Измерение тока и напряжения

Сигналы тока и напряжения характеризуются исключительно широкими областью частот, и диапазонами измеряемых значений :

от 10^{-14} до 10^{6} А для токов; от долей мкВ до сотен кВ для напряжений.

Существует большое многообразие форм сигналов переменных токов и напряжений.

Как правило, источники сигналов имеют малую мощность, что предъявляет жесткие требования к входному импедансу амперметров и вольтметров.

Электрические сигналы в виде напряжения или тока характеризуются:

1. Мгновенное значение:

При синусоидальной форме сигнала:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \qquad u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

I_m и U_m – амплитудные (пиковые) значения сигнала,

ωt – фаза,

ϕ - начальная фаза.

2. средневыпрямленное значение тока (напряжения) –

среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$I_{св} = \frac{1}{T}\int_0^T |i|dt \qquad U_{св} = \frac{1}{T}\int_0^T |u|dt$$

T – период измеряемого сигнала

Мощность электрического сигнала в каждый момент времени определяется квадратом мгновенного значения тока.

Поэтому для характеристики *энергетического уровня* сигнала вводится параметр - среднеквадратическое значение тока (напряжения).

3. Среднеквадратическое значение тока (напряжения):

$$I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} \qquad U_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 dt}$$

Коэффициент амплитуды (коэффициент пиковости, пик-фактор)

$$k_a = \frac{I_m}{I_{ск}} = \frac{U_m}{U_{ск}}$$

Коэффициент формы (форм – фактор)

$$k_ф = \frac{I_{ск}}{I_{св}} = \frac{U_{ск}}{U_{св}}$$

Коэффициент усреднения :

$$k_y = k_a \cdot k_ф = \frac{I_m}{I_{св}} = \frac{U_m}{U_{св}}$$

Для синусоидального сигнала:

$k_a = 1{,}41$

$k_ф = 1{,}11$

$k_y = 1{,}5$

Эти коэффициенты позволяют определить любой параметр переменного тока (напряжения), если известен один из параметров и форма сигнала.

Сигналы несинусоидальной формы (в т. ч. с постоянной составляющей) – кроме СК и СВ значений , характеристиками являются: максимальное, минимальное и среднее значения сигнала.

I_{max} (U_{max}) – наибольшее мгновенное значение сигнала за определенный интервал времени (обычно за период)

I_{min} (U_{min}) – наименьшее мгновенное значение сигнала за определенный интервал времени (обычно за период)

Imax - Imin размах сигнала ***Umax - Umin размах сигнала***

Среднее значение сигнала характеризует его постоянную составляющую:

$$I_{cp} = \frac{1}{T}\int_0^T idt$$

$$U_{cp} = \frac{1}{T}\int_0^T udt$$

Для измерения тока и напряжения используются методы непосредственной оценки и сравнения.

- **Метод непосредственной оценки – применяются амперметры и вольтметры прямого преобразования.**

- **Метод сравнения реализуется с помощью потенциометров (компенсаторов), а также в цифровых вольтметрах.**

Классификация приборов для измерения тока и напряжения

Приборы для измерения силы тока образуют подгруппу А — амперметры.

Внутри этой подгруппы выделяют:

- **амперметры постоянного тока (А2),**
- **переменного тока (А3),**
- **универсальные (А7),**
- **преобразователи тока (А9).**

классы точности:

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4 и 5

Приборы для измерения напряжения образуют подгруппу В – вольтметры.

Среди приборов этой подгруппы выделяют:

- **вольтметры постоянного тока (В2),**
- **переменного тока (В3),**
- **импульсного тока (В4),**
- **фазочувствительные (В5),**
- **селективные (В6),**
- **универсальные (В7),**
- **измерители отношения, разности и нестабильности напряжений (В8),**
- **преобразователи напряжений (В9).**

классы точности

0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4; 5; 6; 10; 15 и 25

Измерение тока и напряжения электромеханическими приборами

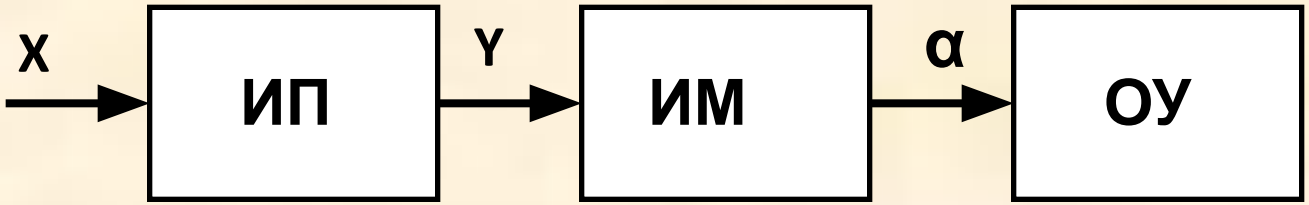
Электромеханические приборы, применяются для измерения *постоянных* токов и напряжений, а также переменных токов и напряжений *низкой частоты.*

Кроме того, они (особенно магнитоэлектрические) могут использоваться *в качестве ИУ* электронных аналоговых приборов.

Общие сведения об электромеханических приборах

Электромеханические приборы являются приборами прямого преобразования.

Типовая структурная схема электромеханического прибора в общем случае содержит измерительный преобразователь ИП, измерительный механизм ИМ и отсчетное устройство ОУ.



Электро – механический измерительный механизм - основной элемент электро-механического прибора.

В нем происходит преобразование электромагнитной энергии в механическую энергию углового перемещения подвижной части механизма.

В зависимости от принципа действия

(т.е. по способу преобразования электрической энергии в механическую) различают основные системы ИМ для измерения тока и напряжения:

1. Магнитоэлектрические ИМ (МЭИМ) (буквенное обозначение ИП - М)

2. Электродинамические ИМ (ЭДИМ) (буквенное обозначение ИП - Д);

3. Электромагнитные ИМ (ЭМИМ) (буквенное обозначение ИП - Э);

4. Электростатические ИМ (ЭСИМ) (буквенное обозначение ИП - С);

Электромеханический ИМ (ЭИМ) прибора прямого преобразования состоит из неподвижной, соединенной с корпусом прибора, и подвижной частей.

Неподвижная часть в зависимости от системы ЭИМ состоит из постоянного магнита (МЭИМ), катушек с токами (ЭДИМ, ЭМИМ), заряженных камер (ЭСтИМ).

Подвижная часть (рамки с медной обмоткой, катушки, ферромагнитные сердечники, заряженные пластины) механизма механически или оптически связана с отсчетным устройством.

Отсчетное устройство состоит из указателя жестко связанного с подвижной частью ИМ и неподвижной шкалы прибора. Указатель может быть стрелочным или световым.

Эл-Мех ИМ могут иметь корректоры, предназначенные для установки стрелки отсчетного устройства на нуль.

На шкалу прибора наносится совокупность отметок (ГОСТ 23217 78 «Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения».)

Цена деления шкалы согласовывается с абсолютной погрешностью прибора и превышает ее в 2-4 раза.

Область значений шкалы, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы, определяет **диапазон показаний прибора**. Область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности прибора, определяет **диапазон измерений прибора.**

Для равномерных и неравномерных шкал оба диапазона одинаковы.

Для сильно неравномерных шкал диапазон измерений меньше диапазона показаний. В этом случае начало и конец диапазона измерений **маркируются точками у соответствующих отметок шкалы.**
Класс точности прибора гарантируется только в диапазоне измерений.

Кроме того, на шкалу Эл.- Мех. ИП наносится информация:

- **единицы измерения,**
- **класс точности прибора,**
- **условное обозначение измерительной системы прибора,**
- **количество ИМ,**
- **степень защищенности от внешних магнитных и электрических полей,**
- **род тока и число фаз,**
- **рабочее положение прибора,**
- **испытательное напряжение,**
- **тип прибора и т.п.**

Принцип работы электромеханического измерительного механизма

Вращающий момент для любой конструкции ЭИМ определяется из общего уравнения динамики системы – момент, действующий в системе, определяется через изменение энергии W:

$$M_{вр} = \frac{\partial W}{\partial \alpha}$$

α - угловое перемещение подвижной части (угол поворота).

Противодействующий момент $M_п$ (создается пружинами, растяжками)

$$M_п = k_п \cdot \alpha$$

$k_п$ – удельный противодействующий момент

$$M_{вр} = M_п \Rightarrow \frac{\partial W}{\partial \alpha} = k_п \cdot \alpha \Rightarrow \alpha = \frac{1}{k_п}\frac{\partial W}{\partial \alpha}$$

Если $M_п$ создается за счет электрических сил (в ЭМИМ и ЭДИМ), то движение подвижной части прекращается при равенстве двух моментов противоположного направления:

$M_1 = k_1 \cdot f_1(\alpha) \cdot x_1$ *вращающий момент*

$M_2 = k_2 \cdot f_2(\alpha) \cdot x_2$ *противодействующий момент*

x_1, x_2 – электрические измеряемые величины

k_1, k_2 – удельные вращающие и противодействующие моменты

$$M_1 = M_2 \Rightarrow \frac{f_1(\alpha)}{f_2(\alpha)} = \frac{k_2 \cdot x_2}{k_1 \cdot x_1} \Rightarrow \alpha = f\left(\frac{x_2}{x_1}\right)$$

Приборы, измеряющие отношение двух величин, называются **логометрами.**

Для сокращения времени установления показаний в Эл-Мех. ИП применяются специальные устройства - **успокоители.**

Они создают вращающий момент Му.

Этот момент всегда направлен навстречу движению и пропорционален угловой скорости отклонения.

$$M_y = k_y \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

K_y - коэффициент успокоения (демпфирования).

- **воздушные успокоители** – торможение за счет сопротивления воздуха
- **магнитоиндукционные успокоители** – взаимодействие поля постоянного магнита и вихревых токов, индуцированных при перемещении в поле постоянного магнита (принцип Ленца)
- **жидкостные успокоители** с большим значением ky.

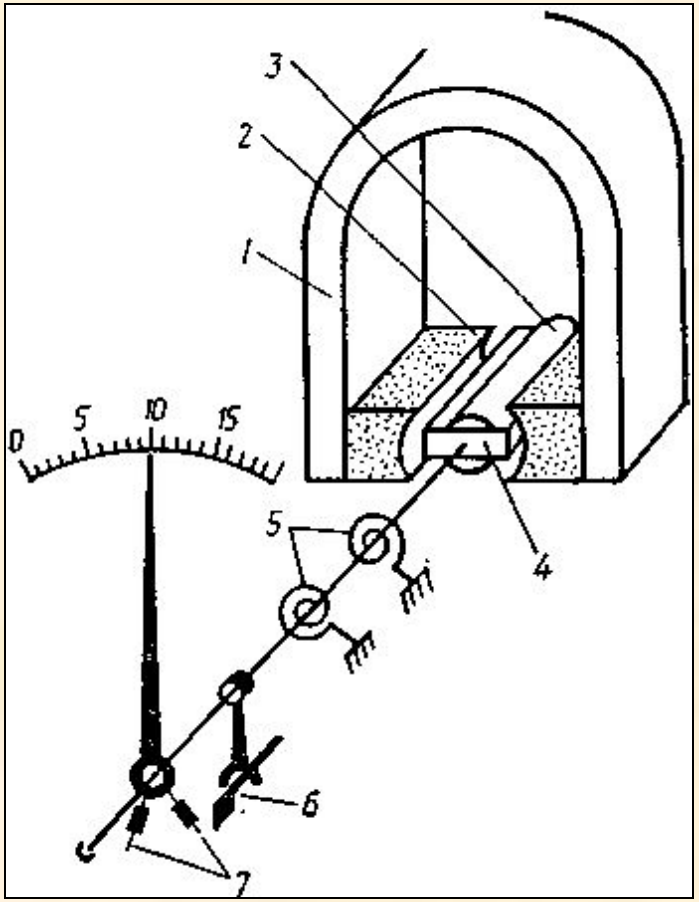
Магнитоэлектрические измерительные приборы

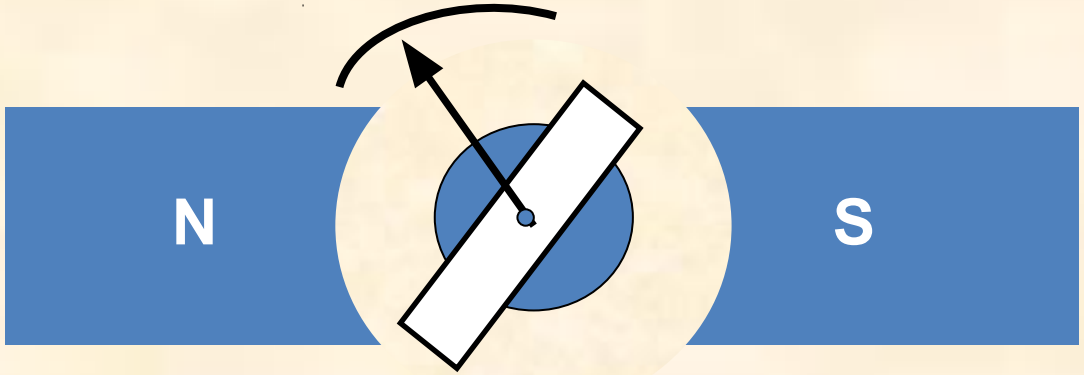
В МЭ ИП вращающий момент в измерительном механизме создается *за счет взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля проводника с током*, конструктивно выполняемого в виде катушки (рамки).

Как правило, неподвижной частью является магнит, а подвижной — катушка.

Неподвижные постоянный магнит с полюсными наконечниками с цилиндрической расточкой + ферромагнитный цилиндрический сердечник образуют магнитную систему МЭИМ.

Магнитная индукция в воздушном зазоре, где вращается катушка, постоянна по величине, а силовые линии магнитного поля ориентированы по радиусу цилиндра.





Энергия магнитоэлектрической системы, сосредоточенная в механизме и вызывающая вращательный момент, равна:

$$W_{\Sigma} = W_{м} + W_{к} + W_{вз}$$

$W_{м}$ — **энергия магнитного поля постоянного магнита**

$$W_{к} = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

энергия катушки с током

$$W_{вз} = \Phi \cdot I$$

энергия взаимодействия поля магнита и катушки с током,
Ф - магнитный поток, сцепленный с катушкой

$$M_{в} = \frac{\partial W}{\partial \alpha}$$

Магнитный поток, сцепленный с катушкой, для системы с равномерным радиальным магнитным полем:

$$\Phi = B \cdot S \cdot w \cdot \alpha$$

B – магнитная индукция в зазоре;
S – площадь поперечного сечения катушки;
w – число витков катушки.

$$M_в = B \cdot S \cdot w \cdot I$$

$$M_п = k_п \cdot \alpha$$

$k_п$ – коэффициент жесткости пружины

$$M_в = M_п$$

$$B \cdot S \cdot w \cdot I = k_п \cdot \alpha$$

$$\alpha = \frac{B \cdot S \cdot w}{k_n} \cdot I = S_I \cdot I$$

$$S_I = \frac{B \cdot S \cdot w}{k_n}$$

- чувствительность МЭИМ к току.

$$\alpha = \frac{B \cdot S \cdot w}{k_n} \cdot I = S_I \cdot I$$

- **угол отклонения подвижной части (стрелки) МЭИМ прямо пропорционален току;**

- **чувствительность механизма постоянна, т.е. шкала равномерная;**

- **МЭИМ реагирует *только на постоянный ток*, а при включении в цепь переменного тока вследствие инерционности подвижной части стрелка будет совершать колебательные движения только на низких частотах.**

Достоинства МЭИМ:

- высокая чувствительность (пределы измерения до 10 мкА);
- малое потребление мощности от ИЦ (10-2 – 10-6 Вт);
- равномерная шкала;
- небольшие погрешности измерения (вплоть до класса точности 0,05)

Недостатки:

- малая перегрузочная способность;
- сравнительная сложность (особенно ремонта)

Внешние факторы - наибольшее влияние оказывает температура, при изменении которой изменяются магнитная индукция и сопротивление катушки.

Магнитоэлектрические логометры

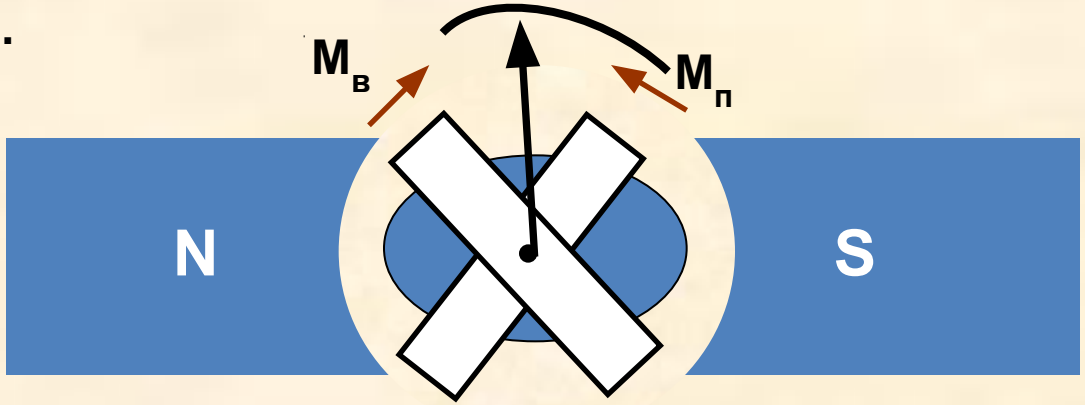
Измерительный механизм - две подвижные катушки, жестко скрепленные на общей оси.

По обмоткам катушек протекают токи I_1 и I_2.

Направление токов в катушках выбирается так,

чтобы создаваемые ими моменты ($M_в$ и $M_п$)

имели встречные направления.



Особенность магнитоэлектрического логометра – неподвижный сердечник имеет эллипсоидальную форму

магнитная индукция B = B(α).

Это обеспечивает зависимость моментов от угла α при отсутствии спиральных пружин.

В магнитоэлектрических логометрах:

$$M_в = B_1(\alpha) \cdot w_1 \cdot S_1 \cdot I_1 \qquad M_п = B_2(\alpha) \cdot w_2 \cdot S_2 \cdot I_2$$

$$M_в = M_п \Rightarrow B_1(\alpha) \cdot w_1 \cdot S_1 \cdot I_1 = B_2(\alpha) \cdot w_2 \cdot S_2 \cdot I_2$$

$$\frac{B_1(\alpha)}{B_2(\alpha)} = \frac{w_2 \cdot S_2}{w_1 \cdot S_1} \cdot \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow f(\alpha) = k \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

Отклонение стрелки пропорционально отношению токов в катушках.

Измерение тока на радиочастотах

Используются электромеханические приборы, дополненные преобразователями рода тока.

Все высокочастотные аналоговые амперметры, являются приборами прямого преобразования и представляют собой комбинацию преобразователя переменного тока в постоянный и магнитоэлектрического измерительного прибора (МЭИП).

В зависимости от типа преобразователя имеются следующие разновидности амперметров:

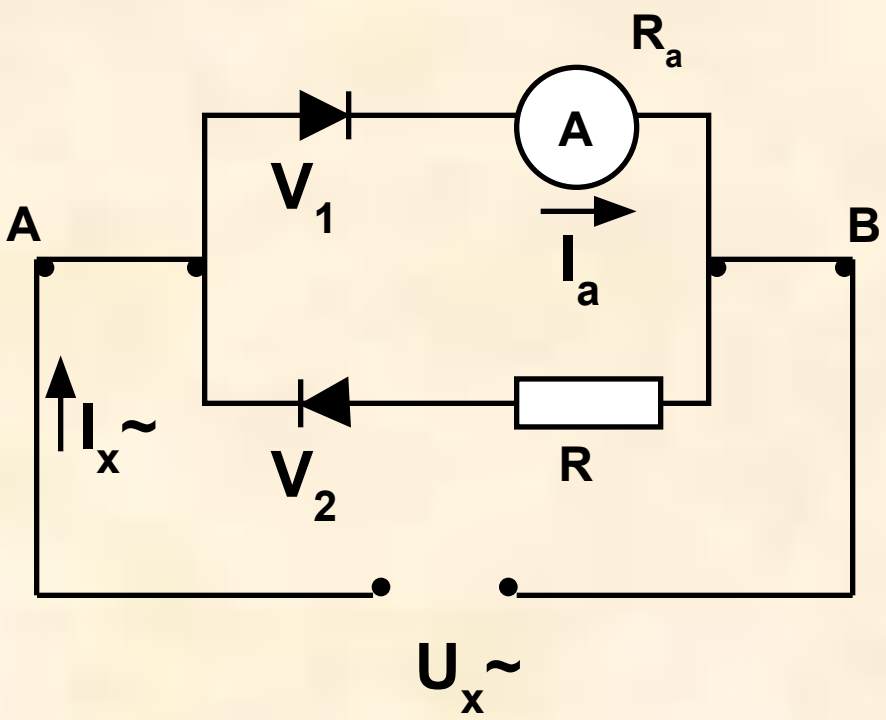
- ***выпрямительные,***
- ***термоэлектрические,***
- ***фотоэлектрические***
- ***электронные***

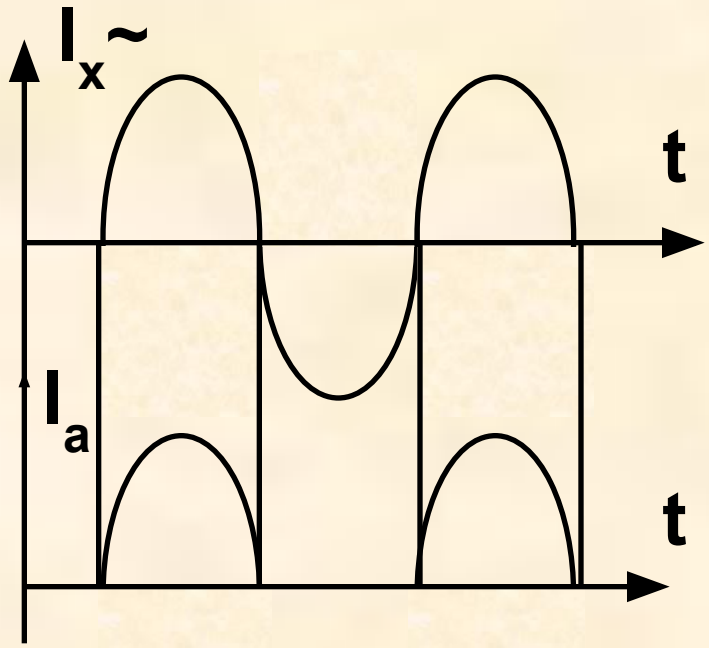
Выпрямительные амперметры

В качестве преобразователей на низких частотах используют полупроводниковые диоды.

В зависимости от схемы соединения МЭИМ с выпрямителем различают амперметры с однополупериодным и двухполупериодным выпрямлением.

Однополупериодная схема





$M_{вт} = B_0 \cdot w \cdot S \cdot i$ мгновенный вращающий момент

$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ мгновенное значение тока

$$\alpha = \frac{B_0 \cdot S \cdot w}{k_n} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t + \varphi) dt =$$

$$= \frac{B_0 \cdot S \cdot w}{k_n} \cdot \frac{I_{CB}}{2} = S_{IB} \cdot \frac{I_{CB}}{2}$$

$$S_{IB} = \frac{B_0 \cdot S \cdot w}{k_n}$$

чувствительность выпрямительного амперметра.

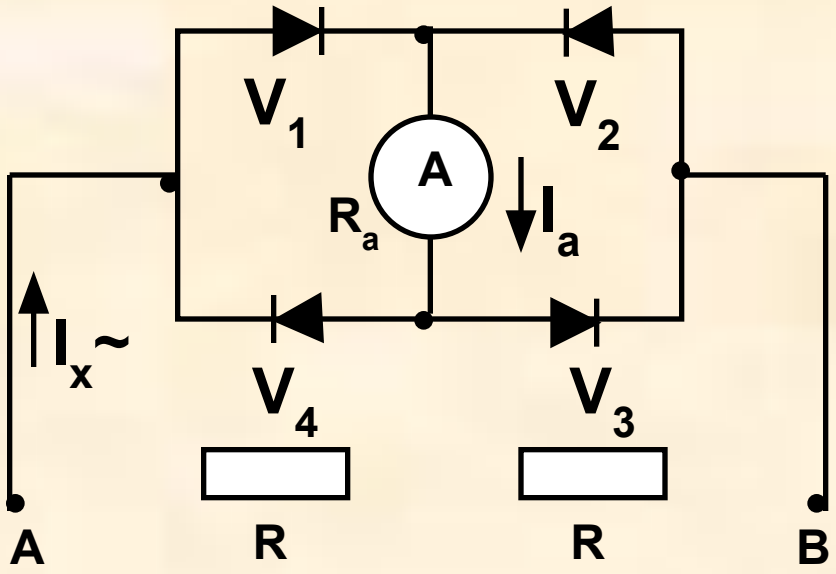
$$\alpha = S_{IB} \cdot \frac{I_{CB}}{2}$$

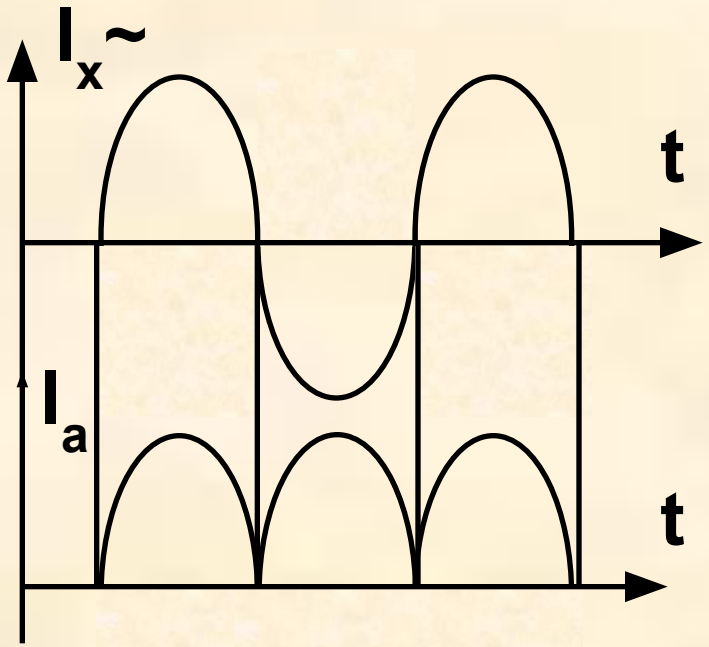
Выпрямительные амперметры измеряют средневыпрямленное значение тока.

$$k_ф = \frac{I_{CK}}{I_{CB}}$$

$$\alpha = \frac{S_{IB}}{2k_ф} \cdot I_{CK}$$

Двухполупериодная схема





$U_x\sim$

$$\alpha = S_{IB} \cdot I_{CB} = \frac{S_{IB}}{k_\phi} \cdot I_{CK}$$

чувствительность увеличивается вдвое.

Источники погрешностей выпрямительных амперметров :

- зависимость коэффициента выпрямления диода от температуры;
- изменение формы измеряемого тока;
- погрешности градуировки амперметра;
- изменение емкостного сопротивления диодов в зависимости от частоты

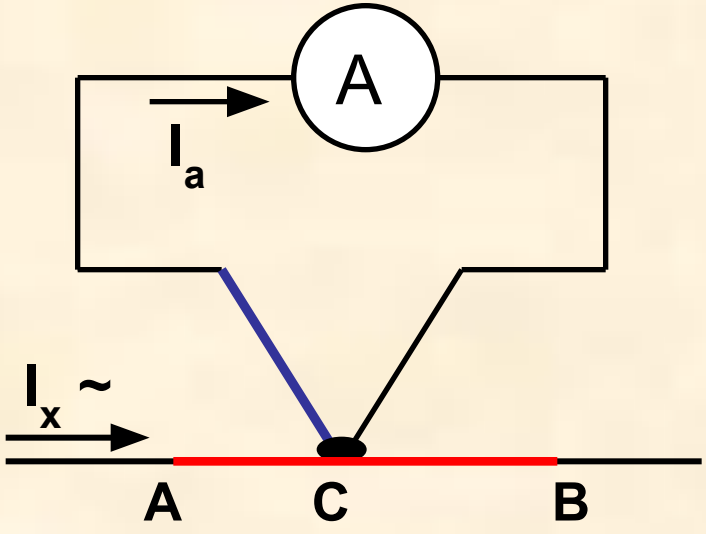
Погрешность ± (1,5 – 4) %

С повышением частоты погрешность возрастает.

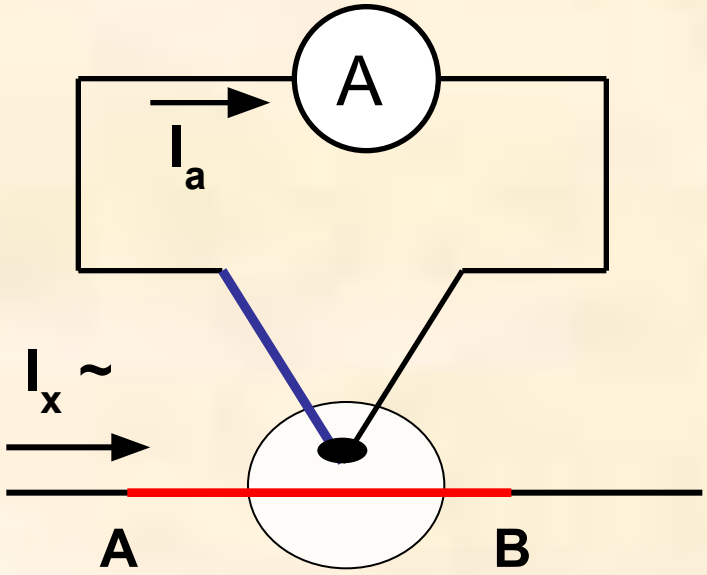
Используются в диапазоне до 2 кГц, а с частотной коррекцией – до нескольких десятков кГц.

Термоэлектрические амперметры

В термоэлектрических амперметрах переменный ток преобразуется в постоянный и измеряется с помощью магнитоэлектрического прибора высокой чувствительности.



Контактный ТЭ преобразователь



Бесконтактный ТЭ преобразователь

Разность температур спая и свободных концов термопары вызывает термо-ЭДС (эффект Зеебека).

Термо-ЭДС пропорциональна количеству теплоты, выделенному протекающим током, т.е. пропорциональна квадрату среднеквадратического значения - $I_{ск}$.

$$E_T = K_T \cdot I_{xCK}^2$$

Ток, протекающий через прибор, равен: $$I_a = \frac{E_T}{R_a + R_T}$$

С учетом того, что $$\alpha = S_I \cdot I_a$$

$$\alpha = \frac{S_I \cdot K_T}{R_a + R_T} \cdot I_{xCK}^2 = S_{IT} \cdot I_{xCK}^2$$

$$\alpha = S_{IT} \cdot I^2_{xCK}$$

S_{IT} - **чувствительность термоэлектрического амперметра**

т.е. шкала квадратичная,

а показания не зависят от вида измеряемого тока.

Диапазон измерений - от мА до десятков А.

Источники погрешностей:

- изменение окружающей температуры;
- частотная зависимость сопротивления нагревателя.

Достоинство:

- возможность измерения тока в широком частотном диапазоне (более 100 МГц) при погрешности от 2 до 5 %.

Недостатки:

- малая чувствительность;
- неравномерность шкалы;
- зависимость показаний от температуры окружающей среды;
- недопустимость перегрузок;
- значительная тепловая инерционность

Фотоэлектрические амперметры

Под действием измеряемого тока Iх нагревается нить измерительной лампы .

Световой поток, излучаемый лампой, преобразуется в фотоэлементе в электрический ток, усиливается и регистрируется магнитоэлектрическим амперметром, проградуированным в среднеквадратических значениях $I_{ск}$.

Достоинства:

- **высокая точность благодаря возможности их градуировки на постоянном токе или токе низкой частоты (а применяют на высоких частотах).**

Недостатки:

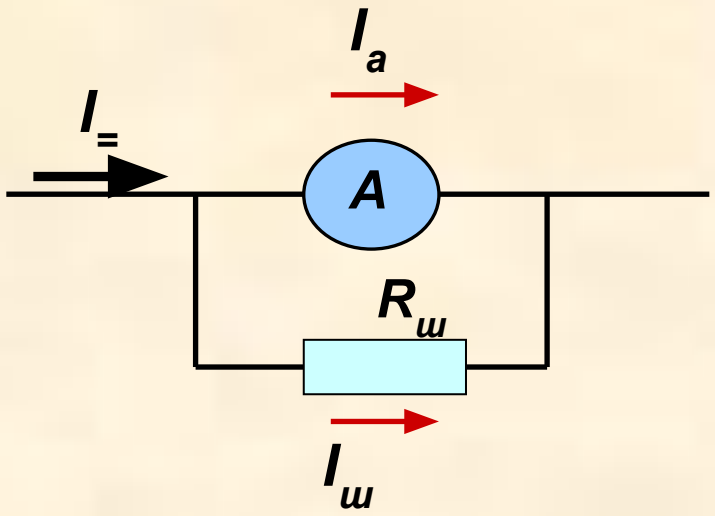
- **большие размеры;**
- **частая градуировка из-за изменения чувствительности фотоэлемента со временем.**

На основе фотоэлектрических амперметров создаются поверочные установки;

создан гос. специальный эталон единицы силы переменного тока.

Расширение пределов измерений амперметров

На постоянном токе – шунты.



$$I_{ш} \cdot R_{ш} = I_a R_a$$

$$I_{=} = I_a + I_{ш}$$

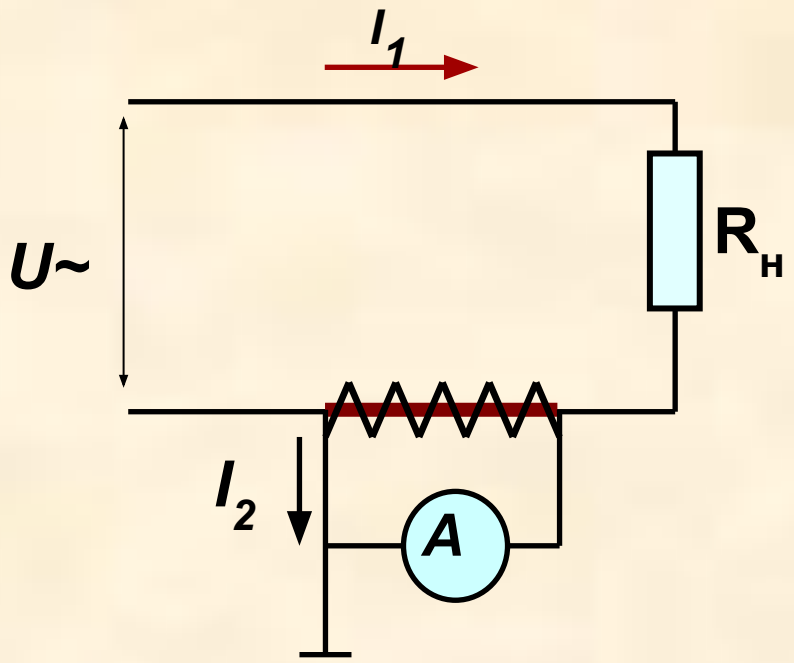
$$R_{ш} = \frac{R_a}{n-1}$$

$$n = \frac{I}{I_a}$$

Погрешность амперметра с шунтом возрастает из-за неточности изготовления шунтов и различных ТКС катушки амперметра и шунта.

При использовании шунтов **на переменном токе** возникают дополнительные частотные погрешности ($R_{им}$ и $R_{ш}$ по-разному зависят от частоты).

На переменном токе - **измерительные трансформаторы тока** (особенно для больших токов).



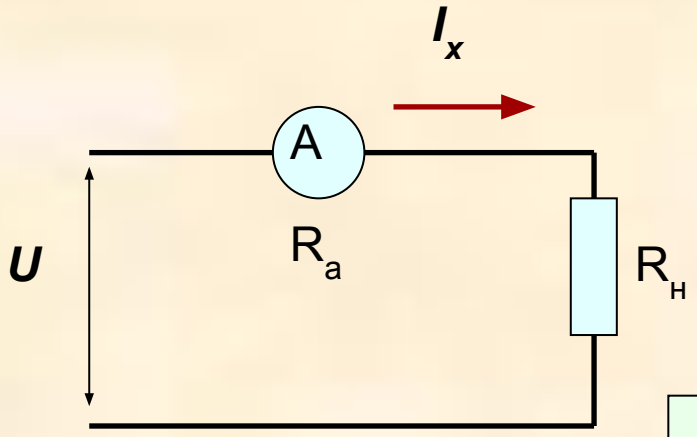
$$K_{Iн} = \frac{I_{1н}}{I_{2н}} = \frac{w_2}{w_1}$$

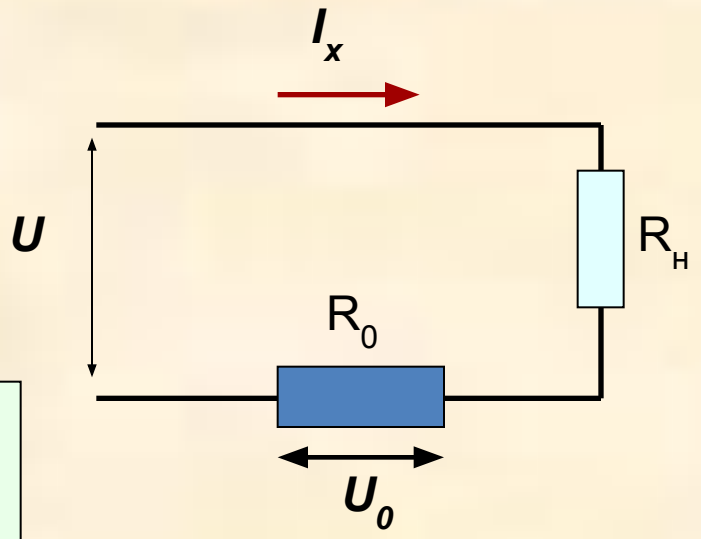
$$I_{1н} = K_{Iн} \cdot I_{2н}$$

$I_{1н}$; $I_{2н}$ – номинальные токи в первичной и вторичной обмотке

w_1; w_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках

Методическая погрешность при измерении тока





До включения амперметра:

$$I_x = \frac{U}{R_н}$$

После (измеренное значение):

$$I = \frac{U}{R_н + R_a}$$

$$\delta = \frac{I - I_x}{I_x} = \frac{\frac{1}{R_н + R_a} - \frac{1}{R_н}}{\frac{1}{R_н}} = \ldots = -\frac{R_a}{R_н + R_a} = -\frac{1}{1 + \frac{R_н}{R_a}}$$

$\Rightarrow$ $R_a \ll R_н$