Электромеханические измерительные приборы

Отличаются:

1. Простотой
2. Дешевизной
3. Высокой надежностью
4. Разнообразие применения
5. Относительно высокой точностью

Состав простейшего электромеханического прибора

Измерительная цепь: обеспечивает преобразование электрической измеряемой величины X в промежуточную величины Y.

Измерительный механизм*:* является электромеханическим преобразователем, осуществляющим преобразование электрической величины Y в наглядное аналоговое показание.

Отсчетное устройство: состоит из указателя, жестко связанного с подвижной частью ИМ, и неподвижной шкалы.

В общем случае на подвижную часть ИМ при ее движении воздействуют моменты: вращающий $M_{вр}$ противодействующий $M_{пр}$ и момент успокоения $M_{усп}$

- **Вращающий момент -** $M_{вр} = dW_м / d\alpha$, где

  $dW_м$ изменение запаса энергии магнитного поля;

  α - угол отклонения подвижной части.

- **Противодействующий момент -** $M_{пр} = W\alpha$, где

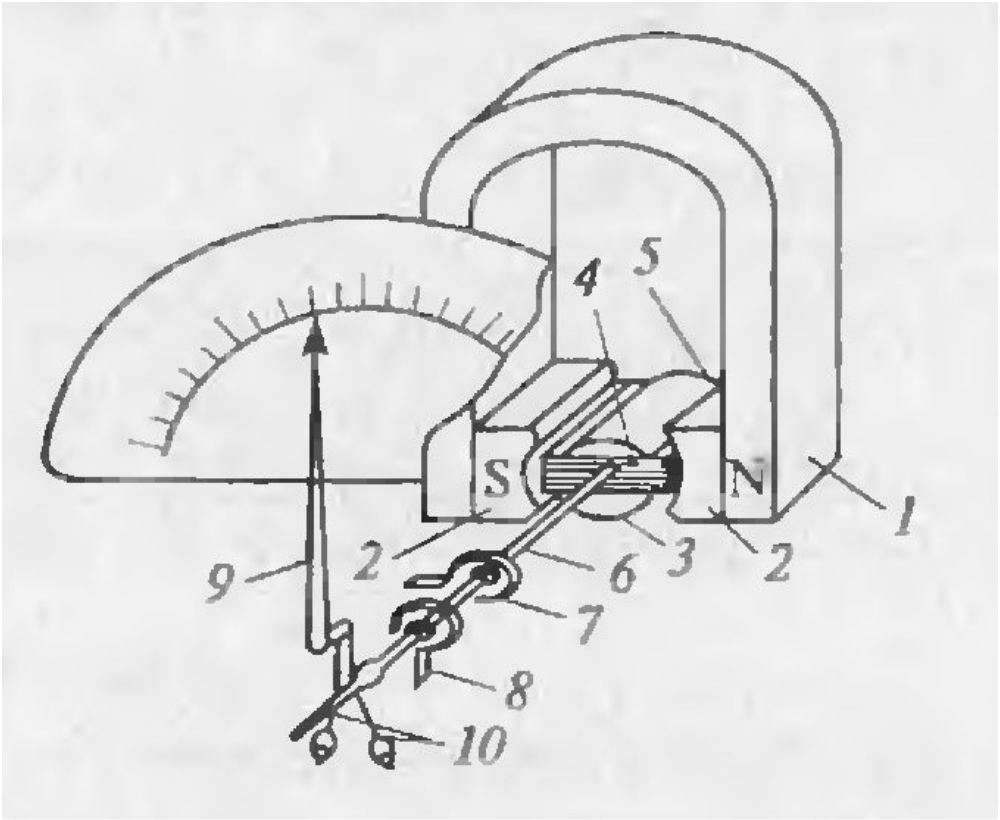
  W - удельный противодействующий момент;

  α - угол отклонения подвижной части.

- **Момент успокоения -** $M_{усп} = Pd\alpha / dt$ где

  P - коэффициент успокоения.

Схема устройства магнито-электрического прибора



1 – постоянный магнит; 2 – полюсные наконечники; 3 – неподвижный сердечник; 4 – прямоугольная катушка; 5,6 – полуоси; 7,8 – стиральные пружины; 9 – стрелка; 10 – передвижные грузики

Запас ЭМ энергии в контуре с током, находящемся в поле постоянного магнита - $W_м = I\psi$ где

ψ - полное потокосцепление данного контура с полем постоянного магнита.

Угол отклонения подвижной части - $\alpha = BSI / W$, где

B – индукция в зазоре;

S – площадь рамки;

W – *число витков.*

Достоинства

- относятся к числу наиболее точных приборов;
- высокая чувствительность;
- малое собственное потребление мощности.

Недостатки

- сложная и дорогая конструкция;
- невысокая перегрузочная способность.
- применение только в цепях постоянного тока.

Применение : амперметры, вольтметры, омметры, гальванометры.

Амперметр

Магнитоэлектрический измерительный механизм, включенный в электрическую цепь последовательно, позволяет измерить токи 20-50 мА. Для расширения пределов измерения используют шунты.Сопротивление шунта меньше сопротивления прибора и выбирается из соотношения:

$$R_ш = R_{пр} /(n-1)$$, где

n – коэффициент шунтирования по потоку, $n = I / I_{пр}$

Вольтметр

Магнитоэлектрический измерительный механизм, включенный в электрическую цепь параллельно. Для расширения пределов измерения последовательно в цепь включают добавочный резистор.

$$R_{доб} = R_{пр}(m-1),$$ где

m – коэффициент шунтирования по напряжению,

$$m = U / U_{пр}$$

Логометры

Приборы электромеханической группы, измеряющие отношение 2х величин(токов), что позволяет сделать их показания независимыми от источника питания

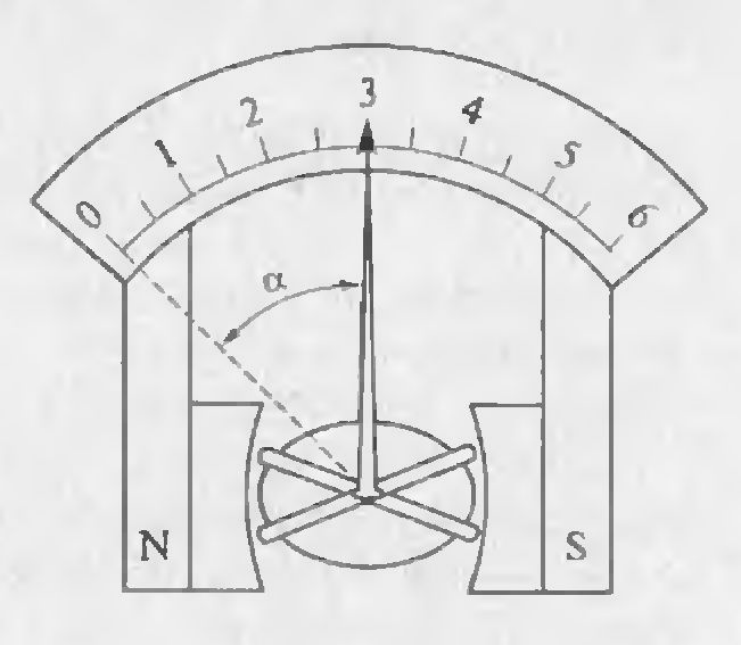


Рис. Схема устройства магнитоэлектрического логометра

Направления токов в рамках выбираются так, чтобы моменты $M_{вр}$ и $M_{пр}$ были противоположны

$$M_{вр} = I_1 f_1(\alpha); M_{пр} = I_2 f_2(\alpha)$$

$$\alpha = F(I_1 / I_2)$$

Омметры

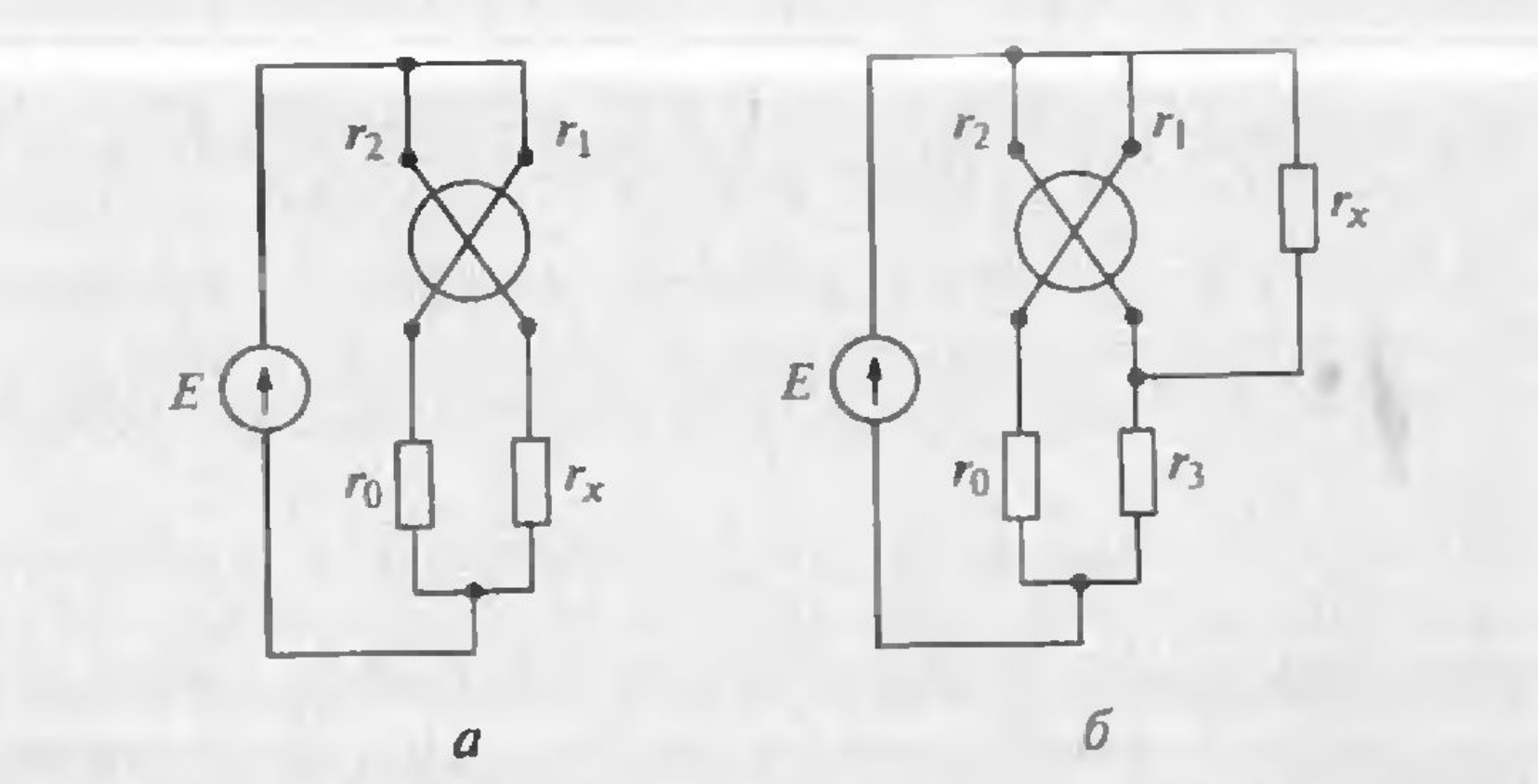


Рис. Схемы устройства магнитоэлектрических омметров с логометрическим механизмом для измерения больших (а) и малых (б) сопротивлений

Гальванометры постоянного тока

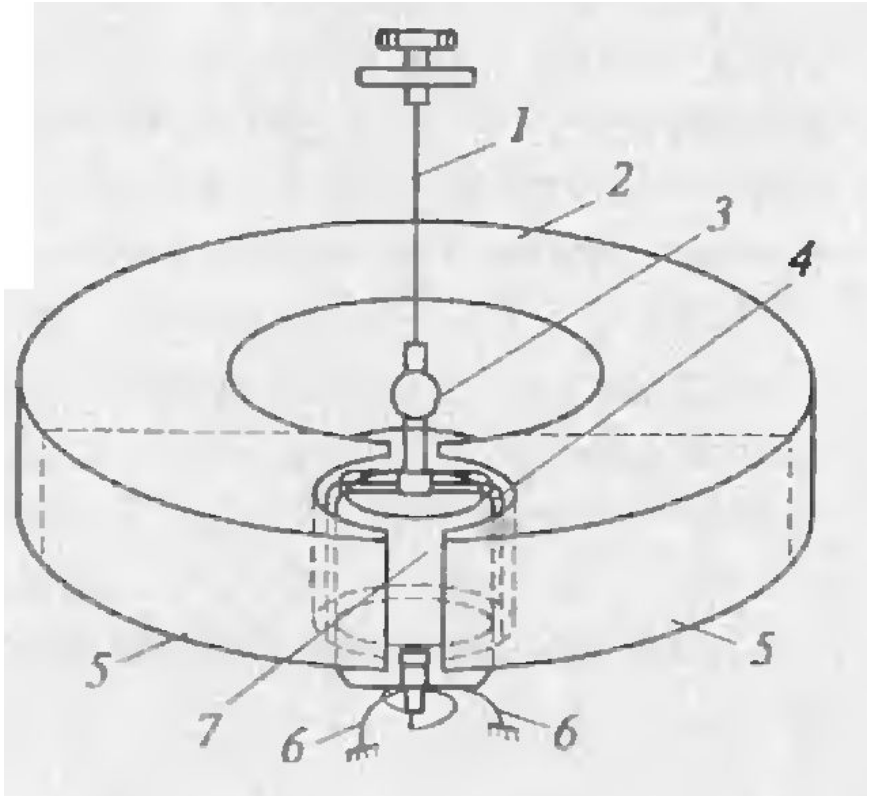


Рис. Схема устройства магнитоэлектрического гальванометра:
1 – подвес; 2 – постоянный магнит; 3 – зеркальце; 4 – рамка; 5 – полюсные наконечники; 6 – безмоментные токопроводы; 7 – стальной цилиндр.

Уравнение подвижной части гальванометра

$$\alpha = f(t)$$

Электромагнитные измерительные приборы(ЭМИП):

- ***с плоской катушкой;***
  с круглой катушкой;

с замкнутым магнитопроводом

Энергия ЭМ поля катушки с током:

$$w_M = \frac{I^2 L}{2}$$

Вращающий момент:

$$M_{вр} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

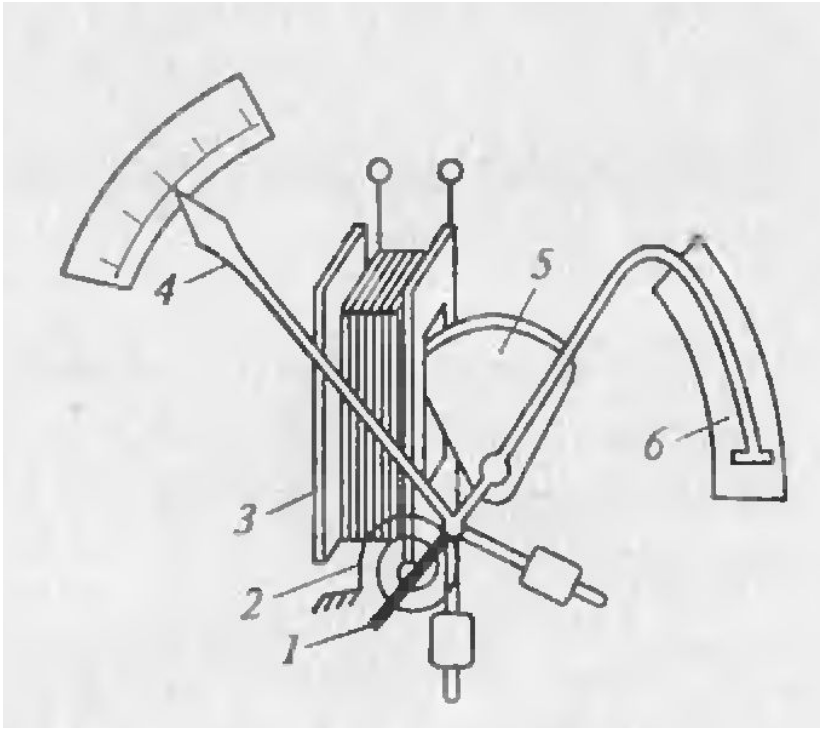


Рис. Схема устройства электромагнитного прибора:
1 – ось; 2 – спиральная пружина; 3 – катушка; 4 – стрелка; 5 – сердечник; 6 – успокоитель.

Достоинства:

- простота конструкции и высокая надежность
- хорошая перегрузочная способность
- возможность работы в цепях постоянного и переменного токов
- классы точности 1,0; 1.5; 2,5
- частотный диапазон 45 Гц... 10 кГц;
- диапазон измерения по току 5...300 А (при прямом включении) и до 20 000 А с измерительным трансформатором тока (ИТТ);
- диапазон измерения по напряжению 1,5...60 В (при прямом включении) и до 6000 В с измерительным трансформатором напряжения (ИТН).

Недостатки:

- большое собственное потребление энергии
- невысокая чувствительность
- неравномерная шкала
- влияние внешних магнитных и температурных полей, частоты питающего на напряжения на показания ЭМИ П.

Применение:

ЭМИП используют в качестве амперметров, вольтметров, фазометров, частотомеров, генриметров и фарадметров. Расширение пределов по току - секционирование и использование ИТТ, по напряжению - секционирование, применение добавочного резистора и ИТН.

Электродинамические измерительные приборы

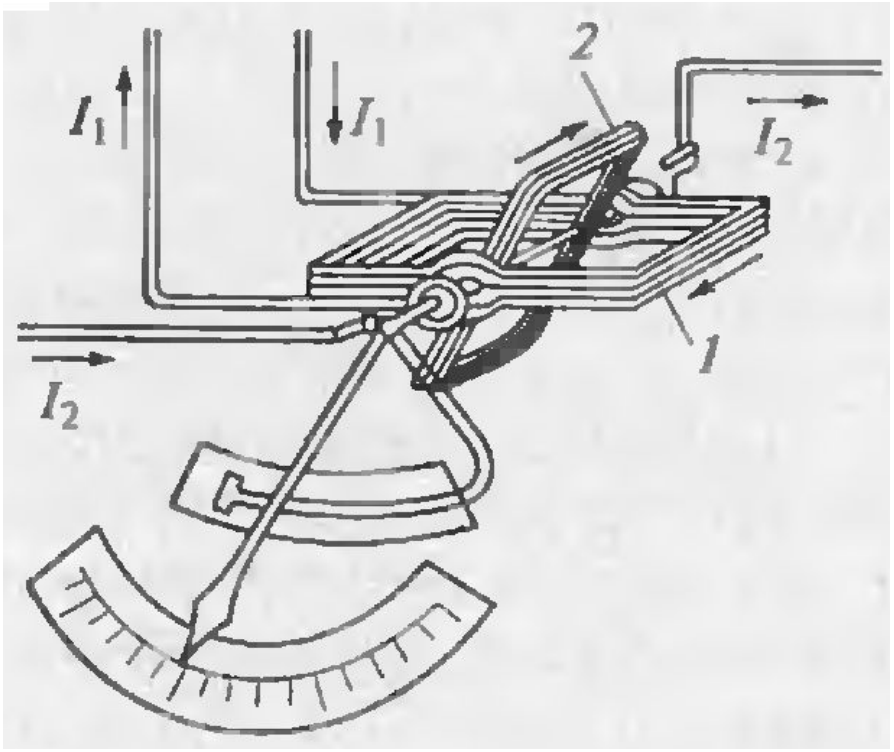


Рис. Схема устройства электродинамического прибора: 1 – неподвижная катушка; 2 – подвижная катушка.

ЭМ энергия энергии 2х систем катушек с токами:

$$W_M = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + M I_1 I_2$$

Уравнение преобразования ЭДПИ :

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}$$

Достоинства

- используются в цепях постоянного и переменного токов;
- классы точности 0,05; 0,1; 0,2;
- диапазон измерений на постоянном токе 0,015... 10 А (прямое включение), на переменном токе 0,005... 200 А (прямое включение), до 600 А с ИТТ;
- измерения постоянного напряжения 1,5 ...600 В (прямое включение), 7,5 — 6000 В с Rдоб, переменного тока до 30000 В с ИТН; частотный диапазон до 40 кГц.

Недостатки

- большое собственное потребление энергии,
- шкала неравномерная
- невысокая чувствительность
- имеют малую перегрузочную способность,
- недопустимы тряски и вибрации
- имеют сложную конструкцию и высокую стоимость
- на показания этих приборов влияют внешние магнитные поля, температура и частота питающего напряжения.

Применение

- электродинамические приборы используют в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров (для расширения пределов измерения применяют секционирование катушек с ИТТ и ИТН), частотомеров, фазометров (на принципе логометров).

Ферродинамические измерительные приборы

- отличаются от ЭДИП тем, что неподвижная катушка расположена на сердечнике из ферромагнитного материала. Это приводит к значительному увеличению вращающего момента и уменьшению влияния внешних магнитных полей.

Применение

- в основном используют в цепях переменного тока на промышленной частоте в качестве амперметров, вольт-аметров, ваттметров, большая величина $M_{вр}$ позволяет использовать их в самописцах, расширение пределов измерения осуществляют так же, как у электродинамических приборов.

Достоинства:

- не боятся вибраций и тряски
- внешние магнитные поля мало влияют на их показания
- классы точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5. Успокоение подвижной части — воздушное и магнитоиндукционное.

Недостатки:

- на постоянном токе погрешность возрастает за счет потерь на гистерезис
- сказывается влияние частоты питающего напряжения и температуры внешней среды
- частотный диапазон 10 Гц... 1,5 кГц,

Электростатические измерительные приборы

- для перемещения подвижной части используется принцип взаимодействия двух или несколько электрически заряженных проводников,

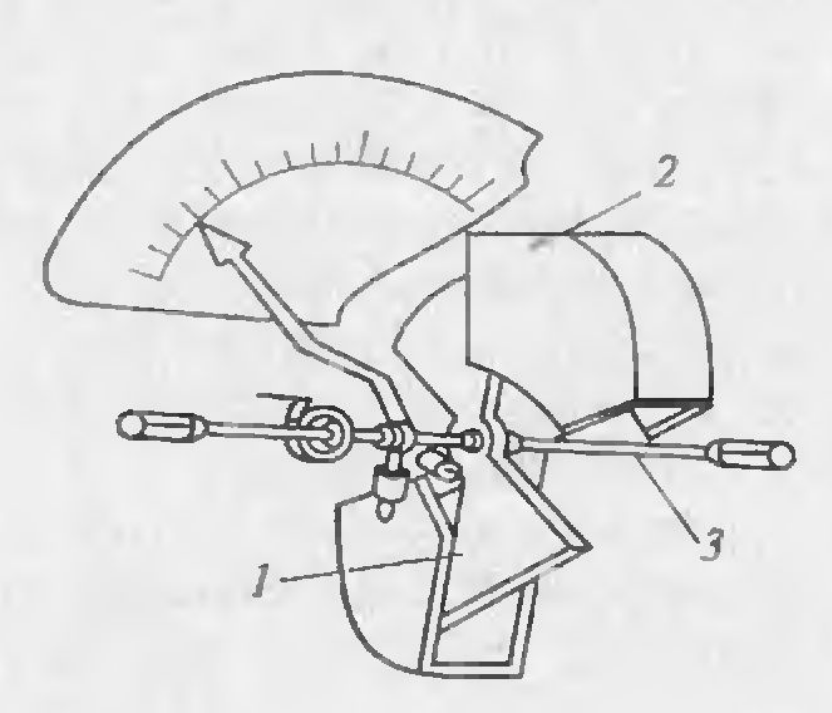


Рис. Схема устройства электростатического прибора: 1 – подвижная пластина; 2 – неподвижные пластины; 3 – ось.

Уравнение преобразования ЭСИП

$$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dC}{d\alpha}$$

Достоинства

- не потребляют энергии в цепях постоянного тока и очень незначительное потребление в цепях переменного тока
- классы точности: 0,05; 0,1; 1,0; 1,5; 2,5;
- частотный диапазон 20 Гц... 10 мГц; диапазон измерений постоянного на напряжения от 10 В до 7500 кВ, переменного напряжения от 30 В до 7500 кВ
- независимость показаний от изменения температуры, частоты и формы кривой измеряемого напряжения, а также внешних магнитных полей.

Недостатки:

- низкая чувствительность
- неравномерная шкала
- сказывается влияние внешних электрических и электростатических полей.

Применение:

- электростатические измерительные приборы используют в цепях постоянного и переменного токов в качестве вольтметров.

Индукционные измерительные приборы

- Индукционные измерительные приборы **(ИИП)** особым положением катушек получают вращающееся электромагнитное поле, которое, пронизывает алюминиевый цилиндр, индуцирует в нем вихревые токи, что вызывает возникновение вращающего момента.

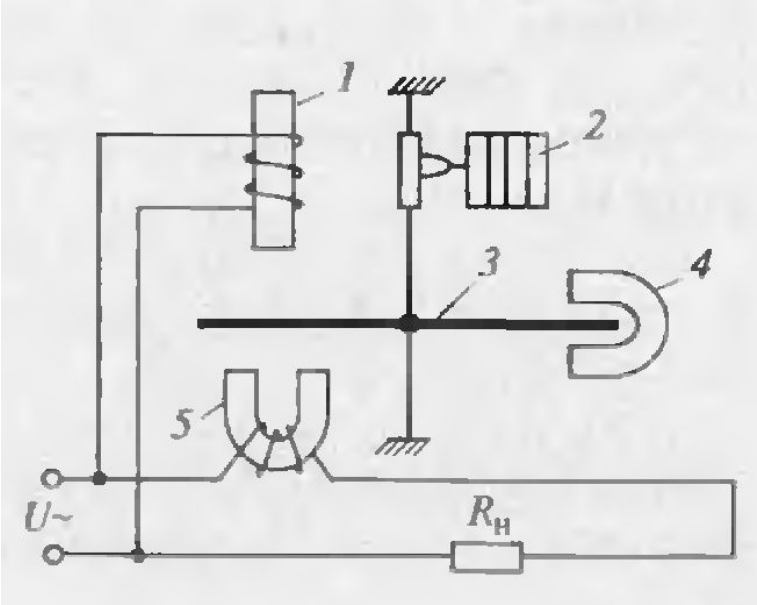


Рис. Схема однофазного индукционного счетчика: 1 – катушка напряжения; 2 – счетный механизм; 3 – алюминиевый диск; 4 – постоянный магнит; 5 – П-образный сердечник

Применение: используются для измерения электроэнергии.

- Вращающий момент $M_{вр} = K_1 UI \cos\varphi = K_1 P$
- Тормозной момент $M_т = K_2 d\alpha / dt$
- Энергия $W = K_2 2\pi N / K_1 = C_{ном} N$
- Постоянная счетчика $C_{ном} = 1/A$, где А - передаточное число счетного механизма в виде числа оборотов

Количество электричества, реально прошедшее за один оборот диска, зависит от тока и характера нагрузки, внешних условий (например, от температуры и частоты), характеризуется действительной постоянной счетчика , которая, как правило, не равна номинальной. Она определяется путем измерения действительно израсходованной энергии за некоторое число оборотов диска при помощи ваттметра и секундомера.

$$W_Д = Pt = C_Д N$$

$$C_Д = Pt / N, где$$

P – мощность, измеренная ваттметром, t – время.

Выпрямительные приборы

Представляют собой сочетание выпрямительного преобразователя и магнитоэлектрического ИП.

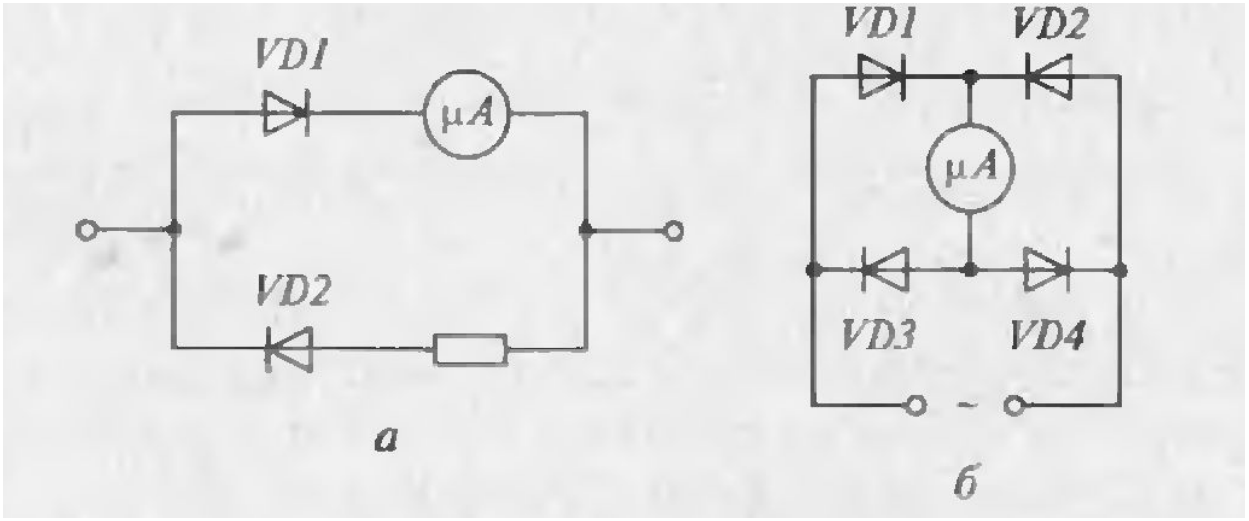


Рис. Схемы однополупериодного (а) и двухполупериодного (б) выпрямителей

Вращающий момент:

Угол отклонения стрелки:

Применение:

Выпрямительные приборы широко используются в качестве комбинированных приборов для измерения постоянных и переменных токов, напряжения и сопротивления - ампервольтомметры (авометры).

Достоинства:

- высокая чувствительность
- малое собственное потребление мощности
- широкий частотный диапазон — возможность работы без частотной компенсации на частотах до 2000 Гц, с частотной компенсацией — до 20 кГц.

Недостатки:

- зависимость показаний от формы кривой измеряемого напряжения
- необходимость введения частотной и температурной компенсации
- невысокая точность (1,0; 1,5; 2,5; 4.0) из-за нелинейности вольт-амперных характеристик диодов.

Термоэлектрические приборы (ТЭИП)

Представляют собой сочетание магнитоэлектрического механизма с отсчетным устройством и термоэлектрического преобразователям (одна или несколько термопар)

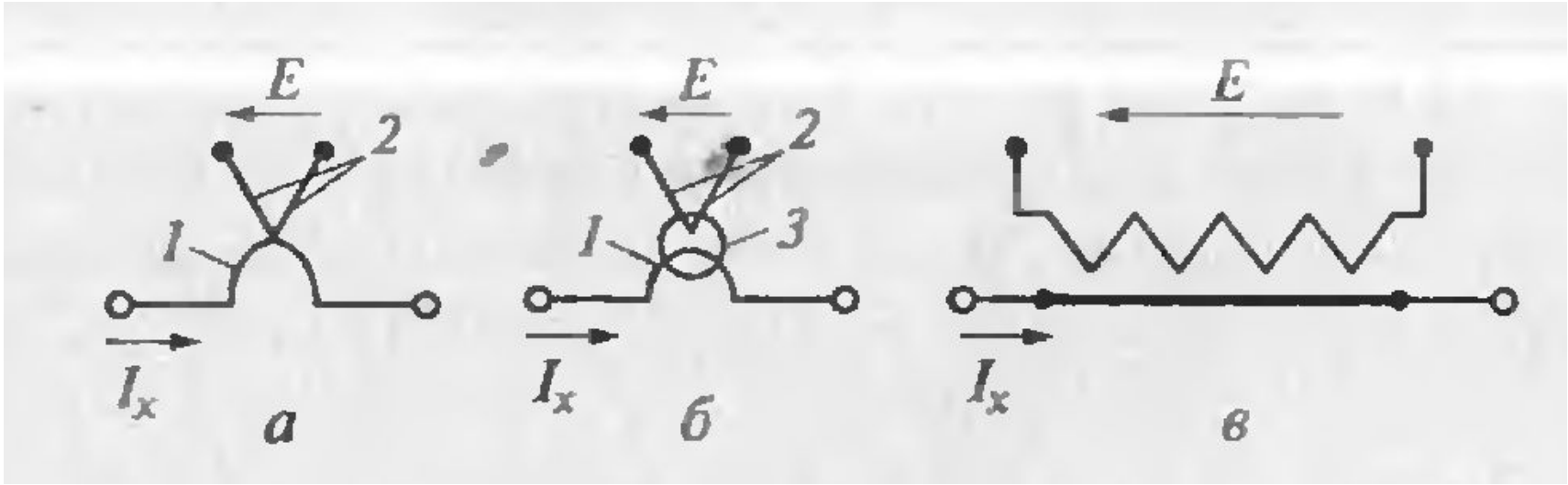
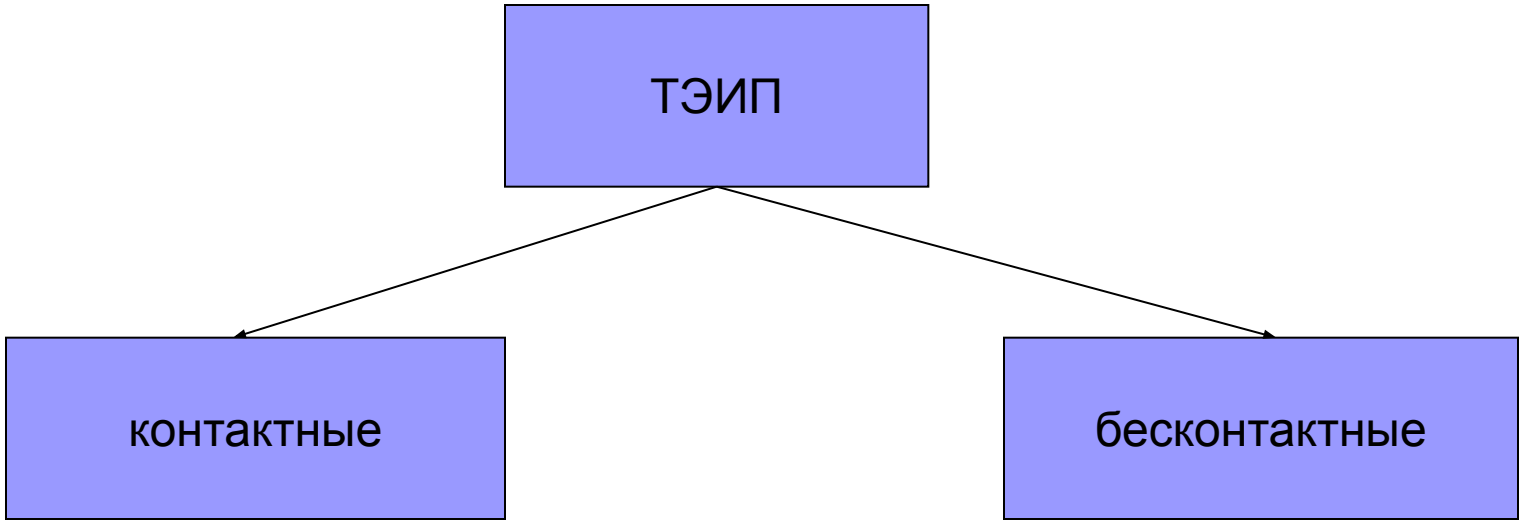


Рис. Контактные (а), бесконтактные (б) термопреобразователи и термобатарея (в): 1 – нагреватель; 2 – термопара; 3 – капля стекла



Применение:

Термоэлектрические приборы используются в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров.

Достоинства:

- малое влияние частоты (и формы кривой) переменного тока
- высокий частотный диапазон (10 Гц... 100 МГц)
- класс точности 0,5: 1,0 и ниже
- диапазоны измерения по току 100 мА...10 А, по напряжению — 0,75 В...50 В, низкое входное сопротивление (200...300 Ом).

Недостатки:

- малая перегрузочная способность
- зависимость указаний от температуры окружающей среды
- низкая чувствительность
- большое собственное потребление мощности
- ограниченный срок работы
- неравномерная шкала.

Измерительные трансформаторы переменного тока (ИТПТ)

Для удобства и безопасности измерения тока установок высокого напряжения ток вторичной цепи с помощью трансформатора тока изменяется до стандартного значения 5А или 1А. Измерительные приборы и реле выполняются на эти токи и включаются в цепь вторичной обмотки трансформатора тока, а один вывод которой обязательно заземляется

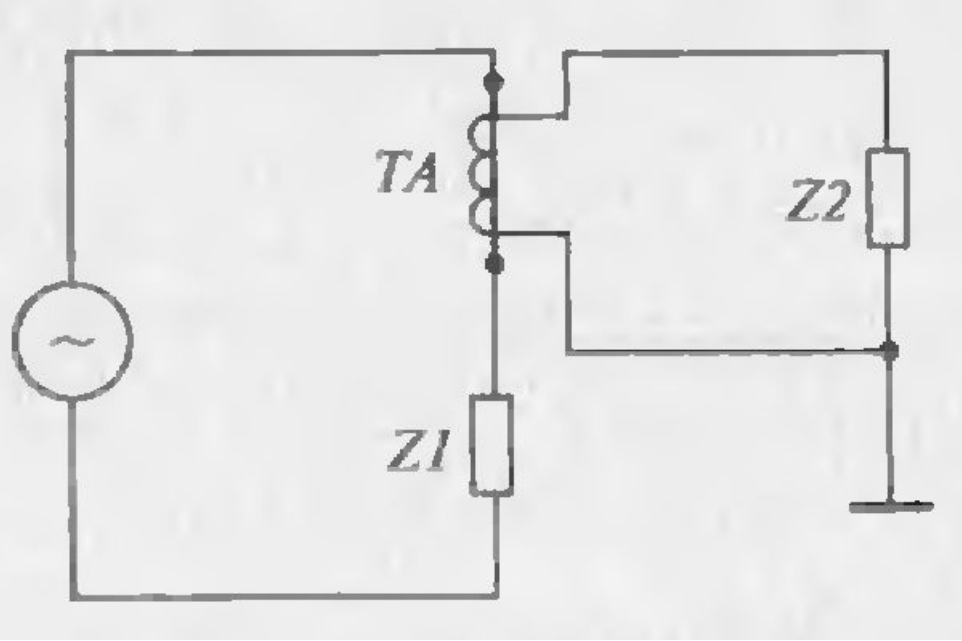


Рис. Схема включения трансформаторного тока.

Основные параметры ИТПТ

1. Номинальное напряжение
2. Номинальные первичные и вторичные токи
3. Номинальный коэффициент трансформации $\kappa_{ном} = I_{1ном} / I_{2ном}$
4. Токовая погрешность

$$\gamma_1 = \frac{\kappa_{ном} I_2 - I_1}{I_1} 100$$

где I_2 - вторичный ток, I_1 - первичный ток.

- Полная погрешность (характеризует намагничивающий ток)

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (K_{ном} i_2 - i_1)^2 \, dt}$$

- Номинальная нагрузка ИТПТ

$$P_{2ном} = I_{2ном}^2 Z_{2ном}$$

- Номинальная предельная кратность
- Максимальная кратность вторичного тока
- Динамическая и термическая стойкости

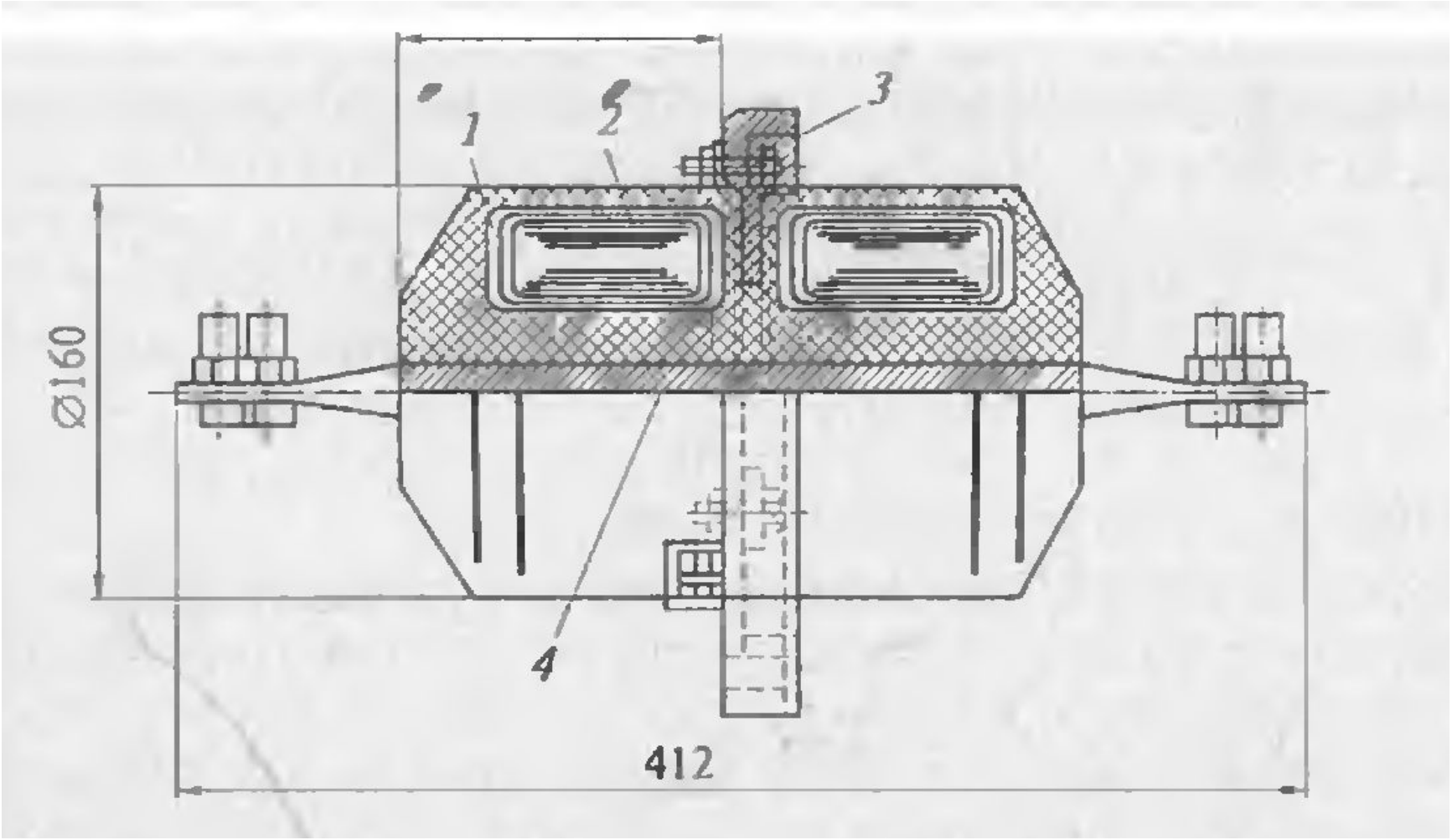


Рис. Одновитковый трансформатор тока ТПОЛ-10, $U_{ном} = 10кВ$
1 – магнитопроводы, 2 – вторичная обмотка, 3 – крепежное кольцо, 4 - стержень

Измерительные трансформаторы переменного напряжения(ИТПН)

Служат для преобразования высокого напряжения в низкое стандартной величины, удобное для измерения.

Первичная обмотка трансформатора изолируется от вторичной соответственно классу напряжения установки. Для безопасности обслуживания один вывод вторичной обмотки обязательно заземляется. Таким образом, трансформатор напряжения изолирует измерительные приборы и реле от цепи высокого напряжения и делает безопасным их обслуживание.

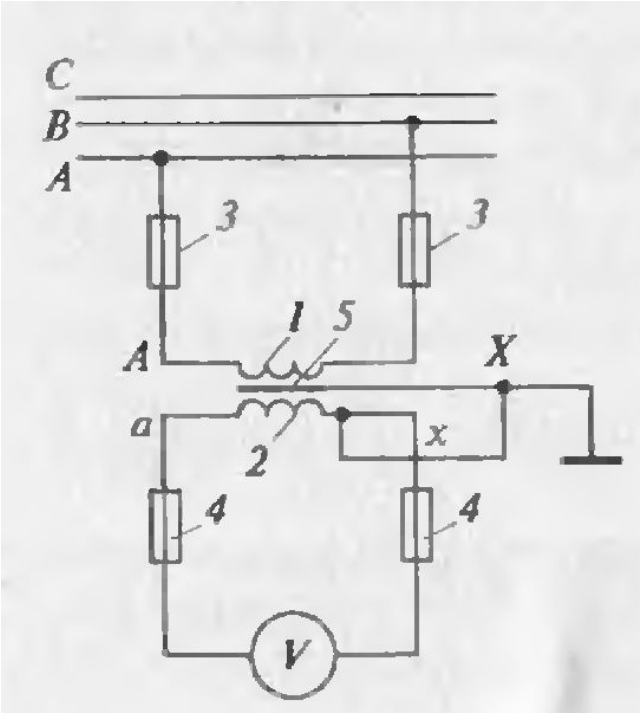


Рис. Схема включения однофазного трансформатора напряжения:
1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3,4 – предохранители, 5 - сердечник

Основные параметры ИТПН

1. Номинальное напряжение обмоток
2. Номинальный коэффициент трансформации

$$K_{ном} = U_{ном1} / U_{2ном}$$

3. Погрешность по напряжению

$$\Delta U = \frac{U_2 k_{ном} - U_1}{U_1} 100$$

4. Номинальная вторичная нагрузка
5. Номинальная мощность трансформатора

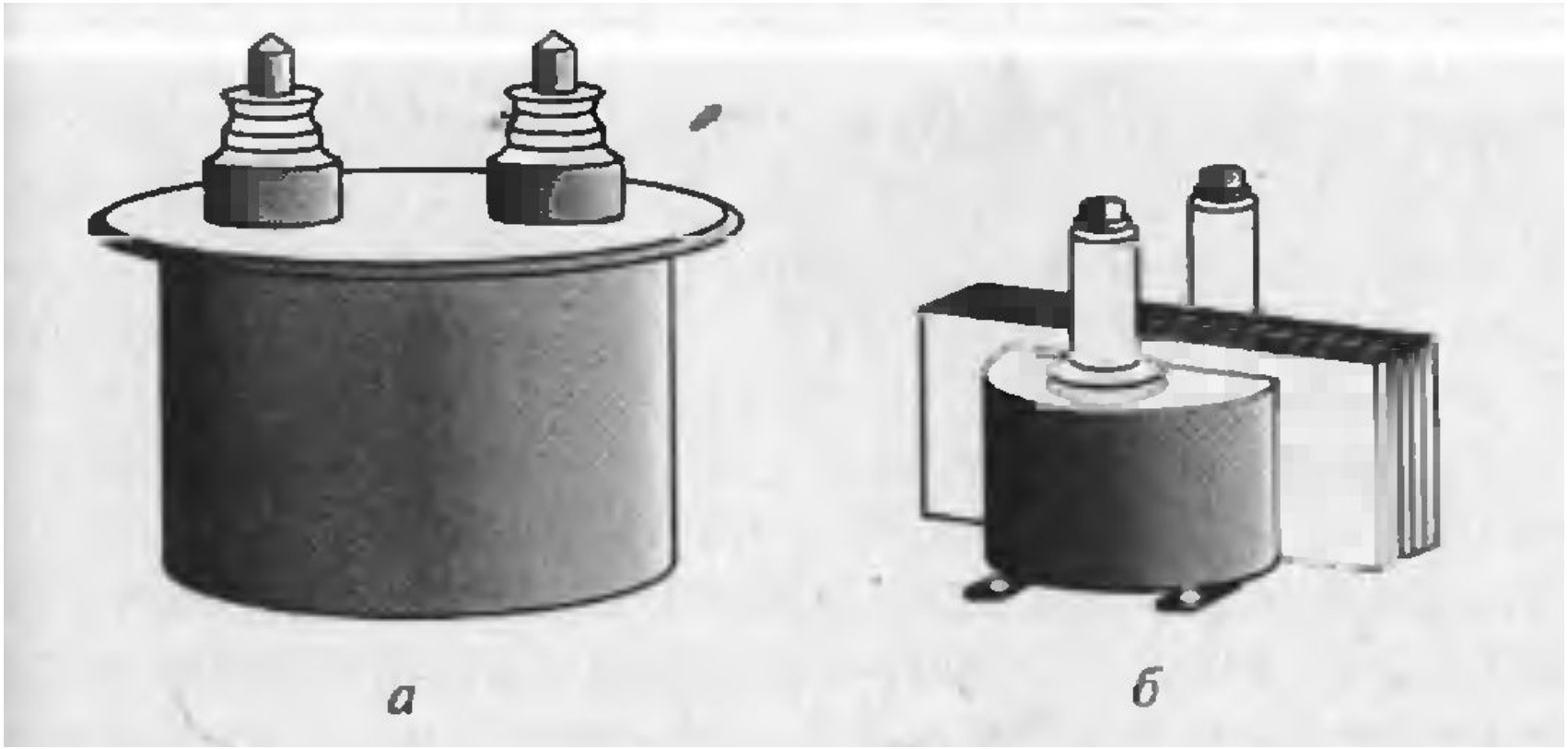


Рис. Внешний вид однофазных трансформаторов напряжения с масляной изоляцией (а) и литой изоляцией (б)

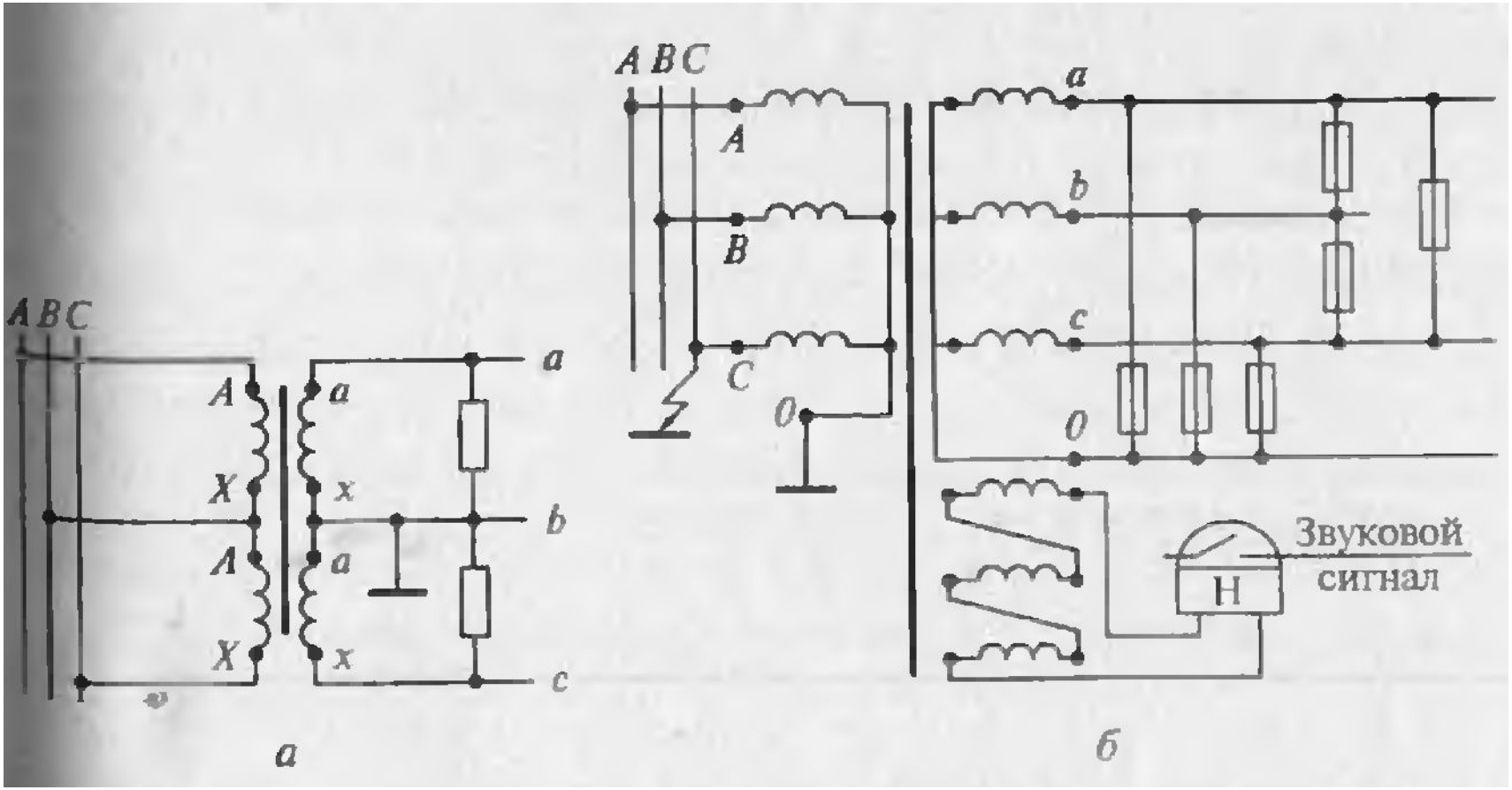


Рис. Схемы включения трансформаторов напряжения в трехфазных сетях с использованием двух (а) и трех (б) однофазных трансформаторов

Измерительные трансформаторы постоянного тока

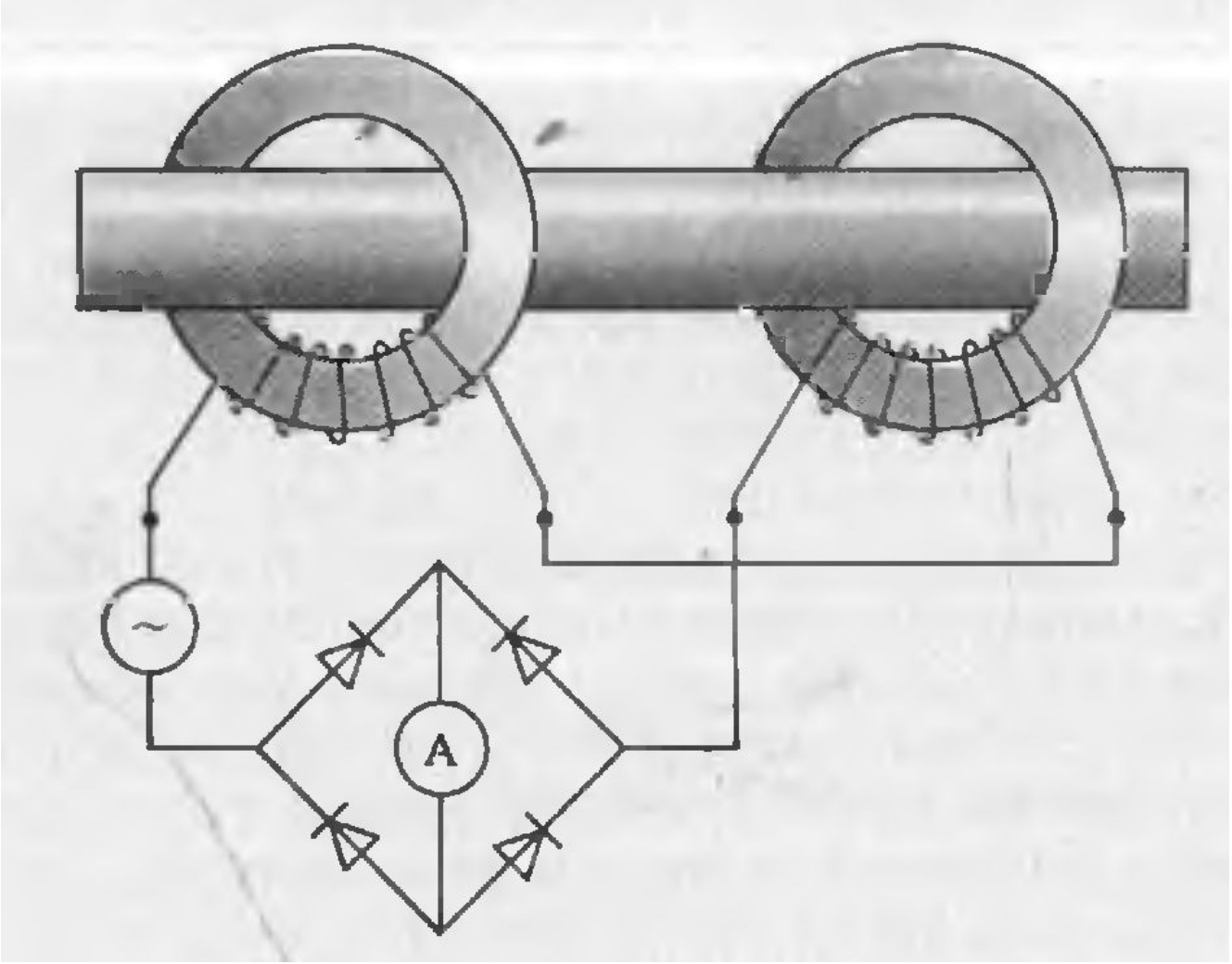
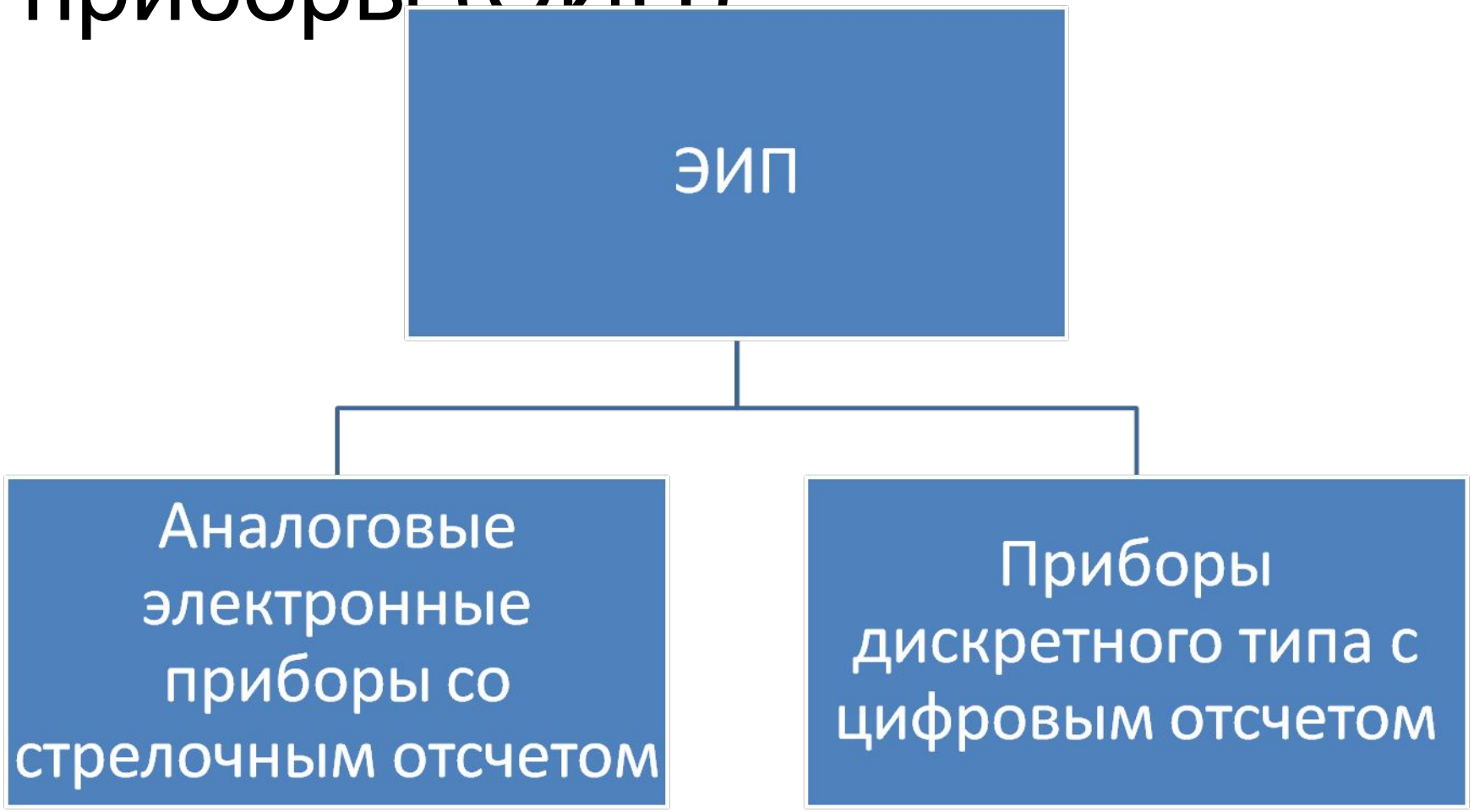


Рис. Трансформатор постоянного тока

Электронные измерительные приборы (ЭИП)



ЭИП в зависимости от характера измерений и вида измеряемых величин делятся на:

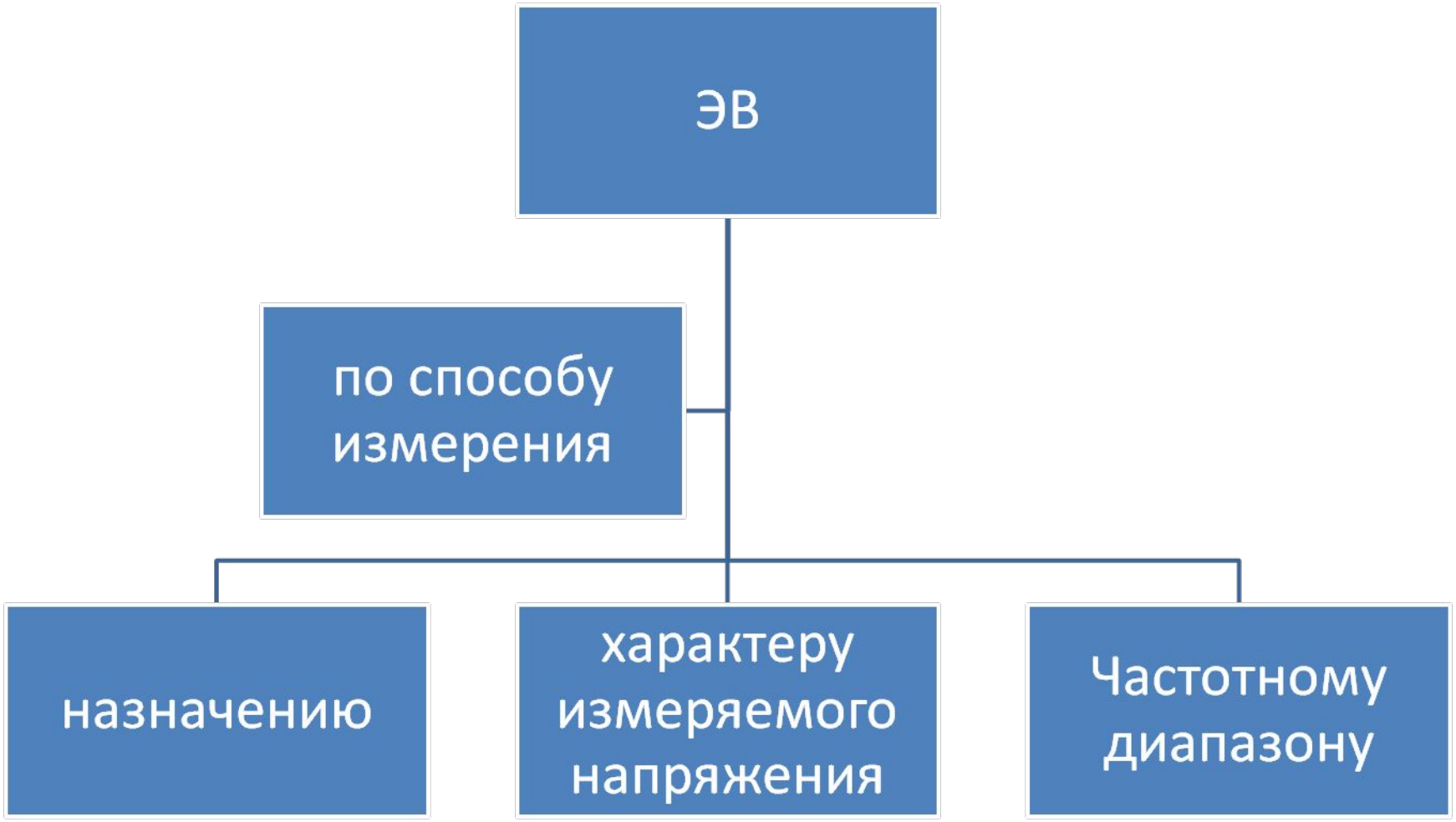
- В — приборы для измерения напряжений:
- В1 — калибраторы;
- В2 — вольтметры постоянного тока;
- В3 — вольтметры переменного тока;
- В4 — вольтметры импульсного тока;
- В6 — вольтметры селективные;
- В7 — вольтметры универсальные.
- Г — измерительные усилители и генераторы;
- Г3 — генераторы гармонических колебаний низкочастотные;
- Г4 — генераторы гармонических колебаний высокочастотные;
- Г5 — генераторы импульсные;
- Г6 — генераторы функциональные.
- Е — приборы для измерения распределенных параметров электрических цепей
- С — приборы для наблюдения за формой сигналов и ее исследования.
- Ч — частотомеры.
- Ф — измерители фазового сдвига и т.д.

Электронные приборы по сравнению с электромеханическими обладают значительным быстродействием, широкими частотным диапазоном (20 Гц... 1000 МГц) и диапазоном измеряемых величин, высокой чувствительностью, хорошей перегрузочной способностью.

Аналоговые электронные измерительные приборы

Состоят из электронной части, предназначенной для преобразования, выпрямления, усиления электрической величины, и измерительного механизма магнитоэлектрической системы, а в осциллографах — электронно-лучевой трубки.

Аналоговые электронные приборы используются в качестве вольтметров, частотомеров, осциллографов, измерителей сопротивления, емкости, индуктивности, параметров транзисторов, интегральных схем и др.


ЭВ
по способу измерения
назначению
характеру измеряемого напряжения
Частотному диапазону

ЭВ постоянного тока

Рис. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока.

- Уравнение преобразования

$$\alpha = K_{ВУ} K_{УПТ} S_{ИМ} = K_{В} U_{X}$$

- $K_{ВУ}, K_{УПТ}, K_{В}$ - коэффициенты преобразования входного устройства, усилителя постоянного тока и ЭВ соответственно

- $S_{им}$ - чувствительность измерительного механизма по напряжению

Электронные вольтметры переменного тока

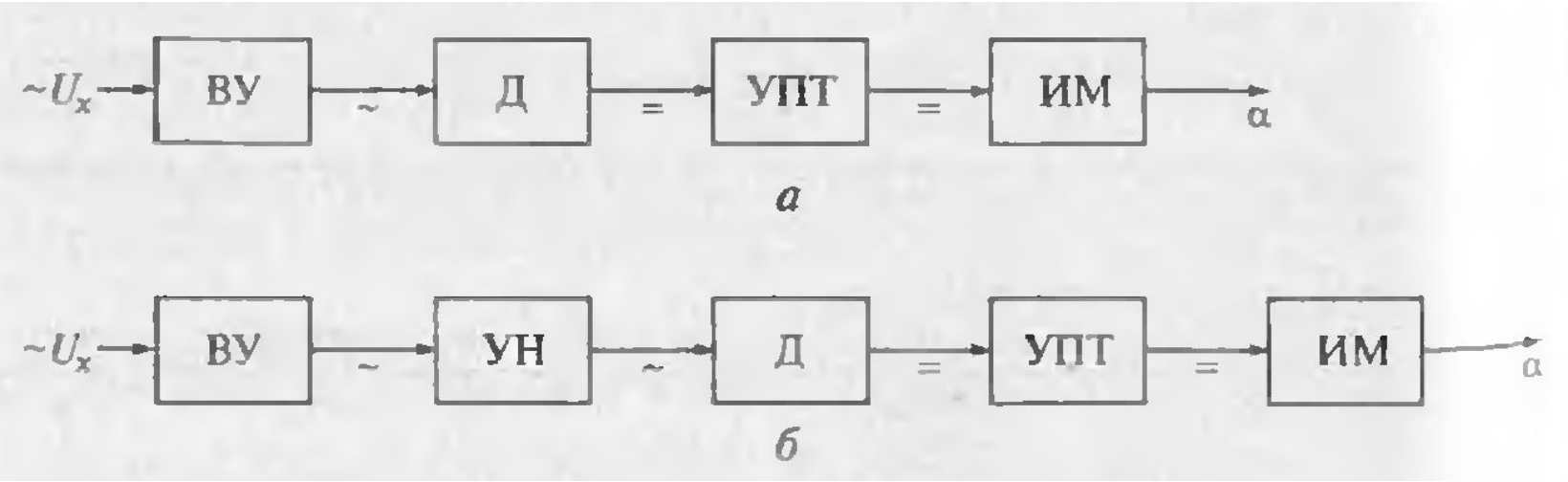


Рис. Упрощенные структурные схемы:а – электронного вольтметра, б – электронного милливольтметра.

- ВУ- входное устройство
- Д - детектор
- УПТ - усилитель постоянного тока
- ИМ – измерительный механизм

Электронный вольтметр среднего значения

Простейший вольтметр для измерения относительно высоких напряжений может быть выполнен по структурной схеме, представленной на рис. 20.20, ***а.*** выпрямитель состоит из полупроводниковых диодов, работающих линейном участке вольт-амперной характеристики. Широкий диапозон измерений ЭВ обеспечивается с помощью входного делителя.

Достоинства:

- диапазон измеряемых напряжений — по частоте от 10 Гц до 10 МГц, по напряжению от 1 мВ до 300 В.

Недостатки:

- показания ЭВ среднего значения зависят от формы кривой измеряемого напряжения.

Амплитудный электронный вольтметр (диодно - конденсаторный)

Показания такого ЭВ пропорциональны амплитудному значению измеряемого напряжения.

Достоинства:

- диапазон измерений по частоте от 20 Гц до 1000 МГц,
- по напряжению от 100 мВ до 1000 В;
- классы точности 4.0, 10,0;
- входное сопротивление — 100 кОм…5 МОм.

Недостатки:

- зависимость показаний ЭВ от формы сигнала.

Электронный вольтметр действующего значения

В схеме такого ЭВ выпрямитель состоит из полупроводниковых диодов, использующих квадратичный участок вольт-амперной характеристики. Основное достоинство этих преобразователей заключается в независимости показаний на выходе от формы кривой измеряемого напряжения

Достоинства:

- высокая чувствительность (за счет усилительных свойств);
- малое потребление энергии;
- диапазон измерений по частоте от 20 Гц до 50 МГц,
- по напряжению от 1 мВ до 1000 В;
- классы точности — 2,5; 4,0; 10,0; 15,0.

Недостатки:

- высокая стоимость;
- ограниченная точность;
- необходимость переградуировки при замене элементной базы.

Электронный омметр

Представляет собой электронный вольтметр постоянного тока, имеющий измерительную схему, преобразующую измеряемое сопротивление в пропорциональное ему постоянное напряжение. Шкалу такого вольтметра градуируют в единицах измеряемого сопротивления и применяют его в качестве омметра.

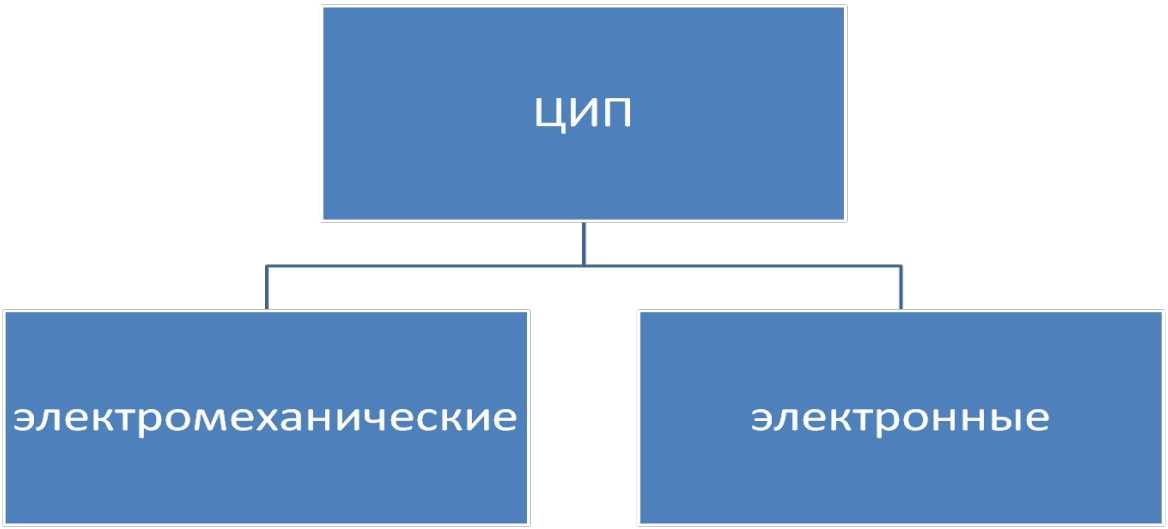
Технические характеристики

- большое входное сопротивление; диапазон измерения от 10 Ом до 1000 МОм;
- погрешность измерения — 2...4%;
- возможно измерение очень больших сопротивлений (тераомметры) с погрешностью до 10 %.

Цифровые измерительные приборы (ЦИП)

ЦИП — многопредельные, универсальные приборы, предназначенные для измерения различных электрических величин: переменного и постоянного тока и напряжения, емкости, индуктивности, временных параметров сигнала (частоты, периода, длительности импульсов) и регистрации формы сигнала, его спектра и т.д.

В цифровых измерительных приборах осуществляется автома тическое преобразование входной измеряемой аналоговой (непре рывной) величины в соответствующую дискретную величину с последующим представлением результата измерения в цифровой форме.



Основными элементами цифровых измерительных приборов являются триггеры, дешифраторы и знаковые индикаторы. Несколько знаковых индикаторов образуют цифровое отсчетное устройство.

Характеристики ЦИП

- разрешающая способность
- входное сопротивление
- быстродействие
- точность измерений
- помехозащищенность.

Класс точности ЦИП определяется пределом допускаемой относительной погрешности:

$$\gamma_{отн} = \pm\left[c + d\left(\left|\frac{X_k}{X} - 1\right|\right)\right]$$, где c и d — постоянные числа, характеризующие класс точности ЦИП соответственно в конце и в начале диапазона; $X_к$ — конечное значение диапазона. Класс точности обозначается в виде дроби. Например класс 0,02/0,01

Количественно помехоустойчивость ЦИП характеризуетсяи коэффициентом подавления помех:

$$K = 20\lg\left(\frac{E_{пом}}{U_0}\right)$$,где Едоп- амплитудное значение помехи на входе прибора; U_0 — эквивалентное входное постоянное напряжение, вызывающее такое же изменение показаний прибора, что и Едоп.

Достоинства:

- высокая чувствительность (по напряжению постоянного тока 1 нВ; по напряжению переменного тока 1 мкВ, по постоянному току 1 нА, по переменному току 5 мкА, по сопротивлению постоянному току 10 мкОм, по частоте от долей Гц).
- Высокая точность измерения (ЦИП подразделяются на восемь классов точности: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0).
- Удобство и объективность отсчета и регистрации; возможность сочетания ЦИП с вычислительными машинами и другими автоматическими устройствами
- высокая помехозащищенность;

Недостатки:

- сложность устройств и, следовательно, высокая их стоимость и невысокая надежность.

Компенсаторы постоянного тока (КПТ)

Используются для прямого измерения ЭДС и напряжений и косвенного измерения сопротивления, тока и мощности.

- EN-нормальный элемент
  RN-образцовое сопротивление
  Rрег - реостат для установки рабочего тока

- Rк - магазин сопротивлений
  НИ - нуль-индикатор
  Ux – источник измеряемого напряжения
  Ек – источник питания компенсатора

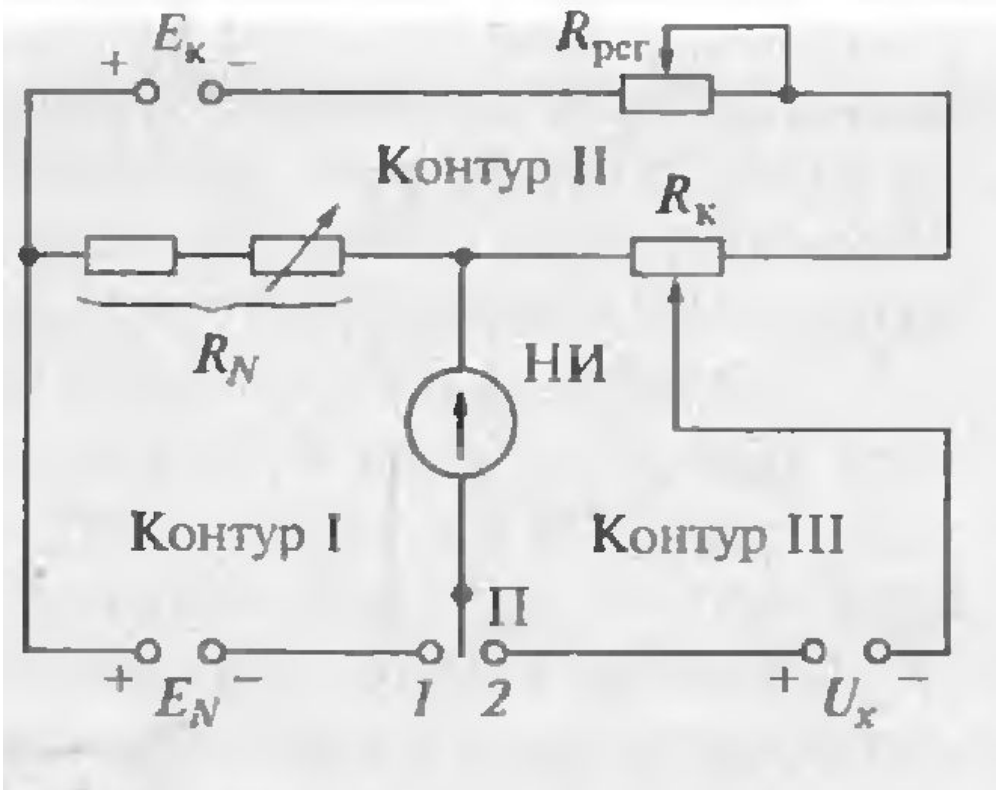


Рис. Упрощенная принципиальная схема компенсатора постоянного тока

Измерение Ux производится в два этапа:

1. Устанавливается ток в рабочей цепи, величина которого строго определена и неизменна для каждого типа компенсатора
2. Производится измерение напряжения

Измеряемое напряжение*:*

$$U_x = E_N r / R_N$$

где r - значение участка сопротивления R_k при компенсации напряжения U_x

Погрешность измерения напряжения компенсатором постоянного тока определяется следующими факторами:

- погрешность установки и поддержание неизменным рабочего тока
- погрешность изготовления и подгонка образцового компенсационного и регулируемого сопротивлений *(RN, RK* и Rрег);
- чувствительность нуль - индикатора.

Существует девять классов точности компенсаторов постоянного тока: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2.

Компенсаторы переменного тока

Компенсационный метод измерения напряжения может быть применен и на переменном токе. В таких компенсаторах для полного уравновешивания двух напряжений необходимо выполнить четыре условия:

1. равенство напряжений по модулю;
2. противоположность их фаз;
3. равенство частот;
4. одинаковая форма кривой U_x и U_K.

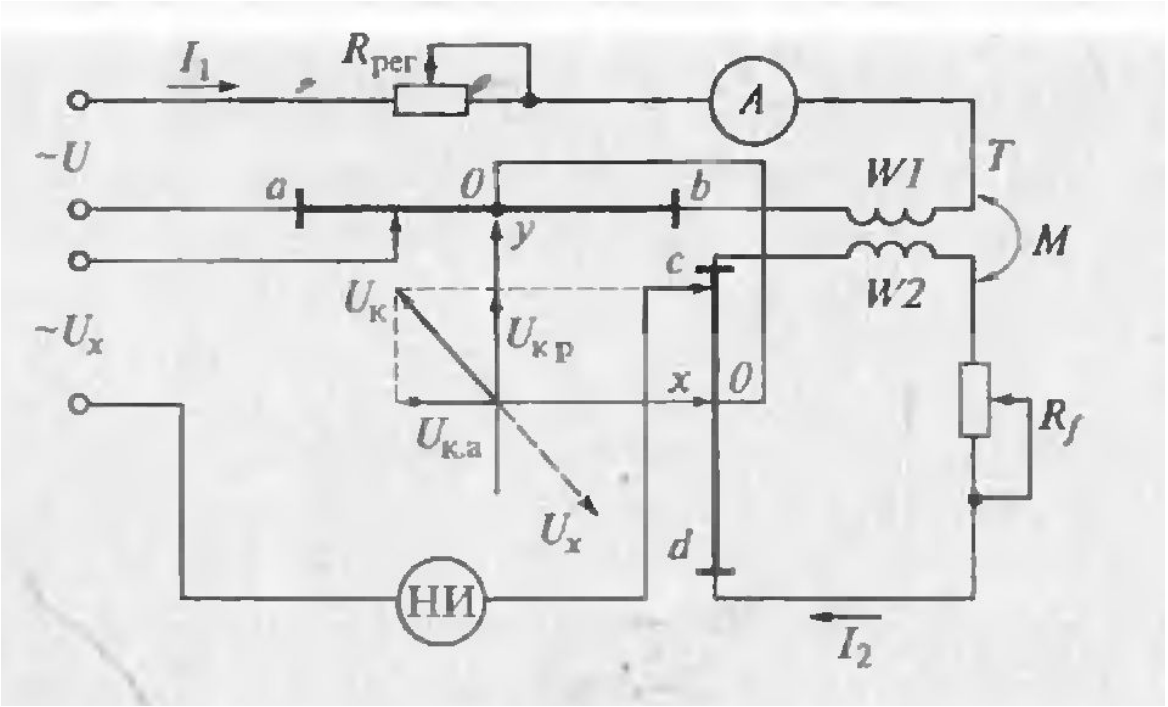


Рис. Упрощенная принципиальная схема прямоугольно-координатного компенсатора

По способу компенсации неизвестного напряжения компенсаторы переменного тока подразделяются на два вида:

1. полярно-координатные — с отсчетом измеряемого напряжения в полярных координатах (регулируется модуль $\boldsymbol{U_K}$ и отдельно его фаза);

2. прямоугольно-координатные - с отсчетом измеряемого напряжения в виде геометрической суммы двух взаимно перпендикулярных составляющих.

Измеряемое напряжение и его начальная фаза:

$$U_x = \sqrt{U_{k.a}^2 + U_{k.p}^2}$$

$$\varphi_x = arctg U_{k.p} / U_{k.a}$$

Автоматические компенсаторы постоянного тока

Процесс уравновешивания в таких компенсаторах производится автоматически, они применяются для измерения электрических и неэлектрических величин, которые могут быть предварительно преобразованы в напряжение или ЭДС постоянного тока.

Существуют компенсаторы с полным и неполным уравновешиванием. Промышленностью выпускаются автоматические компенсаторы, различающиеся габаритными размерами, видами записи, погрешностью, различным временем прохождения указателем всей шкалы.

Применение автоматических компенсаторов постоянного тока существенно сокращает время измерений, но снижает их точность.

Мостовые схемы

Широкое применение мостовых схем объясняется высокой точностью измерений, большой чувствительностью и возможностью измерения различных параметров электрических цепей (R, *L, C),* величин функционально с ними связанных (частота, фазовый угол) и ряда неэлектрических величин (тем пература, давление, перемещения, усилия и т.д.).

Наиболее точные измерения сопротивлений постоянному току выполняются с помощью мостов постоянного тока. Эти мосты подразделяются на две группы:

1. одинарные (четырехплечие)
2. двойные (шестиплечие).

Одинарный мост, называемый мостом Уитстона, применяют для измерения сопротивлений от 1 Ом до 100 МОм.

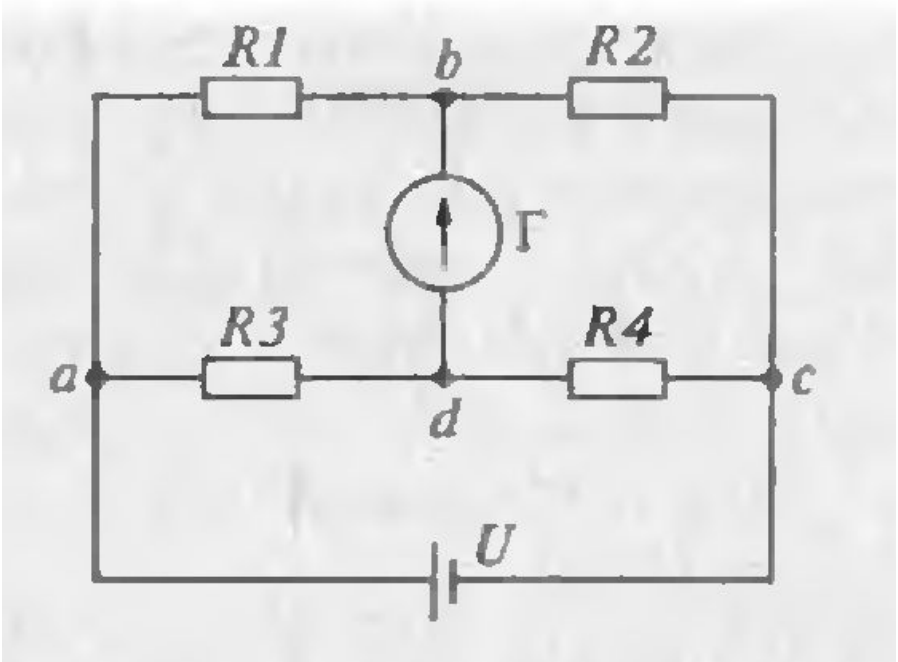


Рис. Схема одинарного моста постоянного тока.

Измеряемое сопротивление:

$$R_x = R_2 R_3 / R_4$$

Для измерения малых величин сопротивлений от 1 Ом и менее применяют двойной мост, называемый мостом Томсона, в котором влияние величин, вызывающих погрешность решения, сведены к минимуму.

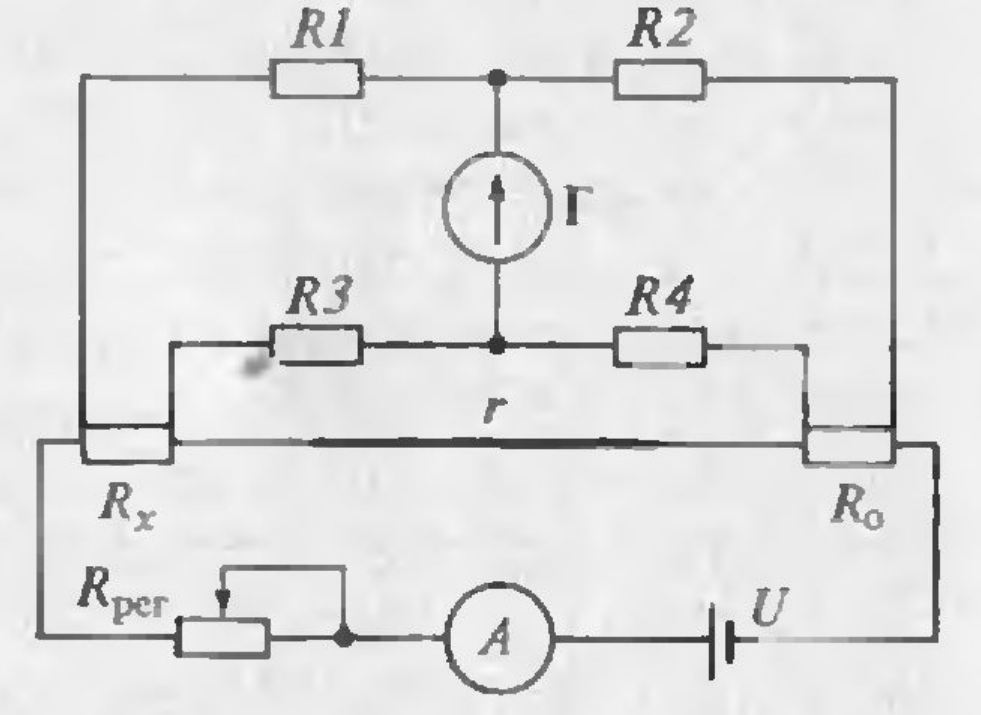


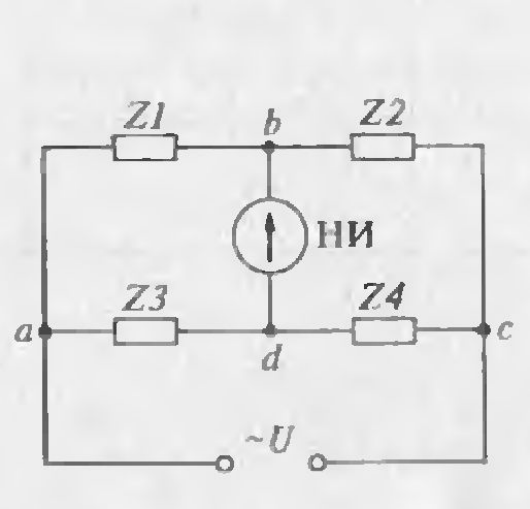
Рис. Схема двойного моста постоянного тока.

Измеряемое сопротивление:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} + \frac{rR_3}{r + R_3 + R_4}\left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_4}{R_3}\right)$$

Мосты переменного тока.

Измерение сопротивления индуктивности и емкости выполняется одинарными мостами на переменном токе



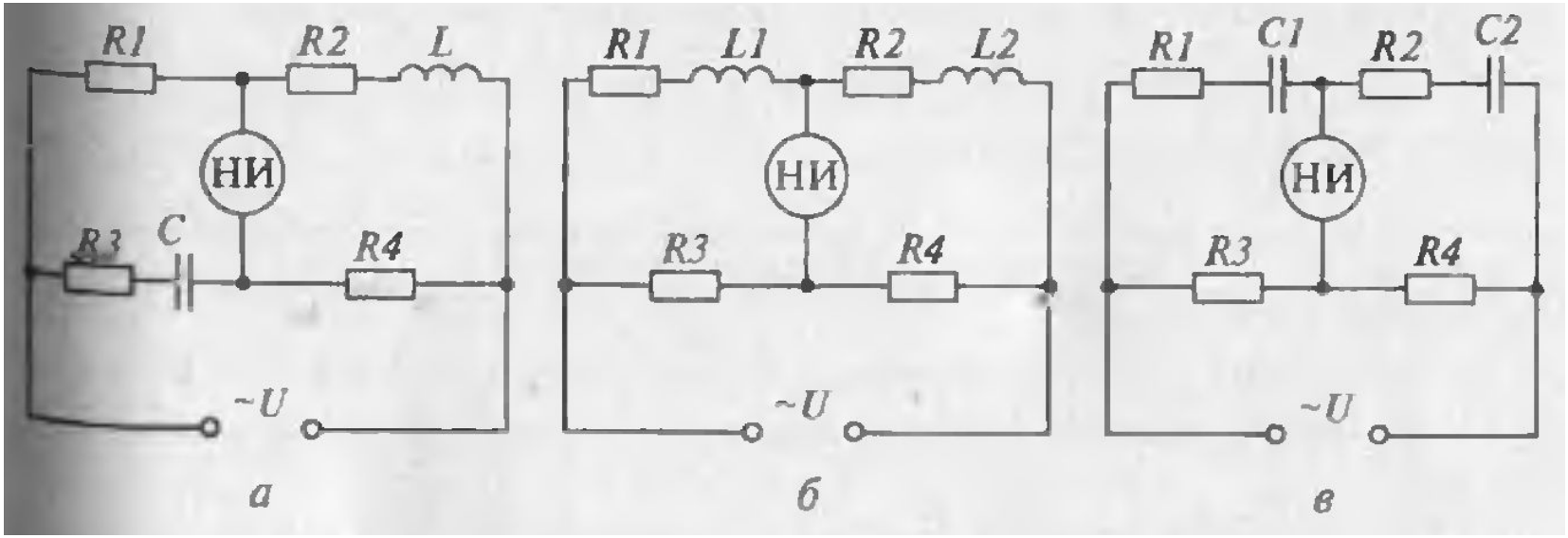


Рис. Схемы мостов с реактивными сопротивлениями: в противоположных (а) и смежных (б, в) плечах

Все мосты переменного тока можно подразделить на две группы:

- частотно-независимые, уравновешенные при одной частоте, сохраняющие равновесие при изменении частоты источника питания;
- частотно-зависимые, характеризуемые тем, что в условии равновесия помимо C, L, R имеется частота, входящая в выражение реактивных составляющих сопротивления.

Погрешность мостов переменного тока складывается из следующих составляющих:

- погрешности выполнения отдельных элементов мостовой схемы;
- погрешности подгонки элементов;
- погрешности от неполного учета активной и реактивной составляющих сопротивлений плеч моста;
- погрешности отсчетного устройства.

Измерение мощности и энергии

Активная (поглощаемая электрической цепью) мощность:

$$P_a = UI\cos\varphi = I^2R = U^2/R$$

где U, I – действующие значения напряжения и тока: - угол сдвига фаз.

Реактивная мощность:

$$P_p = UI\sin\varphi = I^2X$$

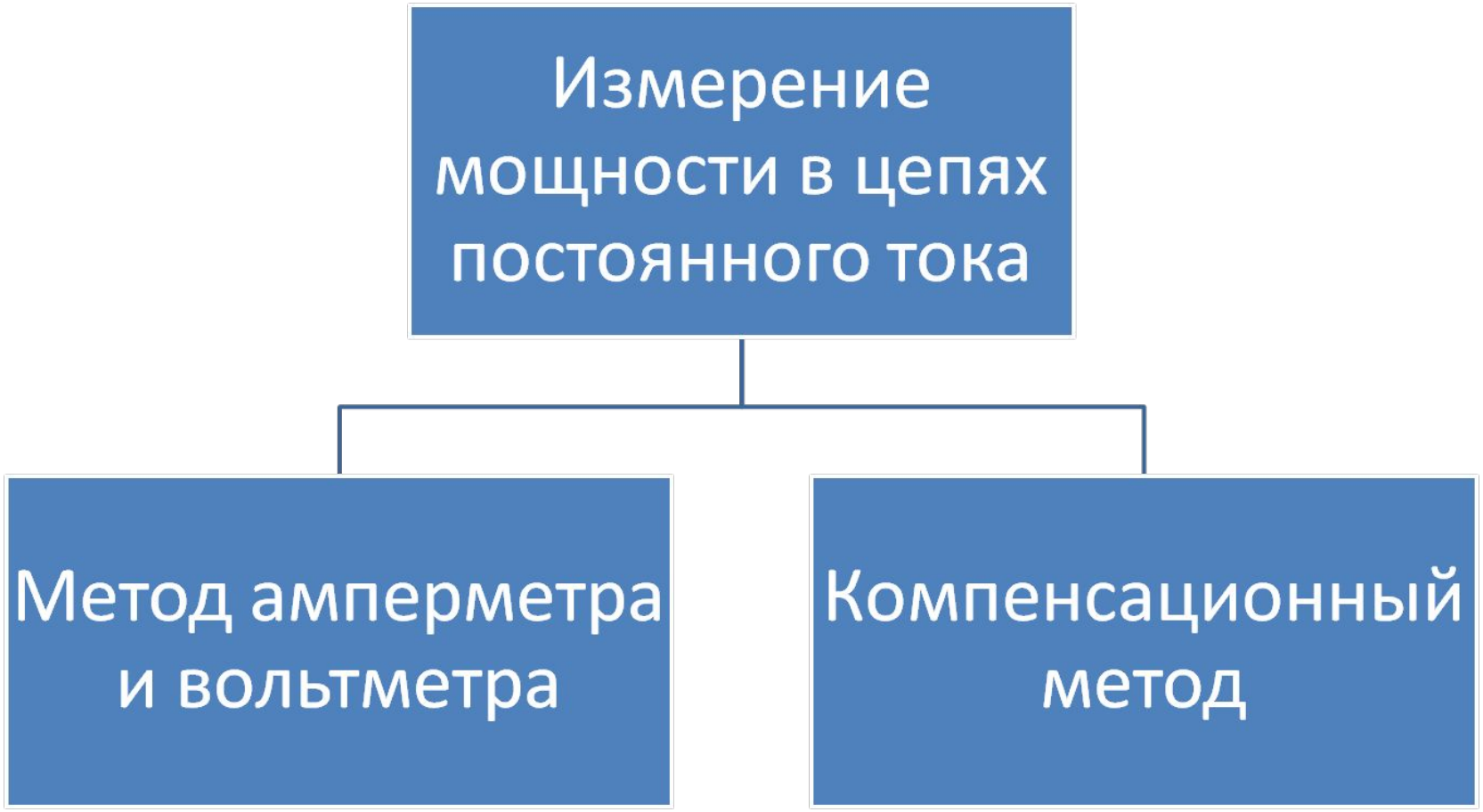
Полная мощность:

$$P_n = UI = I^2Z$$

Эти три типа мощности связаны выражением:

$$P = \sqrt{P_a^2 + P_p^2}$$

Измерение мощности в цепях постоянного тока



Метод амперметра и вольтметра

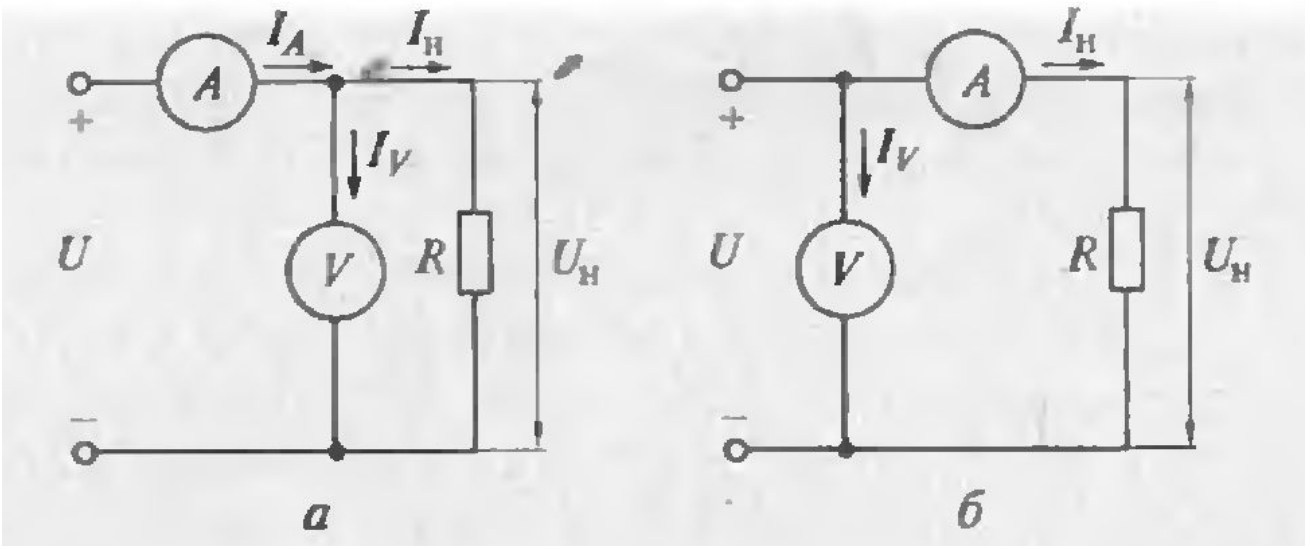


Рис. Схемы измерения мощности по показаниям вольтметра и амперметра при малых (а) и больших (б) сопротивлениях нагрузки

- Метод прост, надежен, экономичен, но обладает рядом существенных недостатков: необходимостью снимать показания по двум приборам;
- необходимостью производить вычисления; невысокой точностью за счет суммирования погрешности приборов.

Мощность вычисленная по показаниям приборов:

$$P_x = UI_A = (U_A + U_H)I_H = U_A I_H + U_H I_H = P_A + P_H$$

Компенсационный метод

Метод применяется тогда, когда требуется высокая точность измерения мощности. С помощью компенсатора поочередно измеряется ток нагрузки и падение напряжения на нагрузке. Измеряемая мощность определяется по формуле:

$$P = U_H I_H$$

При прямом измерении активная мощность измеряется электромеханическими (электродинамической и ферродинамической систем), цифровыми и электронными ваттметрами.

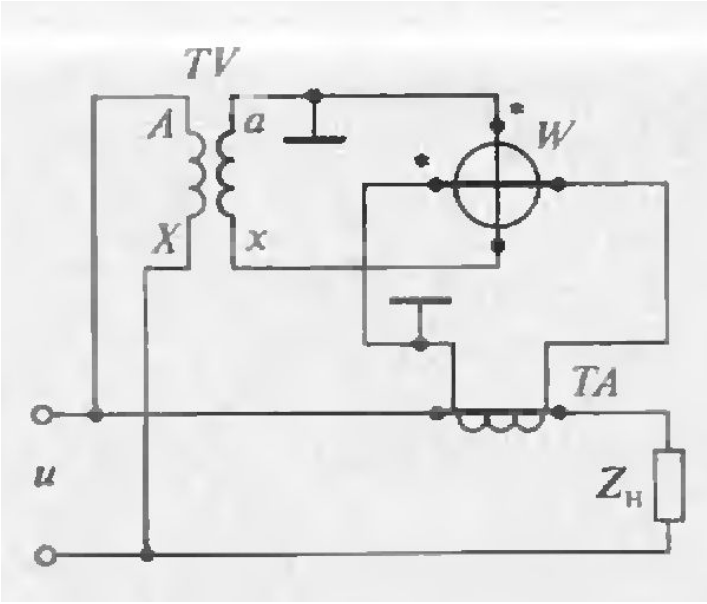
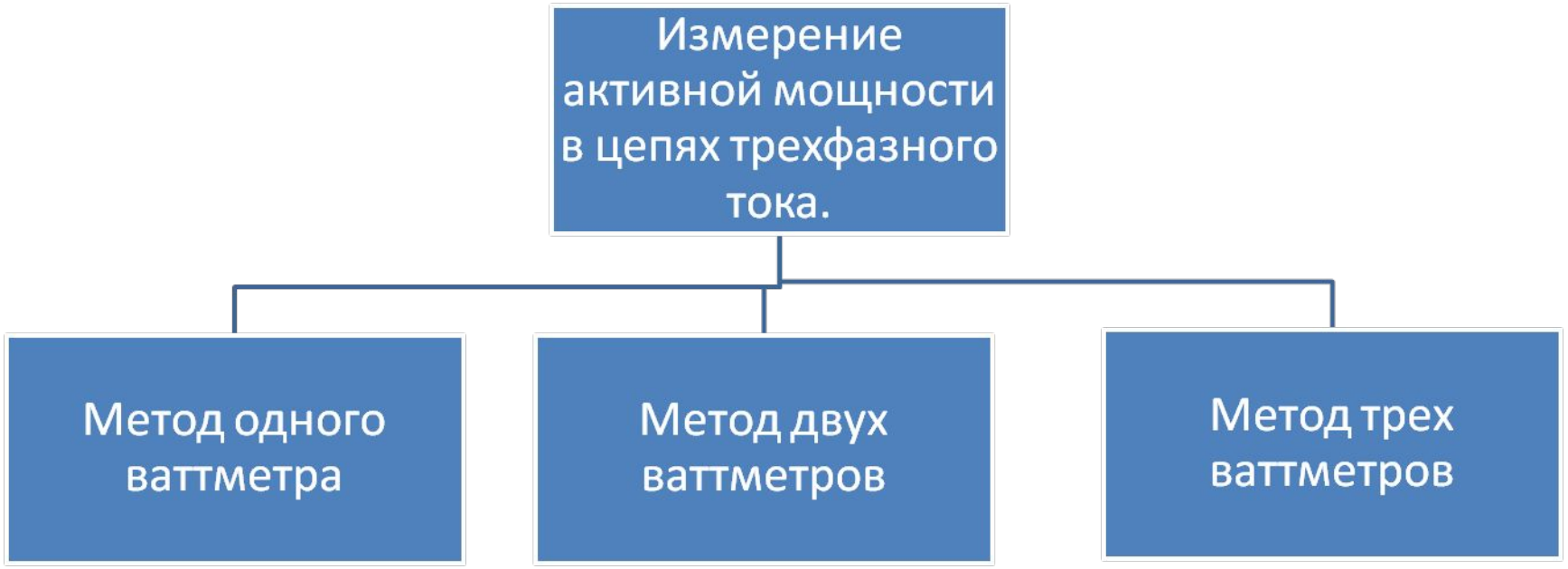


Рис. Схема включения электродинамического ваттметра через измерительные трансформаторы тока и напряжения

Измерение активной мощности в цепях трехфазного тока



Метод одного ваттметра

Применяется только в симметричной системе

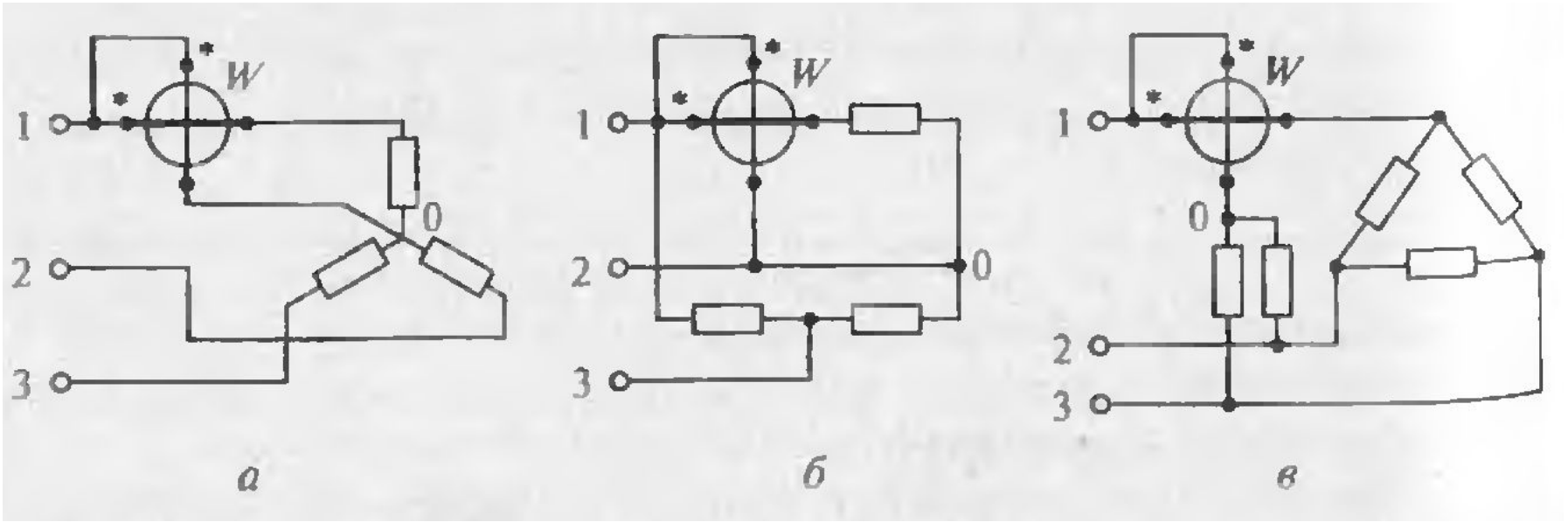


Рис. Схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при полной симметрии присоединения нагрузки: а – звездой; б – треугольником; в – с искусственной нулевой точкой

Метод двух ваттметров

Этот метод применяется в трехфазной трехпроводной цепи независимо от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений.

Полная мощность может быть выражена в виде показаний двух ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2} = I_1 U_{12} \cos\psi_1 + I_3 U_{32} \cos\psi_2$$

где ψ_1 - угол сдвига фаз между током I_1 и линейным напряжением U_{12} ; ψ_2 - угол сдвига фаз между током I_3 и линейным напряжением U_{32}

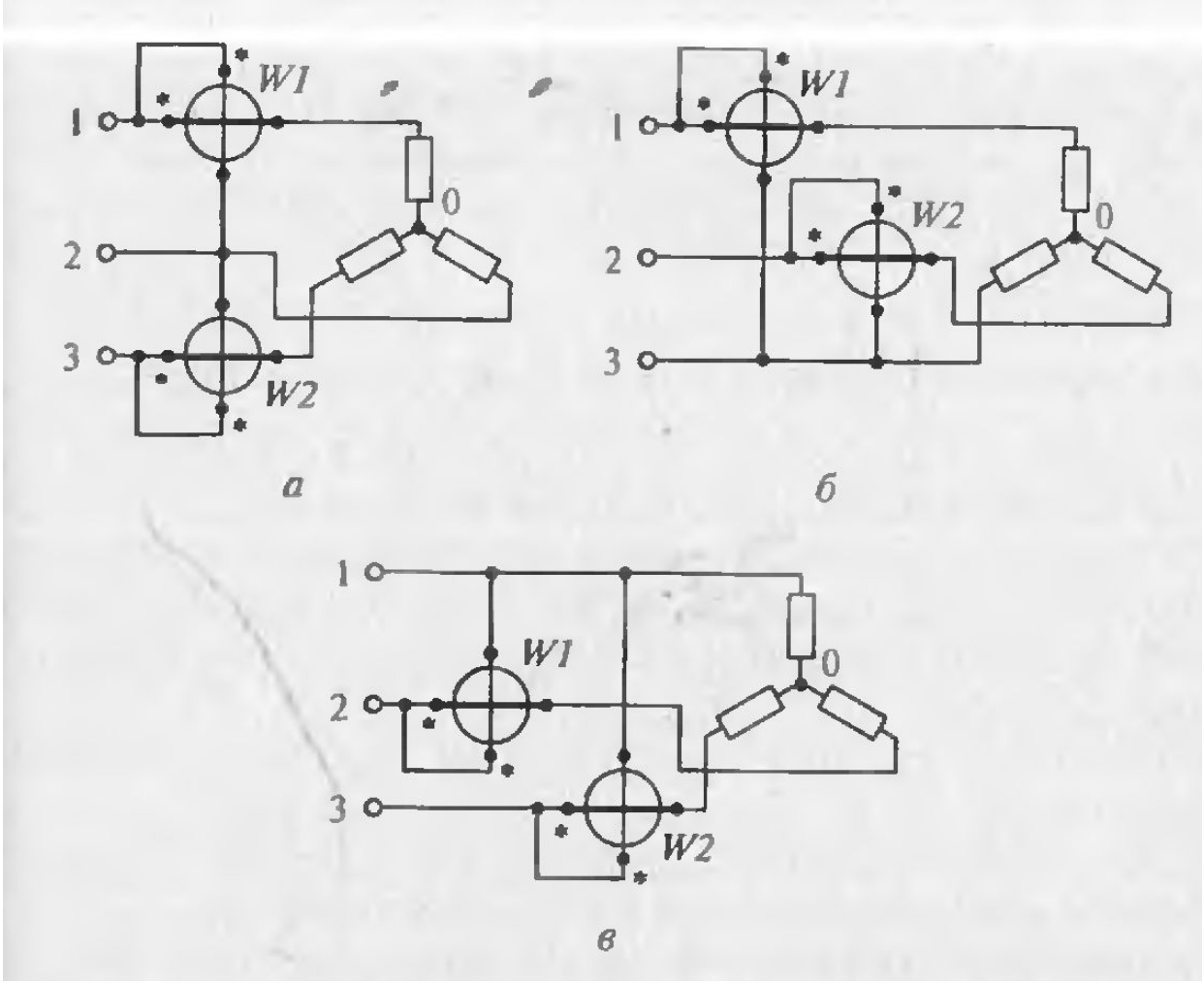


Рис. Схемы включения двух ваттметров в трехфазную цепь:
а – в 1-ю и 3-ю; б – в 1-ю и 2-ю; в – в 2-ю и 3-ю

Метод трех ваттметров

Для измерения мощности трехфазной цепи при несимметричной нагрузке включаются три ваттметра, и общая мощность при наличии нулевого провода будет равна арифметической сумме показаний трех ваттметров. В этом случае каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы, показания ваттметра независимо от характера нагрузки будут положительные (параллельная обмотка включается на фазное напряжение).

Метод измерения угла сдвига фаз

Косвенное измерение

Такое измерение угла сдвига фаз между напряжением ***U*** и током ***I*** в нагрузке в однофазных цепях, которое осуществляют с помощью трех приборов — вольтметра, амперметра и ваттметра

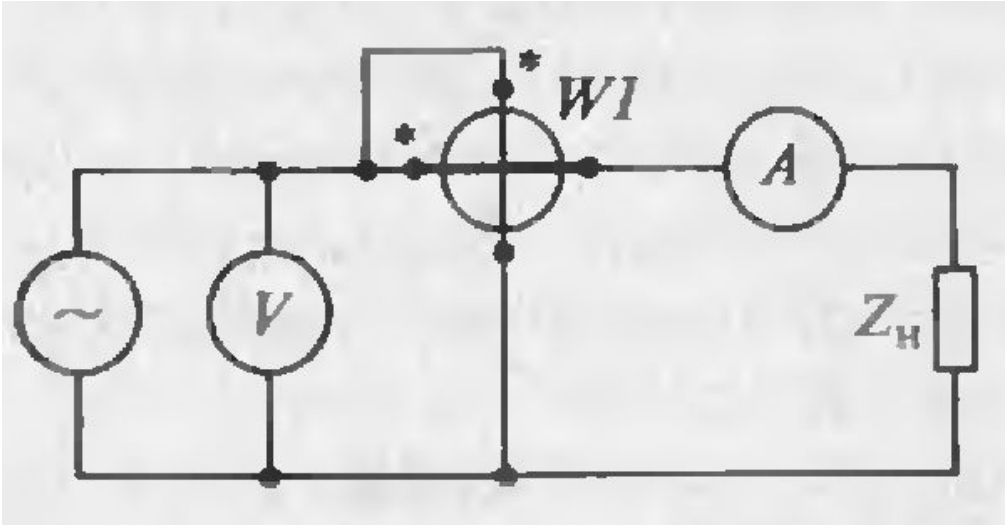


Рис. Измерение угла сдвига фаз методом трех приборов.

$$\varphi = \arccos\left[P/(UI)\right]$$

В трехфазной симметричной цепи величина cos(φ) может быть определена следующими измерениями:

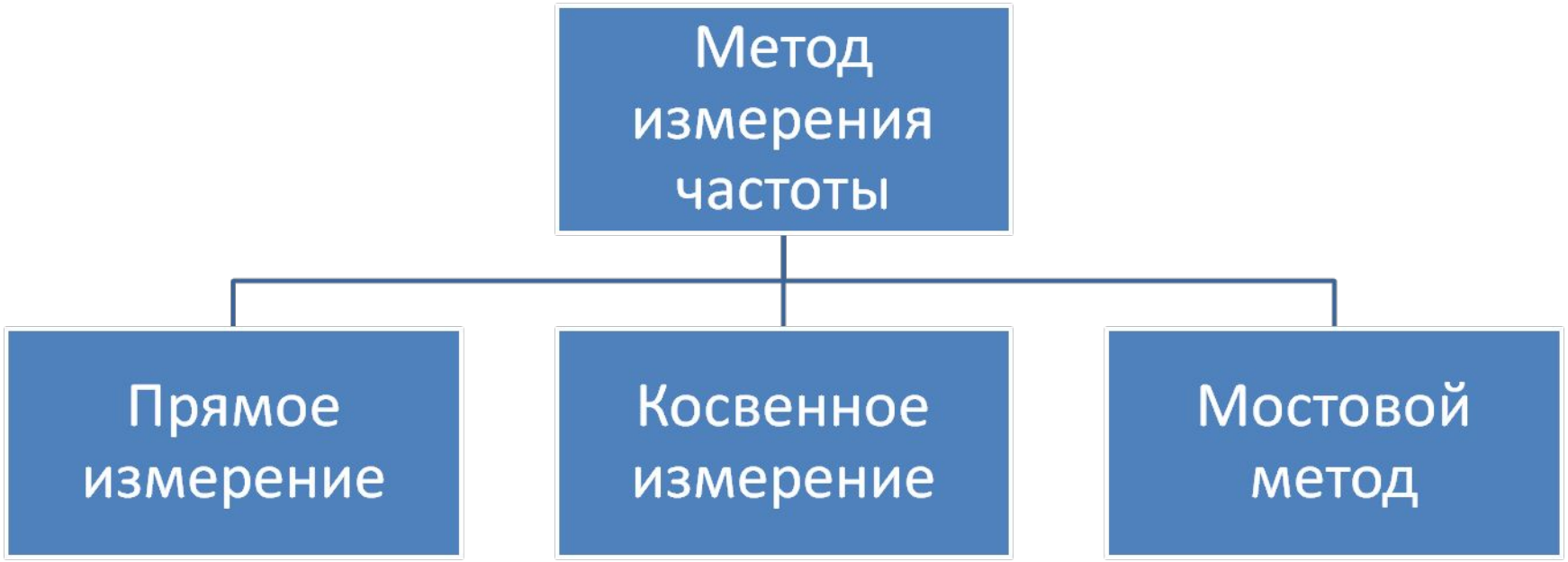
- мощность, ток и напряжение одной фазы;
- измерение активной мощности методом двух ваттметров
- измерение реактивной мощности методом двух ваттметров с искусственной нейтральной точкой

Прямое измерение

Прямое измерение угла сдвига фаз осуществляют с помощью электродинамических, ферродинамических, электромагнитных, электронных и цифровых фазометров.

Шкала у этих приборов линейная. Используют-на диапазоне частот от 50 Гц до 6... 8 кГц. Классы точности - 0,2; 0,5. Для них характерна большая потребляемая мощность(5…10 Вт).

Метод измерения частоты



Прямое измерение

Метод основан на применении электромеханических, электронных и цифровых частотомеров.

Электромеханические частотомеры используют измерительный механизм электромагнитной, электродинамической и ферродинамической систем с непосредственным отсчетом частоты по шкале логометрического измерителя

Мостовой метод

Этот метод измерения частоты основан на использовании частотозависимых мостов переменного тока, питаемых напряжением измеряемой частоты. Наиболее распространенной мостовой схемой для измерения частоты является емкостной мост. Мостовой метод измерения частоты применяют для измерения низких частот в пределах 20 *Гц* ...20 кГц, погрешность измерения составляет 0,5... 1 %.

Косвенное измерение

Метод осуществляется с использованием осциллографов: по интерференционным фигурам (фигурам Лиссажу) и круговой развертки. Методы просты, удобны и достаточно точны. Их применяют в широком диапазоне частот 10 Гц...20 МГц. Недостатком метода Лиссажу является сложность расшифровки фигур при соотношении фигур более 10 и, следовательно, возрастает погрешность измерения за счет установления истинного отношения частот. При методе круговой развертки погрешность измерения в основном определяется погрешностью квантования образцовой частоты.