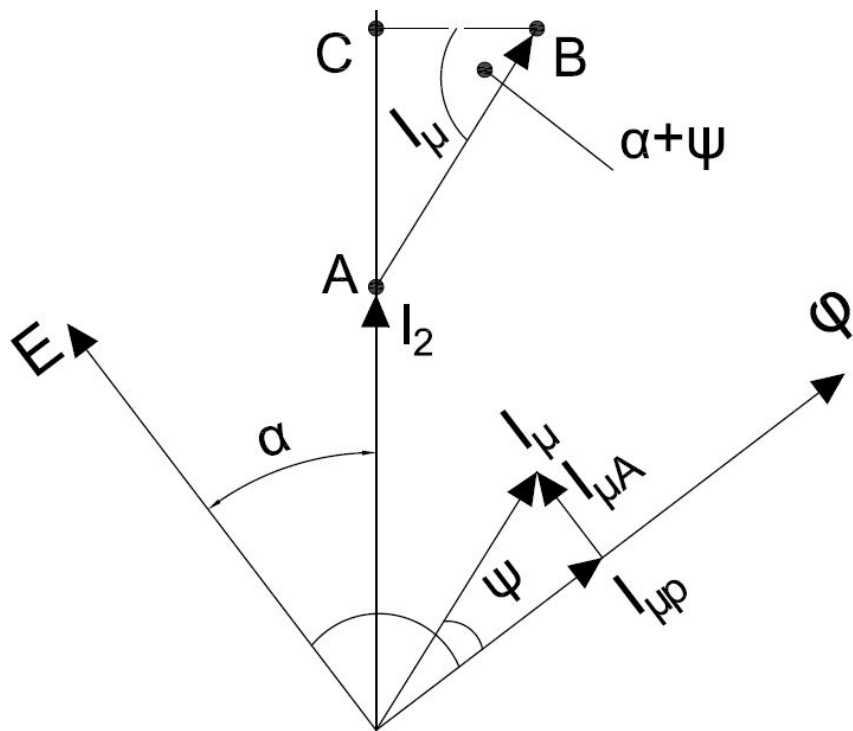
$$i_1 = i_2 + i_\mu$$
$$\psi = f(i_\mu)$$



Векторная диаграмма:



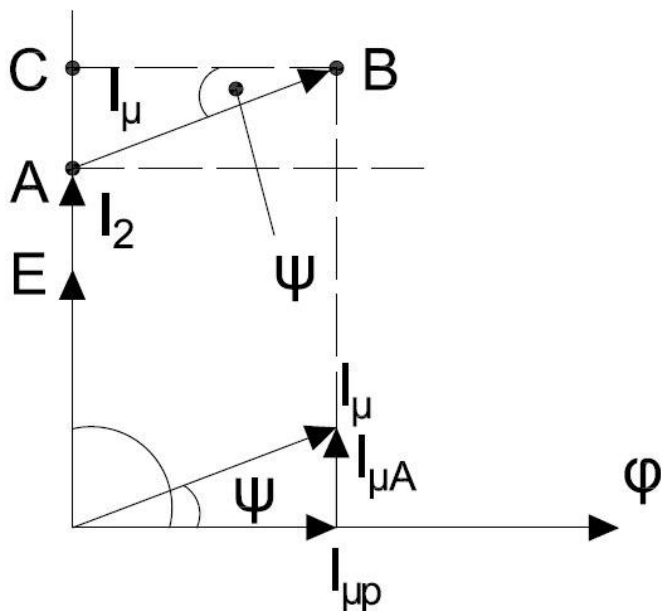
- I_2 задается произвольно;
- $I_{\mu A}$ - активный (тратится на нагревание сердечника);
- $I_{\mu P}$ - реактивный (тратится на создание Φ , совпадает с Φ).



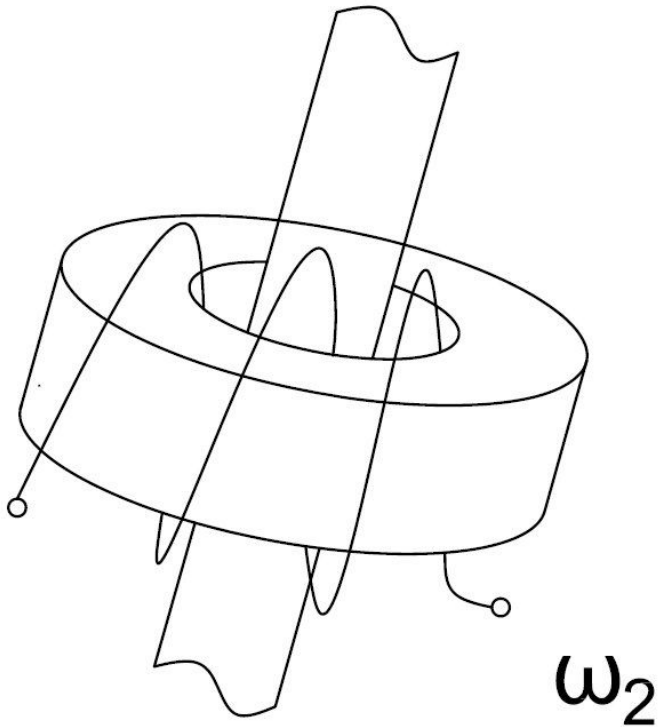
Почему угол $\angle CBA = \alpha + \psi$?

Развернем E по часовой стрелке, чтобы E совпадал с вертикальной линией, т. е. на угол α по часовой стрелке.

Тогда угол $\angle CBA$ стал равен ψ .
Значит до поворота он был равен $\alpha + \psi$.



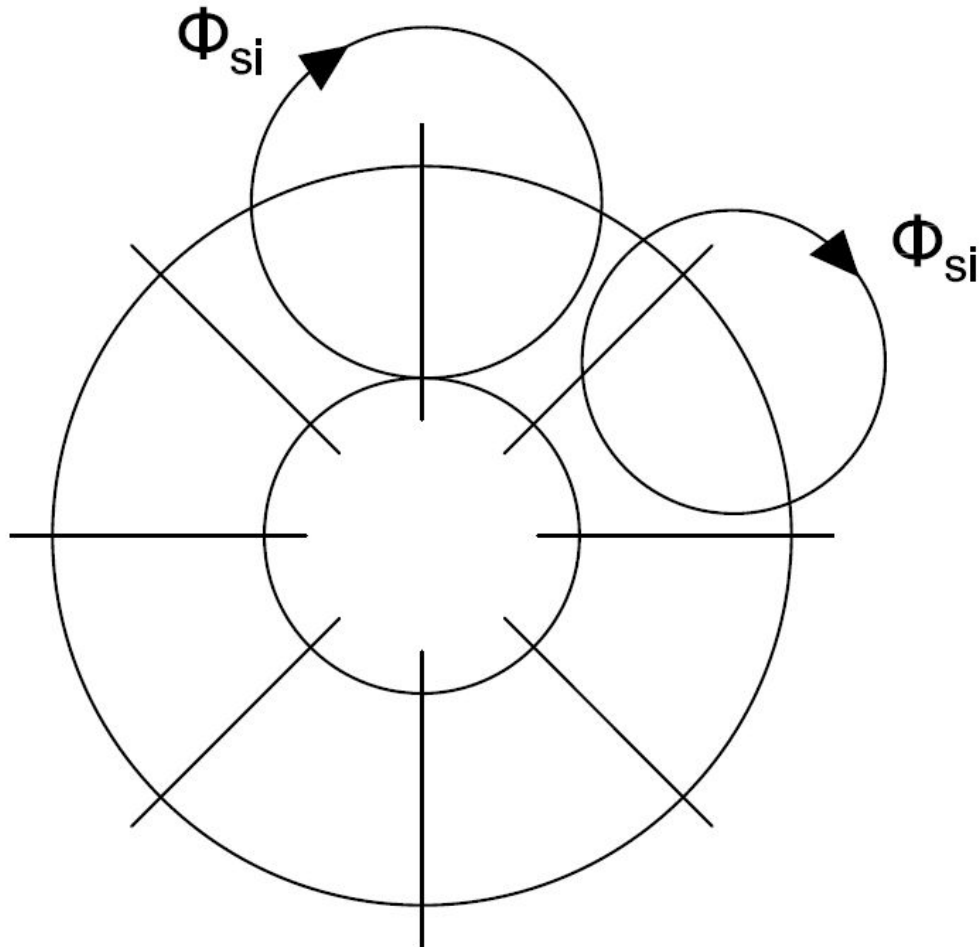
- ▣ I_μ совпадает с Φ , если пренебречь потерями в стали.
- I_μ опережает Φ . Это связано с потерями в стали.
- При $i_1 \geq 200$ А первичная обмотка – часть шины, проходящая через окно магнитопровода. При этом $R_1 + jx_1 \rightarrow 0$.
- Сердечник из холоднокатаной стали



$x_2 \rightarrow 0$, если сердечник тороидален и W_2 распределяется равномерно.

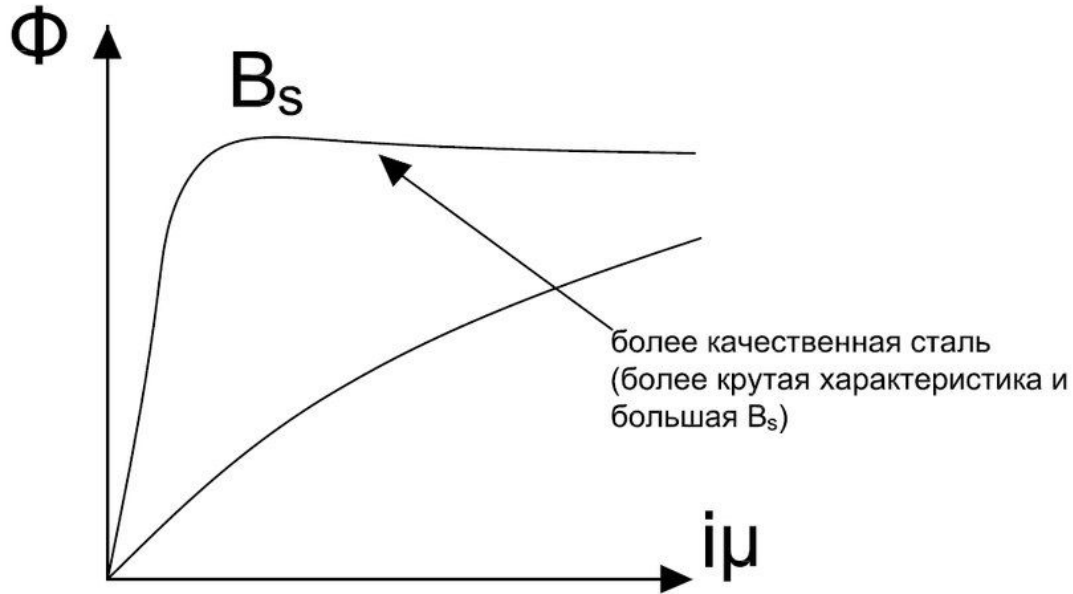


- ⦿ При протекании тока наводится $\Phi_{\text{серд}}$ и Φ_s . Φ_{si} направлены встречно и взаимно уничтожаются.
- При других конструкциях Φ_s и X_2 не равны 0.



ПОГРЕШНОСТИ ТТ

- Обусловлены ответвлением I_μ из I_1 и определяются ИМ.



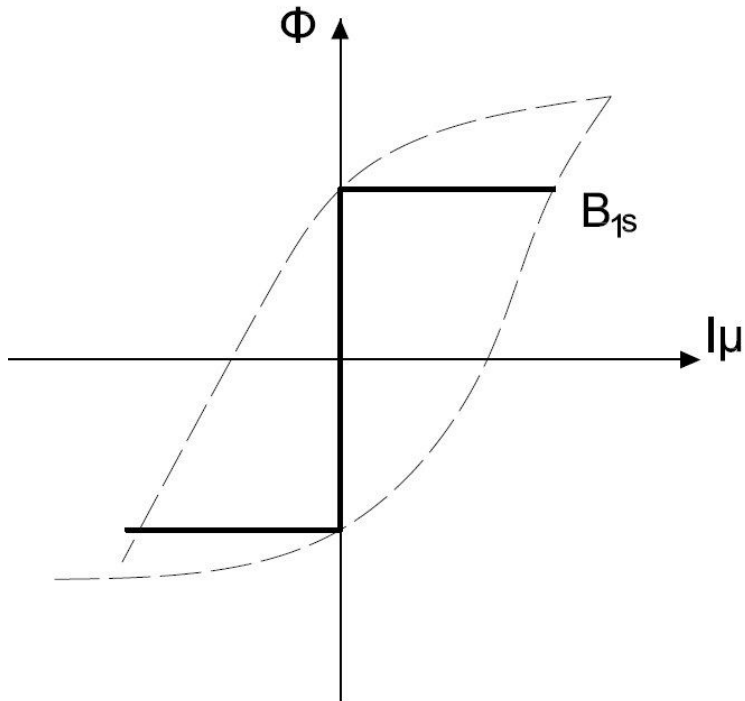
- При $n_{ТА} \uparrow \rightarrow i_2 \downarrow \rightarrow U_2 \downarrow \rightarrow E \downarrow \rightarrow B \downarrow \rightarrow I_\mu \downarrow$,
- При $R_H \uparrow \rightarrow U_2 \uparrow \rightarrow E \uparrow \rightarrow B \uparrow \rightarrow I_\mu \uparrow$,
- При $S_{серд} \uparrow \rightarrow R_{магн} \downarrow \left(R_M = \frac{H \cdot l}{\Phi} = \frac{H \cdot l}{S \cdot B} \right) \rightarrow I_\mu \downarrow$ (для создания того же Φ),
- $R_M = \frac{F}{\Phi}$,
- При $n \uparrow \rightarrow$

$$I \cdot W = H \cdot l$$

ТОКОВАЯ ПОГРЕШНОСТЬ

$$\begin{aligned} \square \circ f_i &= \frac{I_2 - I_1/n_{TA}}{I_1/n_{TA}} * 100\% = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} * 100\% = \frac{|I_{2д}| - |I'_{1д}|}{|I'_{1д}|} * 100\% = \\ &= \text{ОА на векторной диаграмме} = \frac{I_\mu}{I_1} * \sin(\alpha + \psi) * 100\% \end{aligned}$$

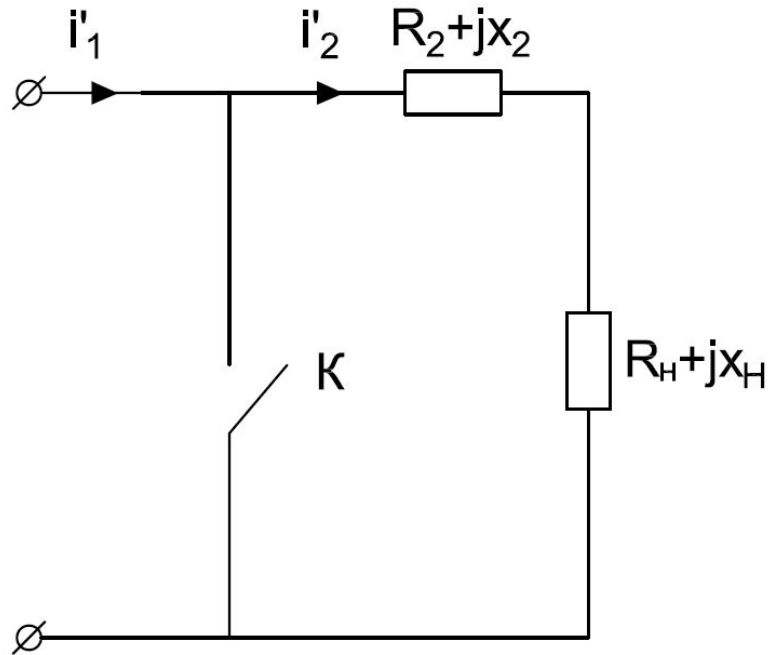
- γ – угловая погрешность
- ПХН – аппроксимация



При этом погрешность до 10% по сравнению с реальной.



❏ Схема замещения изменяется:



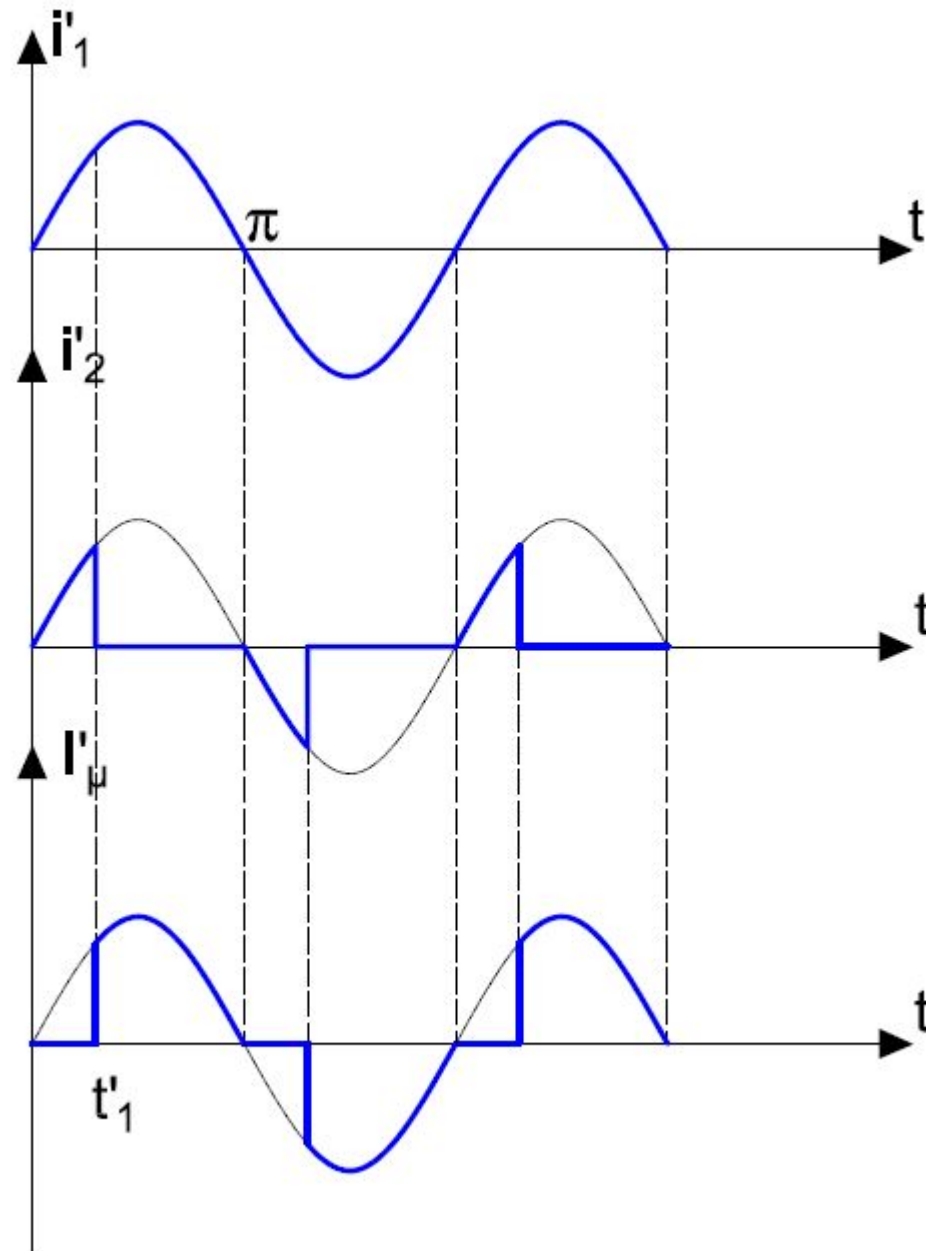
При $V < V_s$ К разомкнут
При $V = V_s$ К замкнут

Пока ТТ не вошел в насыщение, i_1 и i_2 совпадают, т.к. ключ разомкнут. Пусть при $t = t_1$ сердечник насытился. f_i будет определяться моментом t_1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < t < t_1 \text{ (ключ разомкнут)} \quad I'_1 = I_2, I_\mu = 0, \\ t_1 < t < \pi \text{ (ключ замкнут)} \quad I'_1 = I_\mu, I_2 = 0. \end{array} \right.$$



Чисто активная нагрузка (при I_1 синусоида,
при I_2 не синусоида)



- ❑ Если правильно выбраны W_2, S, R_H , ТТ не насыщается и f_i очень мала. Если параметры ТТ выбраны неправильно, то ТТ насытится, будет велика f_i и устройства, подключенные к ТТ, будут работать неправильно.
- Если I_μ и I_2 не синусоидальны, значит есть высшие гармоники и формула для погрешности не совсем справедлива, т.к. учитывает действующие значения синусоидальных токов.



- ⦿ Полная погрешность ТТ учитывает мгновенные значения токов:

- ⦿
$$\varepsilon = \frac{100\%}{I'_{д1}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t (i_2 - i'_1)^2 dt},$$

- ⦿ $I'_{д1}$ - действующее значение приведенного первичного тока,

- ⦿
$$I'_{д1} = \frac{I_{д1}}{n_{ТА}},$$

- ⦿ ε – отрезок АВ на векторной диаграмме.

- ⦿ Эта формула позволяет анализировать влияние высших гармоник на погрешность, т.к. под знаком интеграла расположены мгновенные значения токов.



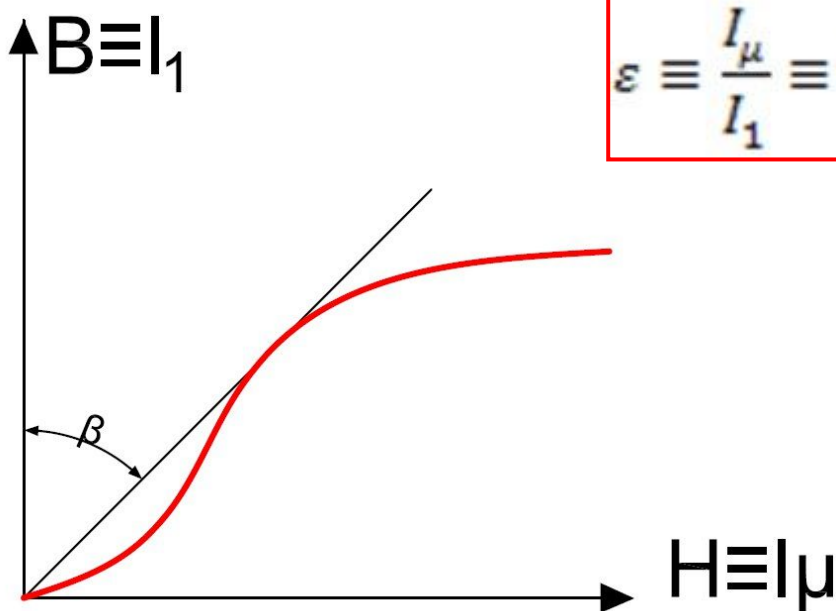
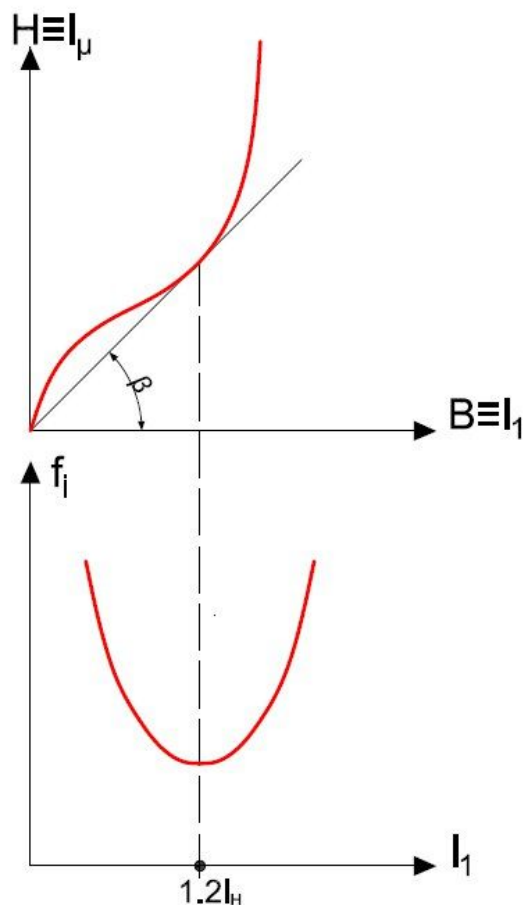
ТТ имеют разные классы точности:

Для измерительных приборов

0,2 0,5 1,0 3,0 5,0 10

Для РЗ класс точности Р или Д.

Класс точности соответствует предельной токовой погрешности при $I_1 = (1,0 - 1,2) \cdot I_{1\text{НОМ}}$.



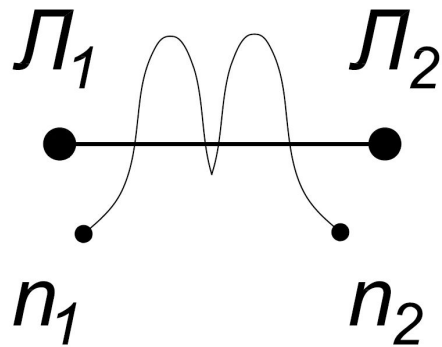
$$\varepsilon \equiv \frac{I_\mu}{I_1} \equiv \operatorname{tg} \beta$$



- Для аварийных режимов ТТ для измерительных приборов не должны обеспечивать класс точности. Для РЗ наоборот.

- Обозначение ТТ – ТА

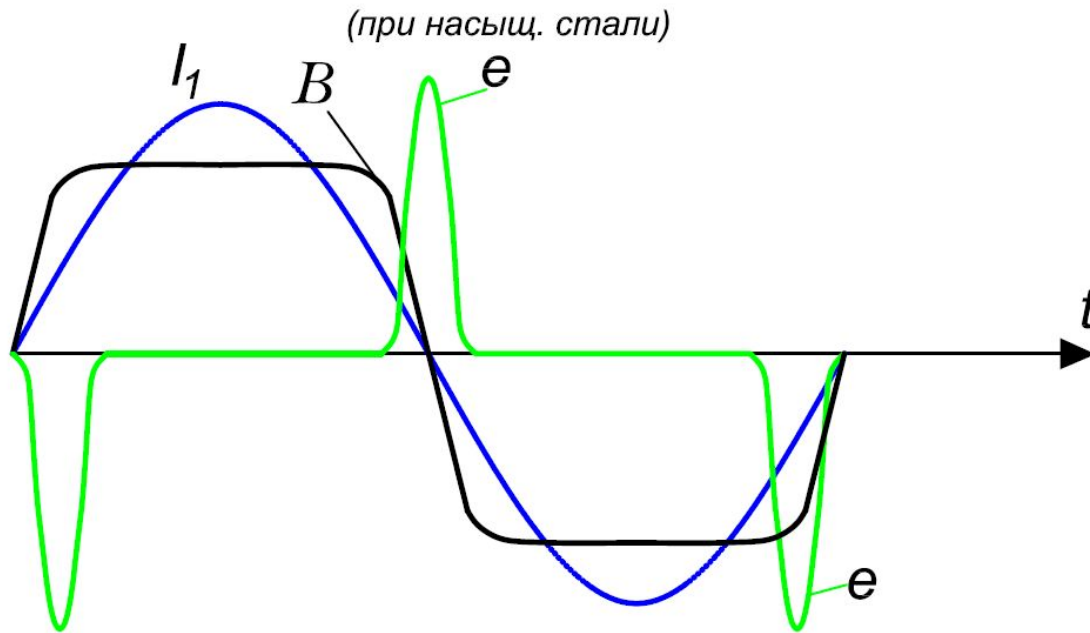
- На схеме:



- ТТ работает в режиме КЗ ($z_{\text{наг}}$ очень мало). $\uparrow z_{\text{наг}} \rightarrow \uparrow f_i$.



- ❑ В режиме ХХ могут быть неприятности:
 - $\uparrow U_2$, пробой изоляции.
 - $\uparrow B \rightarrow \uparrow i_{\text{вихр}}$ в сердечнике $\rightarrow \uparrow$ нагрев сердечника.



$$e = - \frac{d\psi}{dt},$$

$$\psi = W * \Phi,$$

$$\Phi = B * S.$$

Перед размыканием вторичной обмотки, чтобы снять прибор, надо замкнуть W_2 перемычкой.

