

Московский государственный строительный
университет



Кафедра электротехники и электропривода

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Часть 1. Электрические и магнитные цепи.
Электрические измерения**

Лекция 8. Электрические измерения

Электронные лекции

Составитель:

профессор И.Г. Забора

Москва – 2014 г.

Лекцию читает

**профессор кафедры «Электротехника и
электропривод» МГСУ**

Забора Игорь Георгиевич

Е-mail: izabora@yandex.ru

Электрические измерения



Общие сведения об измерениях

Измерение – это опытное определение значений конкретной физической величины с помощью специального технического средства – измерительного прибора и выражение этих значений в принятых единицах.

Технические средства, используемые при проведении электрических измерений называются *средствами электрических измерений*.

Различают следующие виды средств электрических измерений:

- Меры;
- Электроизмерительные приборы;
- Измерительные преобразователи;
- Электроизмерительные установки;
- Измерительные информационные системы.

Мера – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины с определенными свойствами (размерами). Меры используют как эталоны, образцовые или рабочие средства измерений. В зависимости от погрешностей меры подразделяют на классы точности.

Электрические измерения



Общие сведения об измерениях

Меры электрических величин служат для воспроизведения электрических величин (сопротивления, индуктивности, емкости, ЭДС и др.) заданного размера. К мерам электрических величин относятся измерительные резисторы, катушки индуктивности, измерительные конденсаторы, нормальные элементы и др.

Набор мер представляет собой специально подобранный комплект мер для воспроизведения электрических величин различного размера. Примерами набора мер являются магазины сопротивлений, магазины емкостей и др.

Электроизмерительный прибор – это техническое средство измерений электрических и магнитных величин: тока, напряжения, мощности, электрической энергии, магнитного потока, емкости, индуктивности, частоты и т.д., в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительный преобразователь – это средство электрических измерений, представляющее основную часть измерительного прибора, в котором измеряемая величина преобразуется в другую физическую величину в виде, удобном для подачи на индикаторные или регистрирующие устройства.

Электрические измерения



Общие сведения об измерениях

Электроизмерительные преобразователи делятся на две группы:

- *преобразователи электрических величин в электрические* (шунты, делители напряжения, трансформаторы, усилители и др.);
- *преобразователи неэлектрических величин в электрические* (термо- и тензорезисторы, пьезоэлектрические, электростатические, магнитоэлектрические, гальваномагнитные и др. преобразователи).

Измерительная установка – это несколько объединенных средств электрических измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, расположенных в одном месте и выполняющих определенные функции, обусловленные назначением установки. При помощи таких установок производят более сложные и точные измерения, чем при помощи отдельных измерительных приборов.

Электроизмерительные установки используются, например, для поверки и градуировки электроизмерительных приборов, при проведении исследований свойств проводниковых, магнитных и изоляционных материалов, испытании электрических машин и др.

Электрические измерения



Общие сведения об измерениях

Измерительная информационная система представляет собой совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи. Измерительные информационные системы предназначены для автоматического получения измерительной информации от ряда ее источников, а также для передачи и обработки этой информации.

Примером измерительной информационной системы является *АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета электроэнергии*, широко используемая на объектах жилищно-коммунального хозяйства.

Электроизмерительные приборы бывают *аналоговые* и *цифровые*.

В *аналоговых приборах* наблюдаемые показания являются непрерывными функциями измеряемых величин.

В *цифровых приборах* измеряемые величины преобразуются в дискретные сигналы и представлены в цифровой форме.

Все измерения в зависимости от способа получения результата делятся на *прямые* и *косвенные*.

Электрические измерения



Общие сведения об измерениях

При *прямом измерении* используют *приборы непосредственной оценки*, в которых измеряемую величину определяют непосредственно по показанию прибора, шкала которого проградуирована в соответствующих единицах.

Более точные, хотя и более сложные измерения в электротехнике проводят с использованием *косвенного метода*, так называемого *метода сравнения*, в основе которого лежит сравнение измеряемой величины с определенной воспроизводимой мерой.

Метод сравнения может быть *компенсационным* и *мостовым* с использованием более сложных измерительных приборов, чем приборы непосредственной оценки.

Основные измеряемые величины и единицы измерения в электротехнике

Отечественные и международные стандарты метрологии устанавливают применение международной системы единиц **СИ**, основными единицами которой являются: *метр (м)*, *килограмм (кг)*, *секунда (с)*, *ампер (А)*, *кельвин (К)* и *кандела (кд)*.

Электрические измерения



Общие сведения об измерениях

Единицы электрических и магнитных величин являются составной частью международной системы единиц **СИ** и обязательно применимы в научно-технической литературе, а также в конструкторской, технологической и другой технической документации с использованием русских или международных обозначений единиц величин.

Наименования электрических, магнитных и некоторых других величин, их буквенные обозначения и единицы измерения в системе **СИ** приведены в Приложении 3 учебного пособия по лабораторным работам [2].

Электрические измерения



Погрешности измерений

Виды погрешностей

При любом измерении неизбежно некоторое расхождение между измеренным $A_{\text{и}}$ и действительным $A_{\text{д}}$ значениями измеряемой величины, называемое *погрешностью измерения*.

Разность между показаниями прибора $A_{\text{и}}$ и действительным значением измеряемой величины $A_{\text{д}}$ называется *абсолютной погрешностью* измерения и выражается в единицах измеряемой величины: $\Delta A = A_{\text{и}} - A_{\text{д}}$.

Оценкой точности произведенного измерения является *относительная погрешность*, которая представляет собой отношение абсолютной погрешности ΔA к действительному (истинному) значению измеряемой величины $A_{\text{д}}$, выраженное обычно в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_{\text{д}}} 100\% = \frac{A_{\text{и}} - A_{\text{д}}}{A_{\text{д}}} 100\%$$

Электрические измерения



Погрешности измерений

Виды погрешностей

Точность измерения, связанная с точностью самого прибора оценивается *приведенной погрешностью* γ , которая в свою очередь определяется отношением абсолютной погрешности ΔA к *нормированному значению измеряемой величины* A_H :

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_H}.$$

Отсюда следует, что абсолютная погрешность измерения может быть определена, как произведение приведенной погрешности γ и нормированного значения измеряемой величины A_H : $\Delta A = \gamma A_H$.

Нормированное значение измеряемой величины A_H для большинства приборов *определяется верхним пределом или диапазоном измерения по шкале*.

По своему характеру погрешности делятся на *систематические, случайные и промахи*.

Электрические измерения



Погрешности измерений

Виды погрешностей

В свою очередь, *систематическая погрешность*, присущая прибору, подразделяется на *основную погрешность*, обусловленную особенностями конструкции и несовершенством изготовления и *дополнительную погрешность*, вызываемую влиянием на показания приборов различных внешних факторов (температура, влажность, давление, вибрации, внешние магнитные поля и т.д.).

Классы точности измерительных приборов

Допустимое значение основной погрешности электроизмерительного прибора характеризует его класс точности.

Все электроизмерительные приборы подразделяются на *восемь классов точности*: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Число, обозначающее класс точности указывает на наибольшее допустимое значение основной погрешности прибора, выраженное в процентах.

Электрические измерения



Погрешности измерений

Виды погрешностей

Основная погрешность исчисляется в процентах от предела измерения прибора, а не от действительного значения измеряемой величины. Указанная погрешность характеризует только точность самого прибора, но не точность измерений, которая определяется относительной погрешностью.

Пример

Амперметр класса 1,5 с пределом измерения 50 А может иметь погрешность $\pm 1,5 \cdot 50/100 = \pm 0,75$ А, независимо от того, какой ток (большой или малый) измеряет при этом прибор. Класс точности указывается на шкале каждого измерительного прибора и представляет собой определенное число из вышеприведенного ряда восьми чисел.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Типы измерительных приборов

По роду измеряемой величины электроизмерительные приборы подразделяются на *амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики электрической энергии, частотомеры, фазометры, омметры* и т.д.

Условное обозначение прибора по роду измеряемой величины наносится на лицевую сторону прибора.

В зависимости от вида получаемой измерительной информации приборы подразделяются на показывающие, самопишущие, печатающие, интегрирующие, суммирующие. Классификация наиболее употребительных электроизмерительных приборов непосредственной оценки по роду измеряемой величины и графическое условное обозначение этих приборов приведены в таблице 7 приложения 7 учебного пособия по лабораторным работам [2]. В таблице 7.2. этого приложения приведены основные из условных обозначений, проставляемых на шкале электроизмерительных приборов. Эти обозначения и другие характеристики приборов указываются на лицевой панели электрических измерительных приборов (см. рис. 1).

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы



Рис. 1. Лицевая панель аналогового стрелочного прибора непосредственной оценки

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Типы измерительных приборов

В таблице 5.3. Приложения 5 учебного пособия по лабораторным работам [2] представлены условные обозначения основных систем измерительных приборов. Наиболее распространенными системами аналоговых показывающих приборов непосредственной оценки являются *магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая и индукционная системы.*

Магнитоэлектрические приборы

Принцип действия *приборов магнитоэлектрической системы (см. рис.2)* основан на воздействии магнитного поля постоянного магнита на подвижную катушку с током, помещенную в это поле. Измеряемый ток проходит по легкой катушке **1**, выполненной из тонкого изолированного провода, помещенной между полюсами постоянного магнита с полюсными наконечниками **3**. Для усиления потока между полюсами магнита и увеличения чувствительности магнитоэлектрического прибора внутри катушки размещен цилиндрический железный сердечник **2**.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Магнитоэлектрические приборы

Ток в катушку подводится через две спиральные пружины, одновременно служащие для создания противодействующего момента.

Под действием электромагнитного момента, созданного в результате взаимодействия проводников с током в подвижной катушке и поля постоянного магнита, катушка и связанная с нею стрелка прибора поворачиваются на угол, прямо пропорциональный измеряемому току:

$$\alpha = S_I I,$$

где α , град – угол поворота катушки и стрелки; I , А – измеряемый ток; $S_I = \text{const}$, град/А – чувствительность прибора магнитоэлектрической системы.

Так как направление поворота катушки и стрелки магнитоэлектрического прибора зависит от направления измеряемого тока, то для получения отклонения указателя стрелки в нужную сторону **необходимо при включении прибора в цепь постоянного тока соблюдать указанную на приборе полярность.**

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Магнитоэлектрические приборы

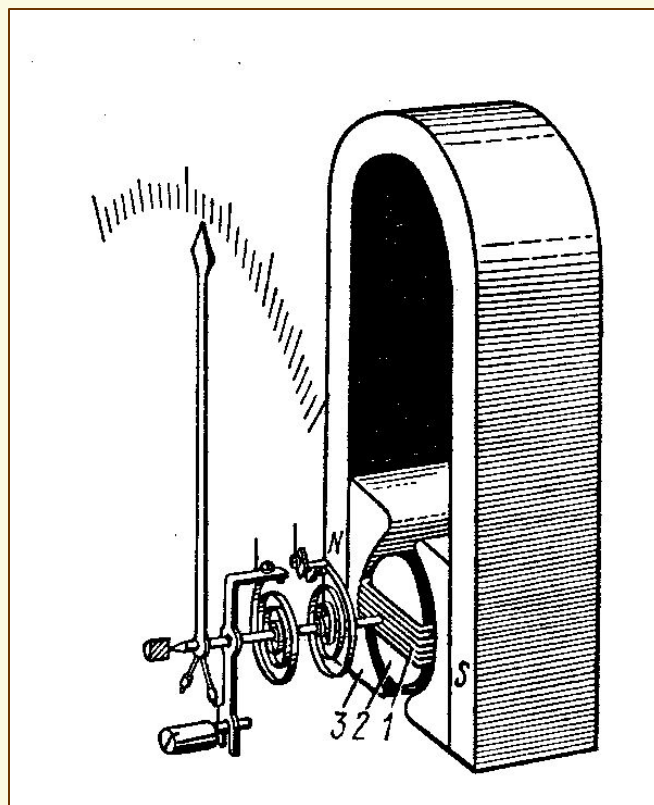


Рис. 2. Устройство прибора магнитоэлектрической системы

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Магнитоэлектрические приборы

При включении измерительного прибора магнитоэлектрической системы непосредственно в цепь переменного тока на подвижную катушку действуют быстроменяющиеся по величине и направлению вращающие электромагнитные моменты, среднее значение которых за период колебания тока равно нулю.

По этой причине *магнитоэлектрический прибор пригоден для непосредственных измерений только в цепях постоянного тока*, что является *недостатком приборов магнитоэлектрической системы*.

Достоинства приборов магнитоэлектрической системы:

- высокая чувствительность к измеряемой величине;
- высокая точность (класс точности до 0,05);
- малое собственное потребление активной мощности;
- малая чувствительность к внешним магнитным полям;
- равномерная шкала во всем диапазоне измерений.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Магнитоэлектрический прибор с выпрямительным преобразователем

Измерительные приборы *выпрямительной системы (детекторные приборы)* представляют собой сочетание магнитоэлектрических приборов с преобразователями – *полупроводниковыми выпрямителями*. Выпрямитель преобразует измеряемый синусоидальный ток в пульсирующий ток одного направления, который измеряется магнитоэлектрическим прибором.

Достоинствами детекторных приборов являются высокая чувствительность, небольшая собственная потребляемая мощность. Их можно использовать при повышенных частотах (без частотной компенсации – до 2000 Гц, а с частотной компенсацией – до 40 кГц).

Магнитоэлектрический прибор с термопреобразователем

Приборы *термоэлектрической системы* представляют собой сочетание магнитоэлектрического прибора с измерительным преобразователем в виде *термопреобразователя*, состоящим из термопары и нагревательного элемента, через который проходит измеряемый переменный ток.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Магнитоэлектрический прибор с термопреобразователем

Постоянный ток, текущий через катушку магнитоэлектрического прибора и вызывающий отклонение стрелки, пропорционален электродвижущей силе термопары, Эта ЭДС в свою очередь пропорциональна количеству теплоты, выделяемому в проволочном нагревательном элементе и квадрату измеряемого действующего значения переменного тока.

Основным достоинством приборов термоэлектрической системы является возможность измерения с их помощью переменных токов высокой частоты, в частности, тока в пределах 0,001 – 50 А частотой до 5 МГц, а также напряжения в пределах 0,1 – 1000 В частотой от 20 Гц до 3 МГц.

К недостаткам термоэлектрических приборов относятся малая перегрузочная способность, значительное собственное потребление мощности, зависимость показаний прибора от температуры окружающей среды, ограниченный срок службы термопар.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электромагнитные приборы

Принцип действия *приборов электромагнитной системы* (см. рис. 3) основан на физическом явлении воздействия магнитного поля на ферромагнитное тело. Железный (стальной) подвижный сердечник под действием магнитного поля катушки с током намагничивается и стремится расположиться внутри катушки так, чтобы магнитный поток был наибольшим.

В электромагнитном приборе измеряемый ток, проходя через витки плоской катушки, создает магнитное поле, которое втягивает внутрь катушки **1** тонкий листок электротехнической стали **3**, закрепленный эксцентрично на оси прибора. К этой же оси прикреплены указательная стрелка и спиральная пружина **2**, создающая противодействующий момент. Успокоение подвижной системы осуществляется воздушным демпфером **4**. Вращающий момент, действующий на ферромагнитный листок и отклоняющий стрелку прибора, пропорционален квадрату действующего значения тока, проходящего через катушку, и изменению индуктивности катушки при повороте подвижной части прибора: $M_{BP} = K_1 I^2$



Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электромагнитные приборы

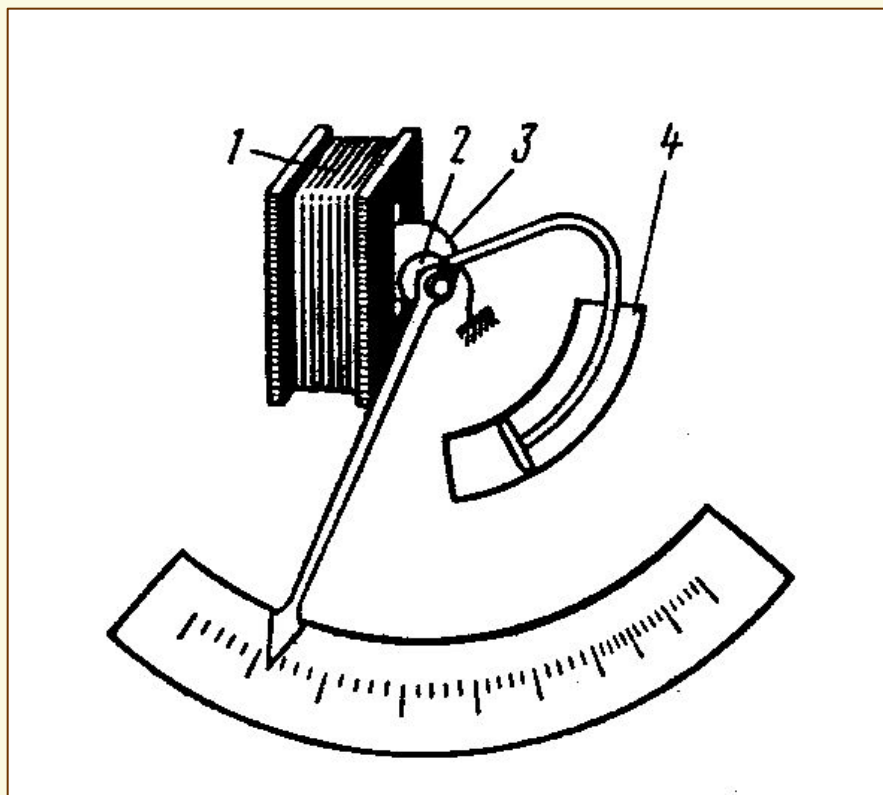


Рис. 3. Устройство прибора электромагнитной системы

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электромагнитные приборы

При изменении направления тока в катушке на обратное – одновременно меняются на противоположные – магнитные *полюса ферромагнитного сердечника*. Поэтому сердечник по-прежнему втягивается в катушку и направление вращающего момента подвижной части прибора не меняется. Следовательно, *приборы электромагнитной системы пригодны для измерения в цепях как постоянного, так и переменного тока.*

Основные достоинства электромагнитных приборов:

- непосредственное измерение в цепях постоянного и переменного тока без дополнительных преобразователей;
- простота конструкции и сравнительная дешевизна этих приборов;
- большая перегрузочная способность и, как следствие – высокая надежность эксплуатации;

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электромагнитные приборы

К недостаткам этих приборов можно отнести:

- малую точность (не высокий класс точности);
- низкую чувствительность;
- неравномерность шкалы (особенно сильно она сжата в начале).

Последнее объясняется тем, что вращающий момент и, следовательно, угол отклонения стрелки прибора пропорционален квадрату измеряемого тока.

(см. формулу выше).

Несмотря на это, из-за своих достоинств, приборы электромагнитной системы широко используются в электротехнических устройствах постоянного тока и промышленной частоты 50 Гц в виде щитовых амперметров и вольтметров, где не требуется высокая точность измерений.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электродинамические приборы

Электродинамические приборы основаны на принципе взаимодействия проводников, по которым протекает ток: два проводника с одинаково направленными токами взаимно притягиваются, а с противоположно направленными токами - взаимно отталкиваются.

Прибор этой системы (см. рис. 4) состоит из неподвижной катушки **2**, через которую протекает ток I_1 и подвижной катушки **3** с током I_2 . В подвижную катушку ток подводится через спиральные пружинки **1**, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Подвижная катушка стремится повернуться таким образом, чтобы направление ее магнитного поля совпало с направлением поля неподвижной катушки. Успокоение подвижной системы осуществляется воздушным демпфером **4**.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электродинамические приборы

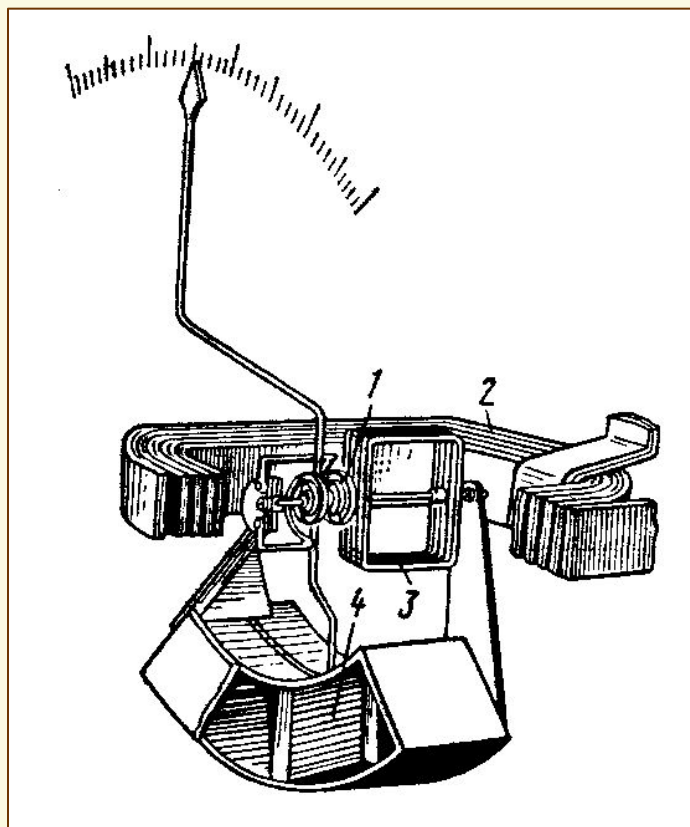


Рис. 4. Устройство прибора электродинамической системы

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электродинамические приборы

Вращающий момент и угол поворота стрелки электродинамического прибора пропорционален произведению токов в катушках и косинусу угла сдвига между токами $\cos\phi$:

$$M_{\text{вр}} = K_1 I_1 I_2 \cos\phi.$$

Электродинамические приборы в основном применяют для измерения тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного тока.

Шкалы электродинамических вольтметров и амперметров – неравномерные, а ваттметров – практически равномерные.

Электродинамические приборы обеспечивают наиболее высокую точность (класс точности до 0,1) при измерении в цепях переменного тока частотой до 20 кГц (*достоинства*), однако они не выносят перегрузку, потребляют довольно значительную мощность и на их показания влияют внешние магнитные поля (*недостатки*).

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Ферродинамические приборы

Разновидностью приборов электродинамической системы являются *ферродинамические приборы*, у которых для повышения вращающего электромагнитного момента магнитный поток неподвижной катушки создается в специальном магнитопроводе.

Конструкция ферродинамического прибора, показанного на **рис. 5** аналогична вышеописанной конструкции прибора магнитоэлектрической системы, но вместо постоянного магнита стоит электромагнит.

Неподвижная катушка **1** из двух секций расположена на двух стержнях магнитопровода **4**. Между полюсными наконечниками магнитопровода укреплен цилиндрический сердечник **3**. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод и цилиндрический сердечник изготавливают из тонких листов (0,5 мм) электротехнической стали или прессуют из ферромагнитного порошка с электроизоляционным наполнителем.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Ферродинамические приборы

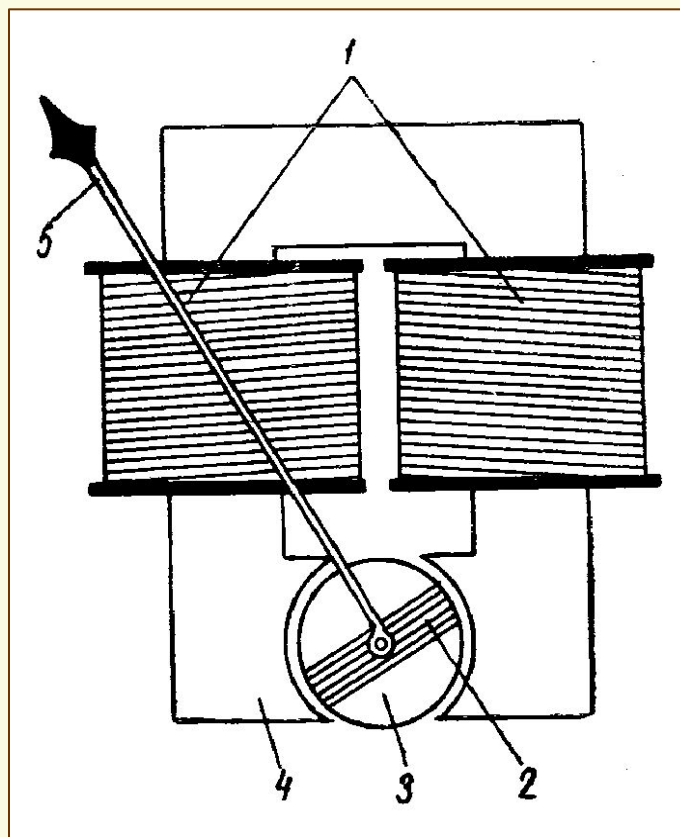


Рис. 5. Устройство прибора ферродинамической системы

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Ферродинамические приборы

В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником помещается подвижная катушка **2**, укрепленная на одной оси со стрелкой **5**. Ток в подвижную катушку подается через спиральные пружины, создающие противодействующий момент.

В воздушном зазоре образуется достаточно сильное равномерное магнитное поле, индукция которого пропорциональна току в неподвижной катушке.

Взаимодействие тока подвижной катушки с магнитным полем в воздушном зазоре создает вращающий электромагнитный момент, который, как и в электродинамических приборах, зависит от токов в неподвижной I_1 и подвижной I_2 катушках и косинусу угла сдвига между ними: $M_{\text{вп}} = K_1 I_1 I_2 \cos\phi$. Ферромагнитный сердечник вносит дополнительные погрешности в измерения, однако применение высококачественных материалов и совершенной технологии изготовления позволяет получить ферродинамические ваттметры класса точности 0,2.

Существенным недостатком приборов ферродинамической системы является зависимость их параметров от частоты измеряемого тока.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Индукционные приборы

В индукционных приборах вращающий момент создается взаимодействием вихревых переменных токов, индуцируемых в подвижной части (в диске) прибора магнитными потоками двух электромагнитов. Противодействующий момент создается спиральной пружиной или тормозным действием наводимых в диске токов. Вращающий момент индукционного прибора пропорционален произведению магнитных потоков, создаваемых электромагнитами и синусу угла сдвига фаз между этими потоками, близкого к 90° . Индукционные приборы выпускают в виде вольтметров, амперметров, ваттметров. Наиболее широкое распространение получили *индукционные счетчики электрической энергии*.

Электростатические приборы

В измерительных механизмах приборов *электростатической системы* (**см. рис. 6**) вращающий момент создается электростатическими силами взаимодействия заряженных электродов. Среди приборов этой системы наиболее распространен *электростатический вольтметр*.

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электростатические приборы

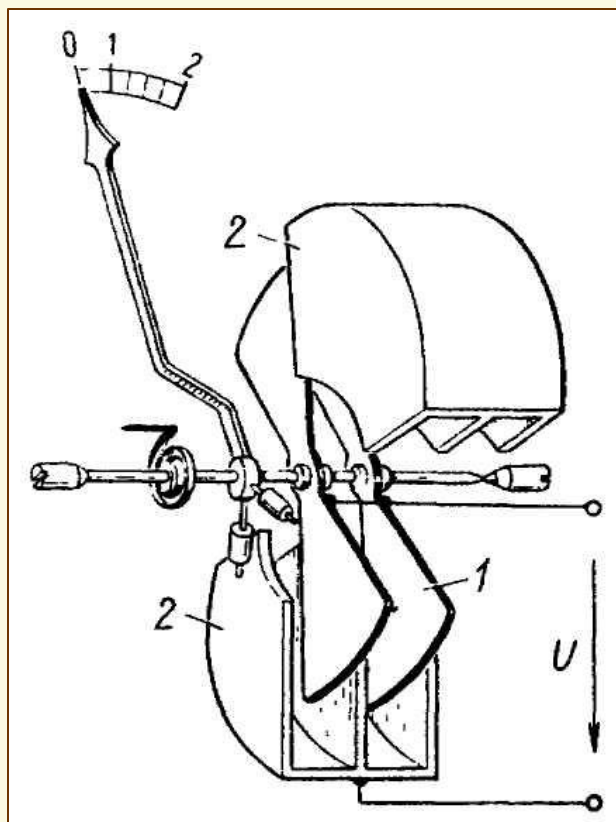


Рис. 6. Устройство прибора электростатической системы

Электрические измерения



Электроизмерительные приборы

Электростатические приборы

Под действием измеряемого напряжения заряжаются системы подвижных **1** и неподвижных **2** пластин прибора. Возникающие при этом *электростатические силы притяжения создают вращающий момент*. Противодействующий момент создается пружиной.

Изменение полярности напряжения не влияет на направления действия вращающего момента. Следовательно, *электростатический вольтметр пригоден для измерения и постоянного, и переменного напряжений*. В ряде случаев весьма существенным преимуществом прибора следует считать то, что он практически не потребляет энергии. Однако при небольших напряжениях вращающий момент весьма мал, приходится увеличивать число пластин и вместо установки на кернах подвешивать подвижную часть на нити.

Электростатические вольтметры применяются преимущественно в лабораториях для измерений в цепях малой мощности и *при непосредственных измерениях высоких напряжений*.

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Измерение тока

Для измерения **тока** используется **амперметр**, включаемый в цепь последовательно с электроприемником (см. рис. 7). Показания амперметра позволяют судить с определенной погрешностью о токе I_H протекающем через данный электроприемник–нагрузку R_H .

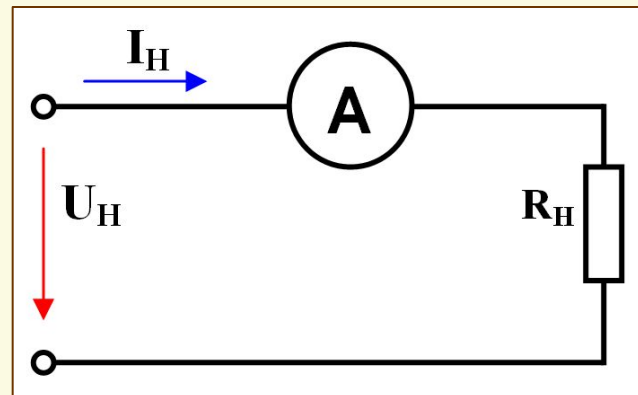


Рис. 7. Схема включения амперметра для измерения тока

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Измерение тока

При *измерении переменного синусоидального тока* стрелки приборов электромагнитной, электродинамической, выпрямительной и тепловой систем будут давать отклонения пропорционально *действующему значению тока*, и в этих значениях, как правило, градуируют шкалы таких приборов.

При измерении *несинусоидального переменного тока* появляется *дополнительная погрешность*, вызванная влиянием высших гармоник в кривой тока на вращающий момент подвижной части и отклонение стрелки и, следовательно, на показания прибора.

Сопротивление измерительной катушки амперметра очень мало и его последовательное включение с нагрузкой практически не вызывает увеличение сопротивления цепи и потери мощности. Так, внутреннее сопротивление амперметров колеблется от $R_A = 0,2 \text{ Ом}$ (электромагнитные и электродинамические системы амперметров) до $R_A = 0,01 \text{ Ом}$ (магнитоэлектрические приборы).

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения амперметра

Для расширения пределов измерения амперметров применяют *шунты* и измерительные *трансформаторы тока*.

Шунт представляет собой активное сопротивление (резистор) $R_{\text{ш}}$ сравнительно малой величины, включаемое параллельно к зажимам амперметра (см. рис. 8).

В том случае, когда сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$ меньше сопротивления измерительной катушки амперметра R_A , сравнительно большая часть измеряемого тока I_H проходит через шунт, а в амперметр ответвляется только его небольшая часть I_A , определяемая соотношением сопротивлений амперметра R_A и шунта $R_{\text{ш}}$:
$$I_A = \frac{I_H R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_A}.$$

Из этой формулы можно получить выражение для расчета необходимой величины сопротивления шунта:

$$R_{\text{ш}} = \frac{I_A R_A}{I_H - I_A}.$$

Шкала амперметра с шунтом градуируется на полный ток I_H , протекающий через нагрузку.

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения амперметра

Таким образом, использование в амперметрах шунтов позволяет измерять большие постоянные или синусоидальные токи приборами, измерительные катушки которых рассчитаны на малые токи.

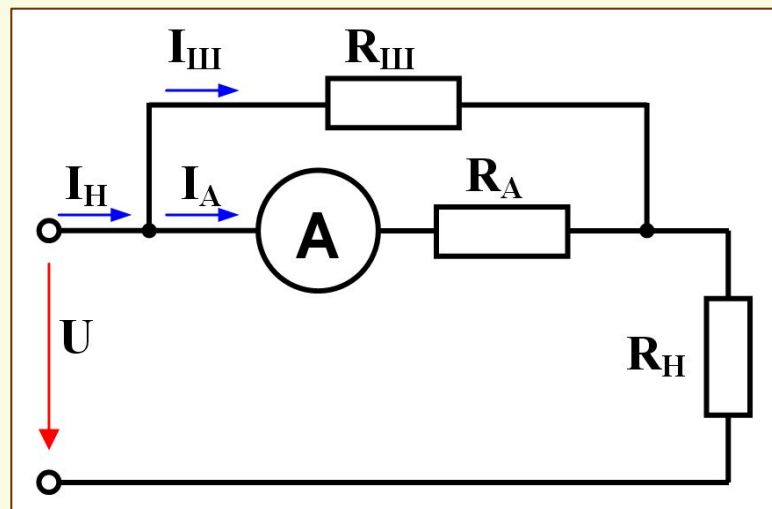


Рис. 8. Схема включения амперметра с шунтом для измерения больших токов

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения амперметра

Трансформатор тока используется для расширения пределов измерения в цепях переменного тока и включается по схеме, представленной на **рис. 9**. Первичная обмотка W_1 трансформатора тока зажимами L_1 и L_2 включается в линию переменного тока последовательно с электроприемником (нагрузкой R_H). Ко вторичной обмотке W_2 трансформатора тока через зажимы I_1 и I_2 подключается амперметр и, в случае необходимости, катушки других измерительных приборов (ваттметра, счетчика электроэнергии и др.), которые соединяются между собой последовательно.

Трансформатор тока работает в условиях, близких к условиям короткого замыкания. Поэтому можно считать что:

$$I_1 = \frac{W_2}{W_1} I_2 = K_I I_2,$$

то есть, первичный ток I_1 определяется умножением вторичного тока I_2 , измеряемого амперметром, на постоянный коэффициент трансформации K_I , который больше единицы, поскольку у трансформатора тока $W_2 > W_1$.

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения амперметра

Номинальный ток вторичной обмотки у трансформаторов тока принимается равным **5А**, независимо от коэффициента трансформации.

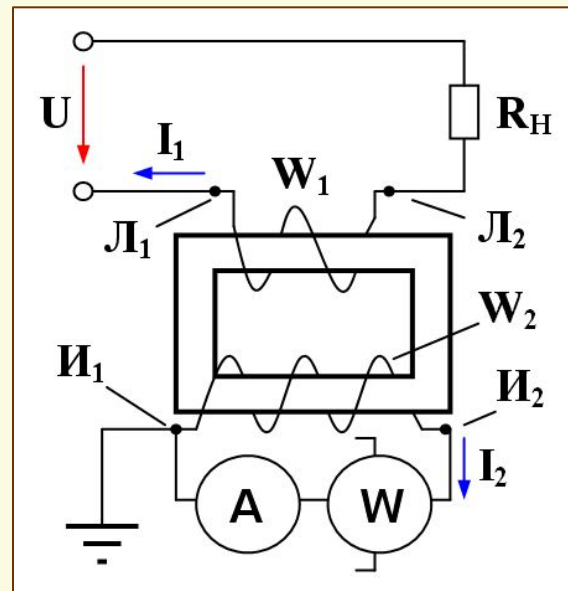


Рис. 9. Схема включения трансформатора тока в измерительную цепь

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения амперметра

Шкала амперметра, использующего трансформатор тока, градуируется на первичный ток. На ней указывается с каким трансформатором тока должен быть включен амперметр (например, **100/5 А**, **200/5 А**). Вторичная цепь трансформатора тока должна быть всегда замкнута. В целях электробезопасности один зажим вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора заземляются.

Помимо расширения пределов измерения, трансформаторы тока электрически отделяют цепи низкого напряжения измерительных приборов от главных цепей, которые могут находиться под высоким напряжением.

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Измерение напряжения

Для измерения *напряжения* используются *вольтметры*. Зажимы этих приборов включаются *параллельно нагрузке*, как показано на рисунке ниже.

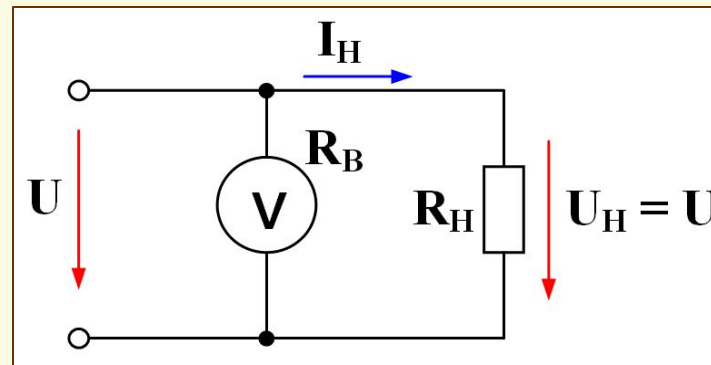


Рис. 10. Схема включения вольтметра для измерения напряжения

Чтобы включение вольтметра не приводило к изменению токов в цепи и режима работы нагрузки, его собственное сопротивление R_V должно быть намного больше сопротивления нагрузки R_H . Оно колеблется от **3–5 кОм** (электромагнитные и электродинамические приборы) до **6–10 кОм** (магнитоэлектрические приборы) и свыше **10 кОм** (электронные приборы).

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Измерение напряжения

При включении вольтметра параллельно участку цепи отклонение его стрелки будет пропорционально напряжению на этом участке цепи. **Вольтметры переменного тока** указывают *действующее* значение измеряемого напряжения.

При ошибочном включении вольтметра, то есть последовательно с электроприемником, напряжение которого должно быть измерено, прибор не будет поврежден, так как через него будет протекать ничтожно малый ток из-за очень большого внутреннего сопротивления вольтметра. В то же время, показания вольтметра при таком включении будут неверны, так как напряжение на нагрузке значительно уменьшится (в сотни и тысячи раз), а вольтметр будет показывать напряжение, близкое к напряжению источника питания.

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения вольтметра

Для расширения пределов измерения вольтметра используют добавочное активное сопротивление R_D , включаемое последовательно с измерительной катушкой вольтметра (см. рис. 11).

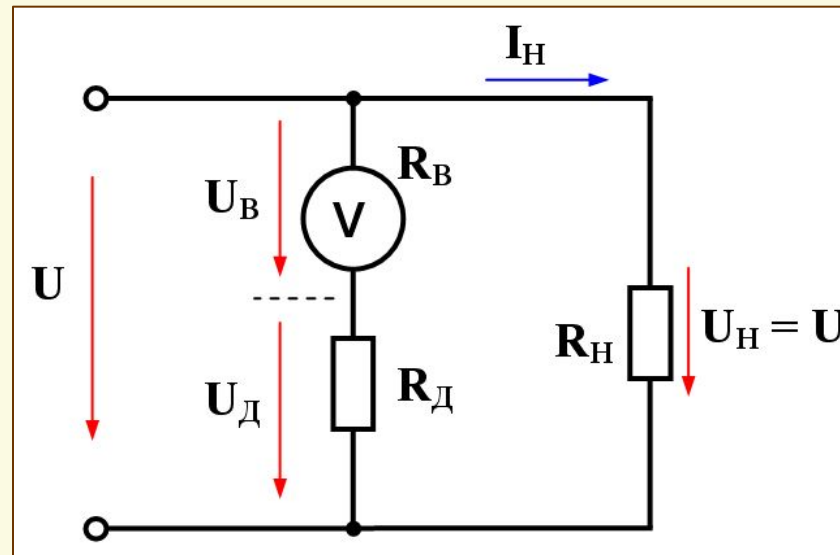


Рис. 11. Схема включения вольтметра с добавочным сопротивлением для расширения пределов измерения напряжения

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения вольтметра

Величина добавочного сопротивления R_d рассчитывается, исходя из требуемой кратности расширения предела измерения n_u :

$$n_u = U_H / U_B$$

по формуле: $R_d = R_B (n - 1)$,

где U_H – измеряемое напряжение на нагрузке, U_B – напряжение на вольтметре, R_B – активное сопротивление измерительной катушки вольтметра (см. рис.11).

С помощью разных добавочных сопротивлений можно получить *многопредельный вольтметр* с разной ценой деления шкалы.

В цепях переменного тока напряжением свыше 1000 В для расширения пределов измерения высокого напряжения используют измерительные трансформаторы напряжения, включаемые по схеме, представленной на рис. 12

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения вольтметра

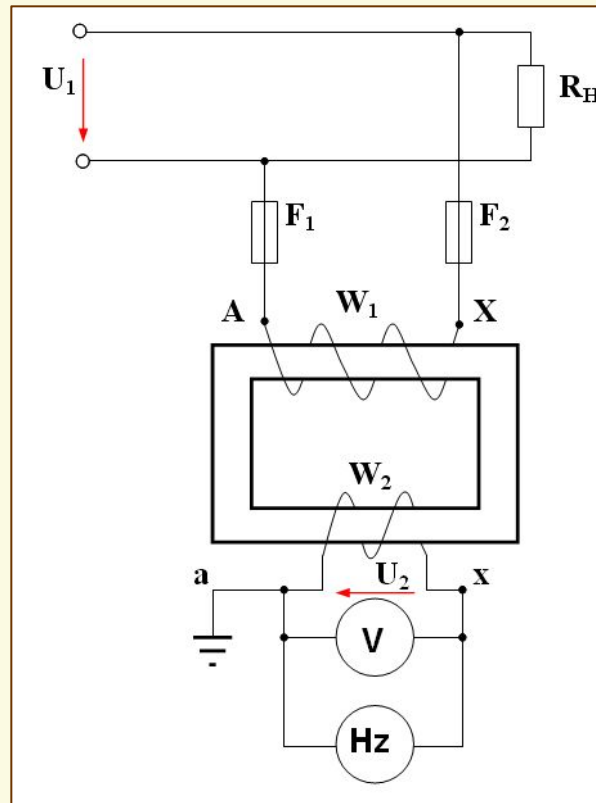


Рис. 12. Схема включения трансформатора напряжения с вольтметром в измерительную цепь

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения вольтметра

Первичная обмотка трансформатора напряжения (зажимы **A** и **X**), которая является *обмоткой высшего напряжения* с большим числом витков W_1 , подключается к измеряемому высокому напряжению U_1 , а *вторичная обмотка* W_2 , являясь *обмоткой низкого напряжения* (зажимы **a** и **x**) замыкается на вольтметр и цепи напряжения других приборов: ваттметра, счетчика электроэнергии, частотомера и др. Все эти приборы присоединяются к обмотке трансформатора низшего напряжения параллельно (см. рис. 12).

Трансформатор напряжения работает в условиях, близких к режиму холостого хода. Поэтому можно считать, что

$$U_1 = \frac{W_1}{W_2} U_2 = K_U U_2.$$

Электрические измерения



Измерение тока и напряжения

Расширение пределов измерения вольтметра

Первичное высокое напряжение U_1 может быть определено умножением вторичного напряжения U_2 на постоянный коэффициент трансформации $K_U = W_1/W_2$ больше единицы, так как в трансформаторе напряжения $W_1 > W_2$.

Вторичное номинальное напряжение у трансформатора напряжения принимается равным $U_2 = 100 \text{ В}$ независимо от коэффициента трансформации.

Шкала вольтметра градуируется на первичное напряжение. На ней указывается, с каким трансформатором напряжения должен включаться вольтметр (например, **6000/100 В**, **10000/100 В**). Обмотки трансформатора напряжения защищены плавкими предохранителями F_1 и F_2 (см. рис. 2.12).

Помимо расширения пределов измерения приборов переменного тока, трансформаторы напряжения отделяют цепи низкого напряжения измерительных приборов от главных цепей высокого напряжения.

В целях электробезопасности один зажим вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора напряжения заземляются, как показано на рис. 12.

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение мощности в цепи постоянного тока

Мощность P_H , выделяемая в нагрузке с сопротивлением R_H , может быть измерена *косвенным методом* с помощью амперметра и вольтметра, как показано на рис. 13, так как $P_H = UI$.

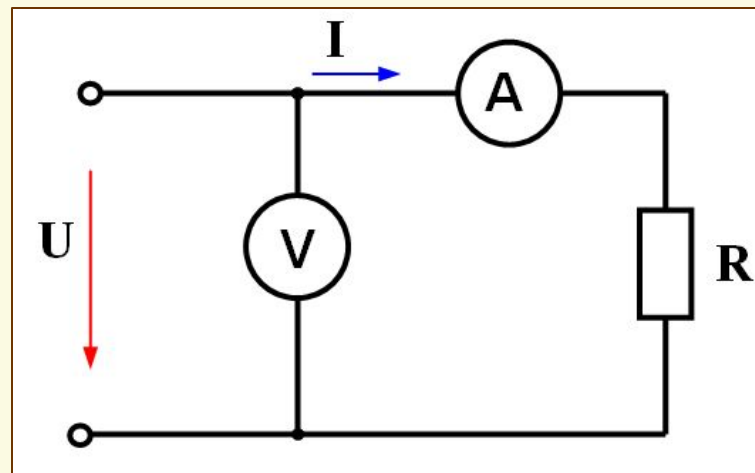


Рис. 13. Схема измерения мощности постоянного тока
косвенным методом

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение мощности в цепи постоянного тока

Более точно мощность можно измерить непосредственно *электродинамическим ваттметром*, как показано на рис. 14.

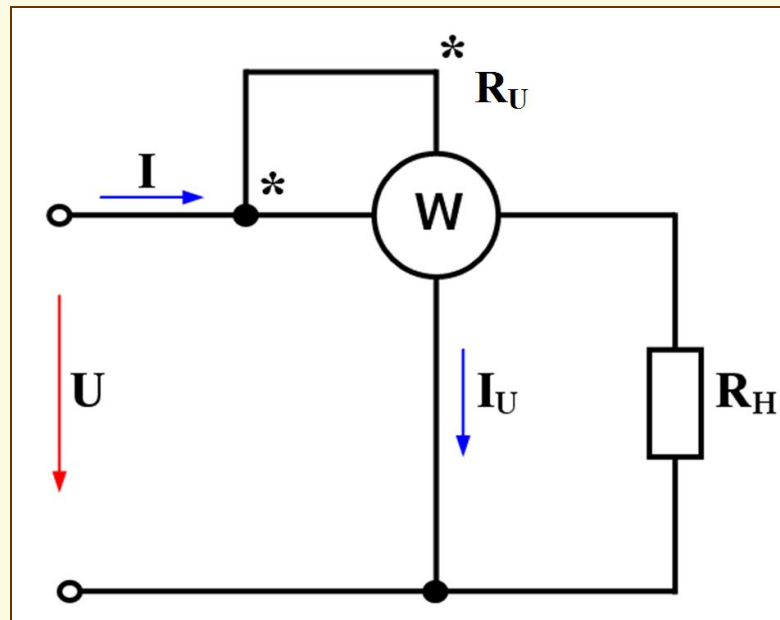


Рис. 14. Схема измерения мощности ваттметром



Электрические измерения

Измерение электрической мощности

Измерение мощности в цепи постоянного тока

Вращающий момент подвижной катушки ваттметра пропорционален произведению токов в проводниках обеих катушек: $M_{BP} = K \cdot I \cdot I_U$,

где I – ток в неподвижной токовой катушке, практически равный току нагрузки;

$I_U = U/R_U$ – ток в подвижной катушке напряжения (причем $I_U \ll I$);

R_U – сопротивление цепи подвижной катушки напряжения (причем $R_U \gg R_H$).

Следовательно

$$M_{BP} = K \cdot I \cdot U/R_U = C \cdot U \cdot I = C \cdot P,$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, вращающий момент ваттметра пропорционален мощности P и его шкала отградуирована непосредственно в ваттах или киловаттах.

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение активной мощности в однофазной цепи синусоидального тока

Для *измерения мощности в однофазной цепи* синусоидального тока в основном используются электродинамические ваттметры, которые включают так же, как и при измерениях в цепи постоянного тока, (см. рис. 14).

Ток I_U в подвижной катушке пропорционален напряжению U и практически совпадает с ним по фазе, а ток I в неподвижной токовой обмотке равен току нагрузки. Поэтому вращающий момент ваттметра

$$M_{вр} = CUI \cos \phi = CP,$$

где ϕ – угол сдвига фаз между U и I ; C – коэффициент пропорциональности.

Зажимы токовой обмотки и обмотки напряжения ваттметра, помеченные звездочками (*) и называемые *генераторными*, следует включать в электрическую цепь со стороны источника питания, как показано на рис. 14.

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение активной мощности в трехфазной цепи

Для *измерения активной мощности в трехфазной цепи* переменного тока применяется несколько способов измерения мощности в зависимости от характера трехфазной нагрузки.

При *симметричной нагрузке* активную мощность в трехфазной цепи можно измерить путем *замера мощности в одной фазе* с помощью *ваттметра*, включаемого по схеме с трехфазной нагрузкой соединенной звездой (рис. 15,а) и трехфазной нагрузкой соединенной треугольником (рис. 15,б).

После измерения мощности в одной из фаз P_{Φ} , соединенных звездой (Y) или треугольником (Δ) показания ваттметра умножают на три, так как при симметричной нагрузке мощности всех трех фаз одинаковы:

$$P_{Y_{\text{сим}}} = 3P_{\Phi};$$

$$P_{\Delta_{\text{сим}}} = 3P_{\Phi},$$

где $P_{Y_{\text{сим}}}$ и $P_{\Delta_{\text{сим}}}$ – активная мощность в трехфазной симметричной нагрузке соединенной звездой и треугольником, соответственно.

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение активной мощности в трехфазной цепи

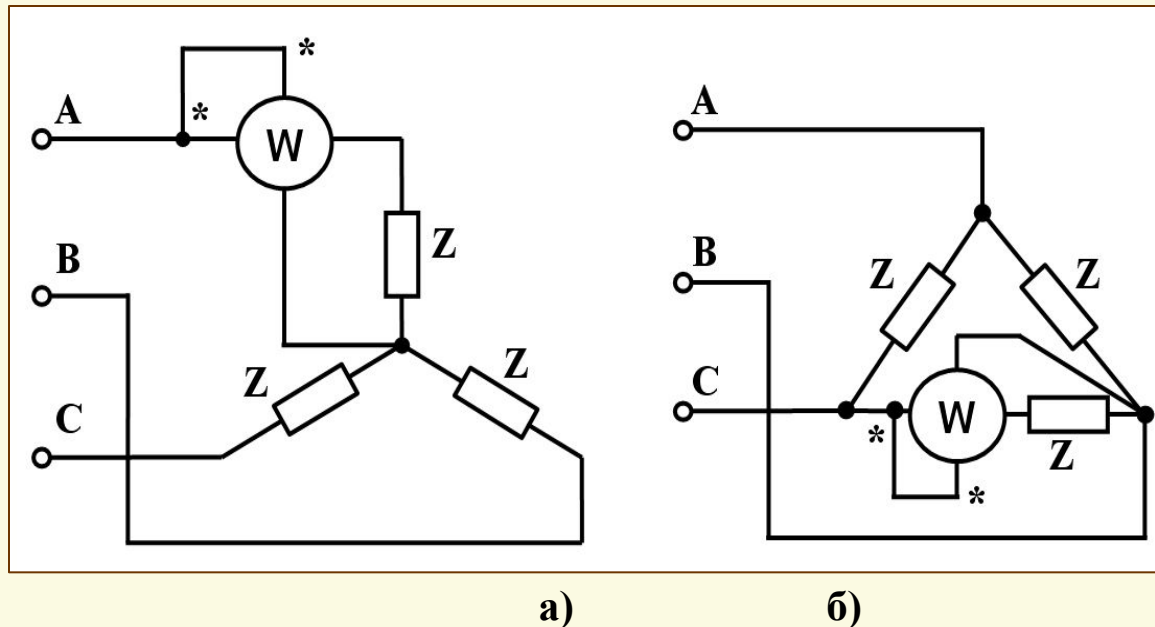


Рис. 15. Схема измерения активной мощности симметричной трехфазной нагрузки одним ваттметром

а – трехфазная нагрузка соединенная звездой;

б – трехфазная нагрузка соединенная треугольником

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение активной мощности в трехфазной цепи

В *трехпроводной трехфазной цепи* при *любой нагрузке* (симметричной или несимметричной) и *любом способе соединения электроприемников* (звездой или треугольником) общую активную мощность трехфазной нагрузки можно измерять с помощью *двух ваттметров* (см. рис. 16).

При этом алгебраическая сумма активных мощностей P_{W1} и P_{W2} 2-х ваттметров W_1 и W_2 равна активной мощности $P_{Y,\Delta}$ в трехпроводной трехфазной цепи при соответствующем способе соединения фаз (Y или Δ):

$$P_{Y,\Delta} = P_{W1} + P_{W2} = U_{AB} I_A \cos \phi_A + U_{BC} I_C \cos \phi_C.$$

Суммарная мощность двух ваттметров вычисляется с учетом знака мощностей этих ваттметров, как алгебраическая сумма. Практически, для отсчета отрицательной мощности по показаниям ваттметра необходимо изменить направление тока в обмотке напряжения, для чего переключатель направления тока на корпусе ваттметра надо переключить с «+» на «-».

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение активной мощности в трехфазной цепи

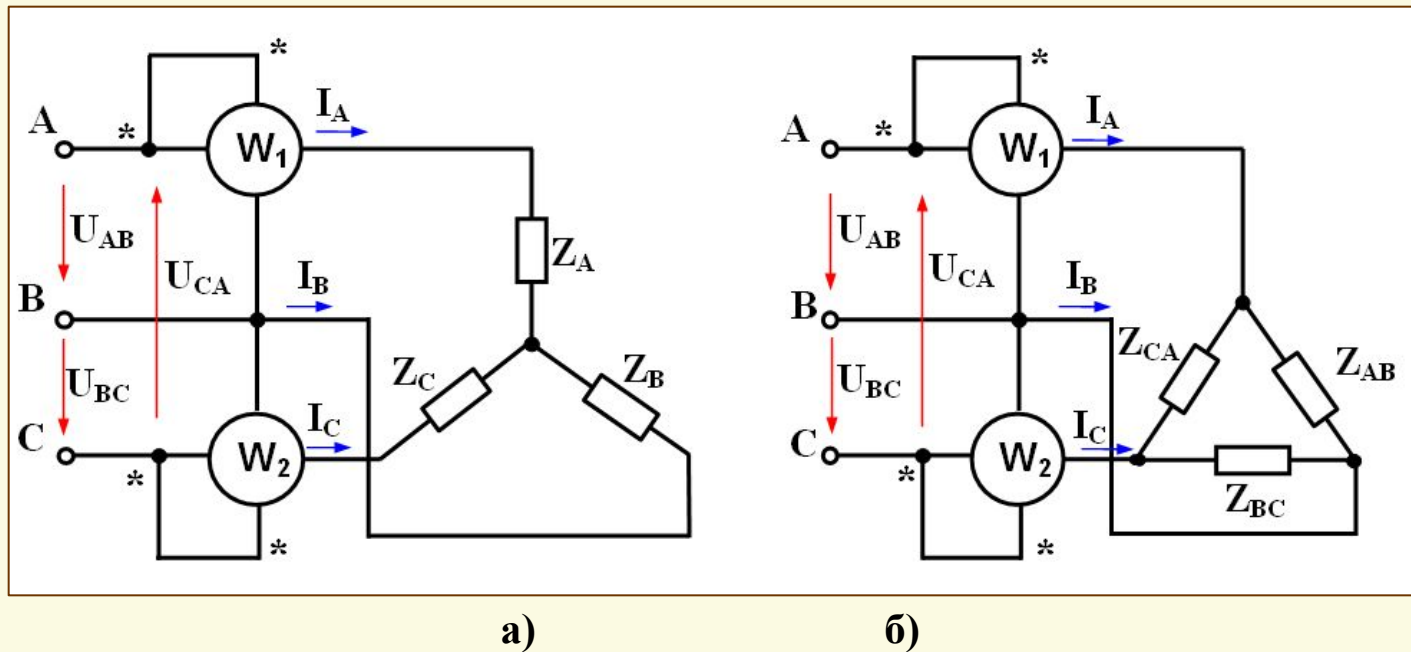


Рис. 16. Схема измерения активной мощности
в трехфазной нагрузке двумя ваттметрами
а – трехфазная нагрузка соединенная звездой;
б – трехфазная нагрузка соединенная треугольником

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение активной мощности в трехфазной цепи

Измерить активную мощность в *четырёхпроводной трехфазной цепи при несимметричной нагрузке соединенной звездой можно тремя ваттметрами (см. рис. 17).*

Поскольку, в этом случае каждый из ваттметров измеряет активную мощность одной фазы, то мощность в четырёхпроводной трехфазной цепи:

$$P_Y = P_A + P_B + P_C,$$

где P_A , P_B , P_C – активные мощности фаз А, В, С, соответственно.

Применяются также специальные ваттметры трехфазного тока.

При измерении мощности в трехфазных цепях высокого напряжения и с большими токами ваттметры включаются через измерительные трансформаторы напряжения и трансформаторы тока.

Электрические измерения



Измерение электрической мощности

Измерение активной мощности в трехфазной цепи

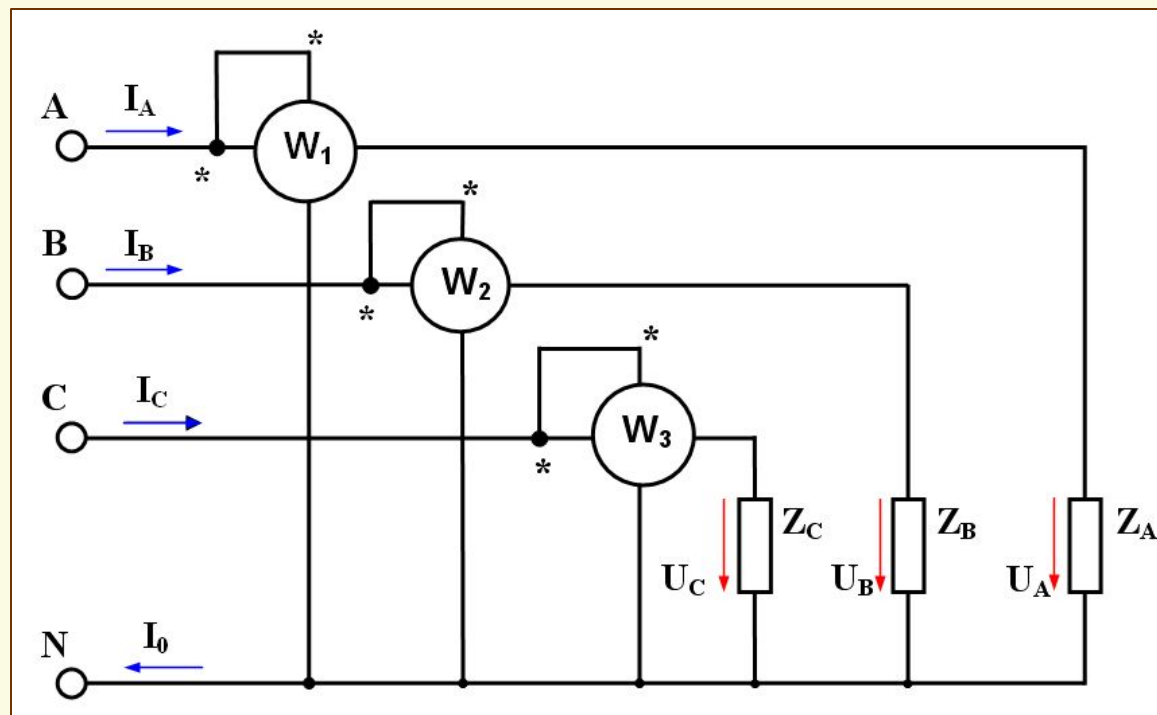


Рис. 17. Схема измерения активной мощности в четырехпроводной трехфазной сети при несимметричной нагрузке

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Общие сведения

В цепях переменного тока для *измерения активной энергии* в основном используются *однофазные и трехфазные счетчики индукционной системы*. Для измерения активной энергии в однофазных и трехфазных цепях однофазные счетчики включают по схемам, аналогичным схемам включения ваттметров (см. разд. выше).

В *трехпроводных трехфазных цепях* для измерения активной энергии применяют *двухэлементные счетчики* объединяющие измерительные системы *двух однофазных счетчиков*.

Для измерения активной энергии *в четырехпроводных цепях трехфазного тока* применяют *трехэлементные счетчики*.

Реактивную энергию W_p как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке в трехфазной цепи измеряют *трехфазными индукционными счетчиками реактивной энергии*.

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Индукционный счетчик электрической энергии

Счётчик электрической энергии – это электроизмерительный прибор для учёта электроэнергии, получаемой потребителем от сети за определённый промежуток времени. По характеру выполняемого измерения счетчики электроэнергии (СЭ) относятся к *интегрирующим измерительным приборам.*

Внешний вид индукционного счетчика электроэнергии показан на рис. 18.

На рис. 19 показано устройство *индукционного счетчика* для измерения электроэнергии в цепях однофазного переменного тока. Основное отличие индукционного СЭ от показывающих приборов индукционной системы со стрелочным или световым указателем состоит в том, что его подвижная часть в виде алюминиевого диска **6** не связана пружиной и может свободно вращаться, причём каждому её обороту соответствует определённое значение измеряемой величины.

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Индукционный счетчик электрической энергии



Рис. 18. Внешний вид индукционного однофазного счетчика электроэнергии

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Индукционный счетчик электрической энергии

На рис. 19 показано устройство *индукционного счетчика* для измерения электроэнергии в цепях однофазного переменного тока. Основное отличие индукционного СЭ от показывающих приборов индукционной системы со стрелочным или световым указателем состоит в том, что его подвижная часть в виде алюминиевого диска **6** не связана пружиной и может свободно вращаться, причём каждому её обороту соответствует определённое значение измеряемой величины.

Индукционный счетчик имеет два электромагнита **1** и **2**. Электромагнит **1** снабжен токовой катушкой с малым числом витком и проводом относительно большого сечения, а электромагнит **2** выполнен в виде магнитопровода **3** с многovitковой катушки напряжения. Токовая катушка включена в измерительную цепь последовательно, а катушка напряжения – параллельно. Протекающие по катушкам токи создают в электромагнитах переменные магнитные потоки Φ_u от протекающего тока в катушке напряжения и Φ_I – от тока в токовой катушке.

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Индукционный счетчик электрической энергии

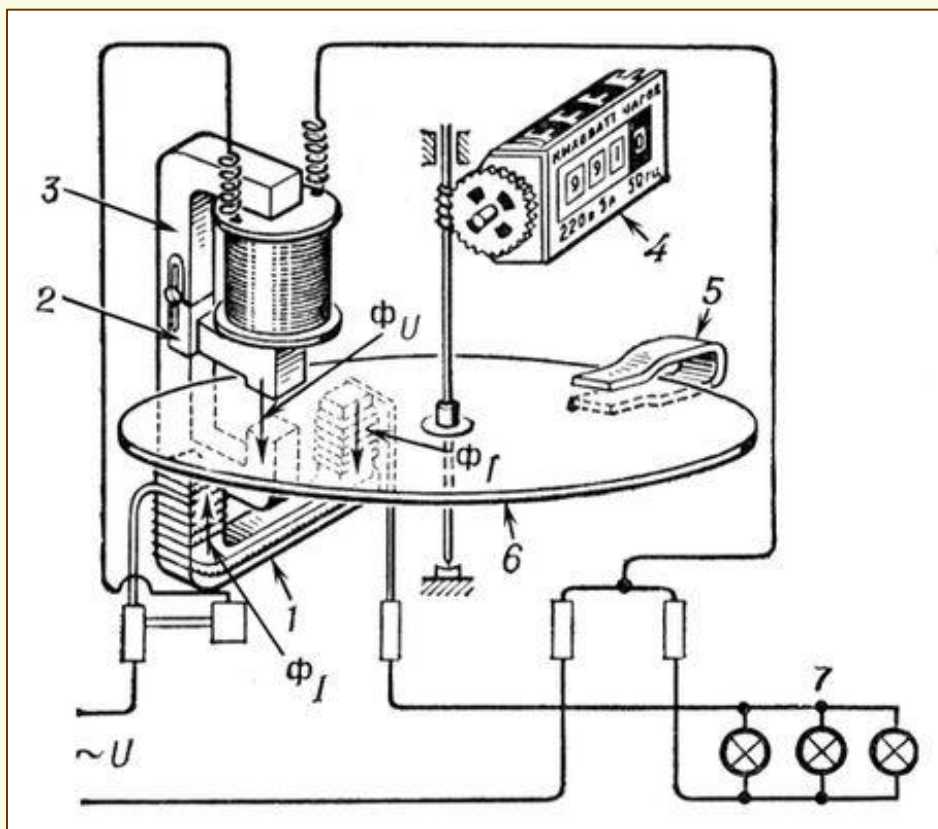


Рис. 19. Устройство индукционного однофазного счетчика электроэнергии

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Индукционный счетчик электрической энергии

В результате взаимодействия потока Φ_u с вихревыми токами, индуцируемыми в диске 6 потоком Φ_r , возникает вращающий момент, пропорциональный мощности P , потребляемая активной нагрузкой 7 (на рис. 19 – электрические лампы накаливания).

Количество оборотов n подвижной части (диска) за время t пропорционально электроэнергии W измеряемой счетчиком: $n = K_C W = K_C P t$,

где K_C – конструктивная постоянная счетчика, P – мощность нагрузки.

Результат измерения электроэнергии в киловатт-часах определяют по показаниям счётного механизма 4, соединённого червячной передачей с осью диска.

Счетчики электроэнергии переменного тока применяют как квартирные счётчики электроэнергии и для учёта расхода электроэнергии в электроприводах, осветительных сетях, коммунальном хозяйстве и т. п.

Погрешность измерения индукционных однофазных счетчиков составляет 1 – 2,5%.

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Электронный счетчик электроэнергии

В последнее время получили распространение однофазные и трехфазные *электронные счетчики* учета активной, реактивной и полной электроэнергии. Их основными достоинствами являются высокая точность, возможность телеметрической передачи показаний счетчика, учет электроэнергии по двухставочному тарифу (день/ночь).



Рис. 20. Внешний вид электронного однофазного счетчика электроэнергии

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Электронный счетчик электроэнергии

На рис. 21 представлена упрощенная структурная схема однофазного электронного счетчика, включенного через трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) в цепь для измерения активной мощности приемника с сопротивлением нагрузки Z_H .

Принцип действия счетчика заключается в непрерывном преобразовании текущих мгновенных значений синусоидальных тока i и напряжения u с помощью *аналого-цифрового преобразователя* (АЦП) через малые интервалы времени, задаваемые процессором, в числовые эквиваленты, последующем вычислении *процессором* активной мощности и электроэнергии и фиксации результатов вычислений в *регистрирующем устройстве* с помощью электровакуумных, жидкокристаллических или других индикаторов.

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Электронный счетчик электроэнергии

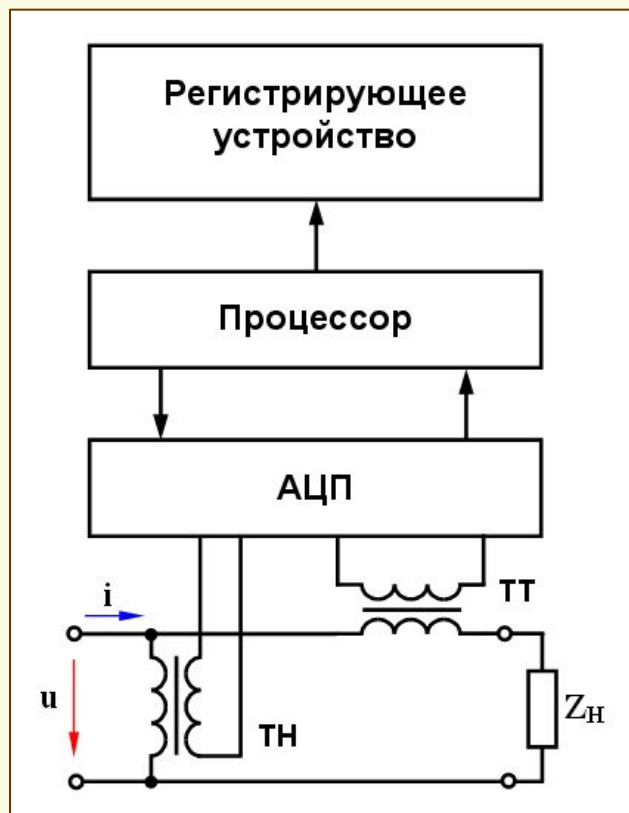


Рис. 21. Структурная схема однофазного электронного счетчика электроэнергии

Электрические измерения



Измерение электрической энергии переменного тока

Электронный счетчик электроэнергии

Электронный счетчик не содержит подвижных частей, а программирование процессора позволяет эффективно использовать его для телеметрической передачи данных в *автоматизированных системах коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ)*, для анализа суточных графиков нагрузки, *многотарифного* расчета за электроэнергию и т. п.

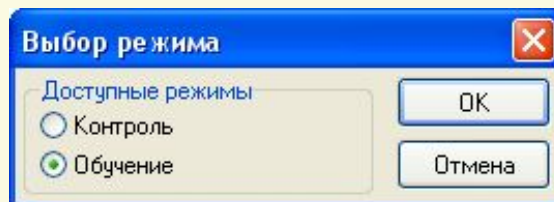
Электронный счетчик применим и для измерений энергии в цепях постоянного тока при наличии датчиков постоянного тока и напряжения и соответствующем программировании процессора.

Электрические измерения



ТЕСТ – Электрические измерения

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 44 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).

ТЕСТ

Электрические измерения



Литература и электронные средства обучения

Основная литература

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. К.Я. Вильданов, С.Т. Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

Электронные средства обучения

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Часть 1. Электрические цепи и измерения. Электронное учебное пособие по лабораторным работам, 2011. (формат – веб-страницы).



ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

Благодарю за внимание!