

# Тема 6.

## Электрические измерения



### Вопросы темы

1. Классификация измерительных приборов и погрешности измерений.
2. Приборы магнитоэлектрической системы.
3. Приборы электромагнитной системы.
4. Приборы электродинамической и ферродинамической систем.
5. Однофазный индукционный счетчик электрической энергии.
6. Омметры и мегаомметры.
7. Термоэлектрические приборы.
8. Цифровые измерительные приборы.
9. Измерение неэлектрических величин электрическими методами. Датчики.

### 1. Классификация измерительных приборов и погрешности измерений

Для контроля режима электрических цепей приходится измерять ряд физических величин: ток, напряжение, мощность, энергию. В цепях переменного тока помимо этого измеряют также частоту, сдвиг по фазе и контролируют форму кривой напряжения и тока.

*Измерение* — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Технические средства, которые служат для измерения электрических величин, называются *электроизмерительными приборами*. Во многих отраслях техники электроизмерительными приборами пользуются также для измерения и контроля неэлектрических величин.

От измерительных приборов, применяемых в электрических цепях, прежде всего требуется, чтобы они не вносили заметных искажений в режим цепи. Поэтому электроизмерительные приборы должны потреблять минимальную мощность и не оказывать существенного влияния на сопротивление цепи.

Приборы, показания которых являются непрерывными функциями измеряемых величин, называют *аналоговыми* (в них отсчет значения измеряемой величины производится по шкале). Измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации и дающие показания в цифровой форме, называют *цифровыми*.

На практике часто применяют суммирующие приборы, в которых значения измеряемой величины суммируются по времени или по другой независимой переменной, например счетчик электрической энергии. Суммирующие измерительные приборы дают значения суммы двух или нескольких величин, подводимых по различным

каналам, например, ваттметр, суммирующий мощность нескольких электрических генераторов.

Полученное из опыта значение измеряемой величины может отличаться от ее действительного значения. Это может быть обусловлено конструктивными недостатками прибора, несовершенством технологии его изготовления, а также влиянием различных внешних факторов. Разность между показанием прибора  $X$  и истинным значением измеряемой величины  $X_0$  называется *абсолютной погрешностью* измерительного прибора:

$$\Delta = X - X_0. \quad (1)$$

Относительная погрешность измерения  $\delta$  определяется обычно в процентах к истинному значению  $X_0$ , но так как отклонения  $X$  от  $X_0$  сравнительно малы, то можно считать, что

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta}{X} \cdot 100\% \quad (2)$$

Поскольку величина  $X$  при измерении может принимать любые значения в пределах от 0 до  $X_N$ , где  $X_N$  - верхний предел диапазона измерения прибора (номинальное значение), то оценить качество прибора по значению абсолютной или относительной погрешности невозможно. Поэтому было введено понятие *приведенной погрешности*

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \quad (3)$$

Значение приведенной погрешности, выраженное в процентах:  $\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\%$ ,

определяет *класс точности* прибора. По степени точности даваемых показаний электроизмерительные приборы делятся на классы, обозначаемые соответственно числами: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4, определяющими максимальную погрешность прибора в процентах при полном отклонении указателя.

Электроизмерительные приборы классифицируют по целому ряду признаков. Здесь приведены лишь некоторые из них:

**1. По виду измеряемой величины.** Классификация в этом случае производится по наименованию единицы измеряемой величины. На шкале прибора пишут полное его наименование или начальную латинскую букву единицы измеряемой величины, например, амперметр -  $A$ , вольтметр -  $V$ , ваттметр -  $W$  и т. д. К условной букве наименования прибора может быть добавлено обозначение кратности основной единицы: миллиампер -  $mA$ , киловольт -  $kV$ , мегаватт -  $MW$  ит. д.

**2. По физическому принципу** действия измерительного механизма прибора, т. е. по способу преобразования электрической энергии в механическое действие подвижной части прибора (табл. 1).

Таблица 1

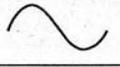
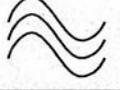
Условные обозначения, указывающие принцип действия измерительного механизма прибора

Тип прибора	Условные обозначения
Магнитоэлектрический	
Выпрямительный с магнитоэлектрическим механизмом	
Электромагнитный	
Электродинамический	
Ферродинамический	
Индукционный	
Термоэлектрический	

**3. По роду измеряемого тока.** Эта классификация позволяет определить, в цепях какого тока можно применять данный прибор (табл. 2).

Условные обозначения, указывающие род тока, для которого предназначен прибор

Таблица 2

Род тока	Условные обозначения
Постоянный	
Переменный (однофазная система)	
Постоянный и переменный	
Трехфазная система (общее обозначение)	
Трехфазная система (при несимметричной нагрузке фаз)	

На приборах переменного тока указывают номинальное значение частоты или диапазон частот, на которые они рассчитаны, например, 120 Гц, 45-550 Гц. Если на приборе не указан диапазон рабочих частот, значит, он предназначен для работы в установках с частотой 50 Гц.

**4. По классу точности.** Класс точности прибора является его обобщенной характеристикой. Допускаемая относительная погрешность меньше в точках шкалы, ближайших к номинальному значению.

На шкале электроизмерительного прибора отмечаются измеряемая им физическая величина, класс точности прибора, род тока, для которого прибор предназначен, рабочее положение (вертикальное или горизонтальное), величина напряжения,

при котором испытывалась изоляция прибора, система прибора. Например, прибор М42101, изображённый на рис. 2, представляет собой килоамперметр постоянного тока класса точности 1,5, вертикального расположения, изоляция испытана напряжением 2 кВ, магнитоэлектрической системы (таблица 4):

Таблица 4

Обозначения на шкале измерительного прибора, изображённого на рис. 2

Наименование прибора	Тип (измеряемая физическая величина)	Класс точности прибора	Род измеряемого тока	Рабочее положение	Напряжение испытания изоляции	Система прибора
М42101	килоамперметр	1,5	постоянный	вертикальное	2 кВ	магнитоэлектрическая
<b>М42101</b>	<b>кА</b>	<b>1,5</b>	<b>—</b>	<b>⊥</b>	<b>☆2</b>	<b>⏏</b>

## 2. Приборы магнитоэлектрической системы

*Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии рамки с током с магнитным полем постоянного магнита (рис. 1).*

Полюсные наконечники магнита 2 служат для создания однородного магнитного поля, в котором может поворачиваться вокруг своей оси 5 легкая алюминиевая рамка 1, которая содержит обмотку. Измеряемый ток, при подключении прибора через клеммы 4, проходит в рамку через спиральные пружины 3, которые одновременно служат для создания противодействующего момента.

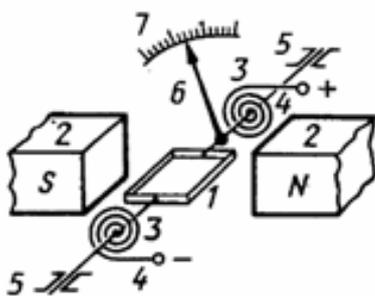


Рис. 1. К принципу действия прибора магнитоэлектрической системы



Рис. 2. Килоамперметр магнитоэлектрической системы

При протекании тока через рамку возникают силы, создающие вращательный момент, который по мере ее поворота уравновешивается механическим противодействующим моментом, создаваемым пружинами.

Если по обмотке с числом витков  $W$  протекает ток  $I$ , то создается вращающий момент

$$M_{BP} = BwIS , \quad (4)$$

где  $B$  - магнитная индукция в зазоре, в котором вращается рамка;  
 $S$  - площадь рамки.

Так как величины  $B$ ,  $w$  и  $S$  для данного прибора постоянные, то их произведение дает также постоянную величину. Следовательно, можно записать:  $M_{BP} = k_1 I$ . Под действием этого вращающего момента рамка поворачивается на угол  $\alpha$  и закручивает спиральную пружину, которая создает противодействующий момент

$$M_{ПР} = k_2 \alpha , \quad (5)$$

где  $k_2$  - постоянная, характеризующая жесткость пружины.

При некотором угле поворота рамки противодействующий момент пружины будет равен вращающему моменту, т. е.  $k_1 I = k_2 \alpha$ . Обозначив  $k = \frac{k_1}{k_2}$ , получим

$$\alpha = kI \quad (6)$$

где  $k$  - постоянная данного прибора по току, которая называется *чувствительностью прибора*.

*Таким образом, угол поворота стрелки в магнитоэлектрического прибора пропорционален току в рамке и шкала такого прибора равномерна.*

Механизм магнитоэлектрического прибора обычно используется для изготовления *гальванометра и амперметра* (рис. 2). Но ток, проходя по обмотке рамки, создает на ней падение напряжения  $U = IR$ , равное напряжению, приложенному к прибору, и угол поворота стрелки будет пропорционален этому напряжению:

$$\alpha = kI = k \frac{U}{R} = cU , \quad \text{где } c = \frac{k}{R} - \text{постоянная прибора по напряжению. Отсюда следует,}$$

что магнитоэлектрический механизм можно использовать и для изготовления *вольтметра*. Так как сопротивление вольтметра должно быть достаточно большим, то *в вольтметре магнитоэлектрической системы последовательно с обмоткой рамки включают добавочный резистор с большим сопротивлением*. Меняя величину добавочного резистора, можно уменьшать или увеличивать предел измерения напряжения.

*Если магнитоэлектрический прибор используют для измерения сравнительно больших токов, то параллельно рамке присоединяют резистор, называемый шунтом*. В этом случае через измерительный прибор идет только часть измеряемого тока, и предел измерения по току расширяется.

*Магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения в цепях постоянного тока*. При включении их в цепь переменного тока применяют преобразовательные устройства (выпрямители, термоэлектрические преобразователи и т. д.).

Детекторный прибор — совокупность выпрямителя (детектора) и магнитоэлектрического измерителя. Такое сочетание вызвано необходимостью измерений малых токов и напряжений переменного тока. Наибольшее распространение получила мостовая схема с двухполупериодным выпрямителем (рис. 3). Если в этой схеме подобрать все четыре диода одинаковыми, то сопротивления переменному току по обоим

направлениям также будут одинаковыми. Через прибор проходит ток в обе половины периода в одном направлении, вдвое увеличивая значение вращающего момента.

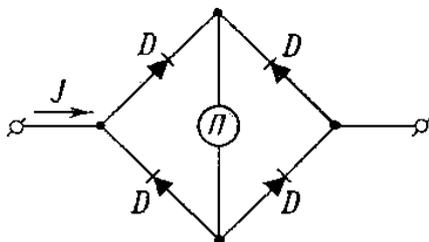


Рис. 3. Двухполупериодный выпрямитель



Рис. 4. Ампервольтметр Ц4353

Детекторные приборы широко применяют для измерений переменных токов и напряжений и часто используют в комбинированных приборах - *авометрах (ампервольтметрах)*, рис. 4.

В отличие от приборов переменного тока всех других систем детекторные приборы измеряют среднее, а не действующее значение переменного тока и напряжения. Градуируют шкалы этих приборов в действующих значениях, поэтому детекторные приборы не пригодны для измерений в цепях несинусоидальных токов.

Магнитоэлектрические приборы обладают высокой точностью и чувствительностью, равномерной шкалой, низкой восприимчивостью к изменениям температуры окружающей среды и внешним магнитным полям, малым потреблением энергии. Недостатки таких приборов — пригодность только для постоянных токов (для переменных токов нужны дополнительные устройства), большая чувствительность к перегрузкам, сложность конструкции и высокая стоимость.

### 3. Приборы электромагнитной системы

*Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, создаваемого измеряемым током, со стальным сердечником, помещенным в это поле (рис. 5).*

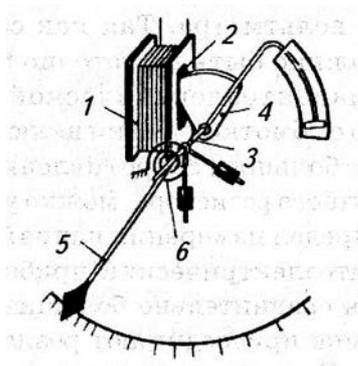


Рис. 5. К принципу действия прибора электромагнитной системы



Рис. 6. Амперметр переменного тока электромагнитной системы

При протекании измеряемого тока через катушку 1 в ее плоской щели 2 создается магнитное поле. Вне катушки на агатовых подпятниках установлена ось 3 с эксцентрично укрепленным сердечником 4 из магнитомягкой (с малой коэрцитивной силой и большой магнитной проницаемостью) стали и стрелкой 5. Магнитное поле катушки намагничивает сердечник и втягивает его внутрь, поворачивая тем самым ось со стрелкой прибора. Этому повороту препятствует закручивающаяся спиральная пружина 6, создающая противодействующий момент.

В отличие от приборов магнитоэлектрической системы *у приборов электромагнитной системы угол отклонения стрелки пропорционален квадрату тока:*

$$\alpha = cI^2 \quad (7)$$

где  $c$  — постоянная для данного прибора величина, поэтому *шкала электромагнитного прибора неравномерна* (рис. 6).

Меняя форму сердечника и его расположение в катушке, можно получить почти равномерную шкалу, начиная с 20 % от верхнего предела измерений. При меньших значениях измеряемой величины электромагнитные приборы недостаточно чувствительны и начальная часть шкалы считается нерабочей.

Направление отклонения стрелки прибора не зависит от направления тока в катушке, так как при изменении направления тока одновременно меняется направление вектора магнитной индукции внутри катушки и в сердечнике, а характер их взаимодействия (притяжение) остается прежним. Этот же вывод следует из выражения (7), в которое значение тока входит в квадрате. Следовательно, *эти приборы пригодны для измерений в цепях и постоянного, и переменного тока*. В цепи переменного тока они измеряют действующее значение. Электромагнитные приборы применяются и как *амперметры*, и как *вольтметры*. В последнем случае обмотка выполняется большим числом витков тонкой медной проволоки.

Внешние магнитные поля оказывают значительное влияние на показания электромагнитных приборов из-за относительно слабого собственного магнитного поля. Для ослабления этого влияния измерительный механизм защищают стальным экраном или применяют астатические измерительные механизмы.

Астатическое устройство — совокупность двух измерительных механизмов, подвижные системы которых объединены в одном приборе и воздействуют на одну и ту же ось со стрелкой. При этом измерительные механизмы расположены так, что под действием внешнего поля вращающий момент одного из них увеличивается, а другого на столько же уменьшается, при этом общий вращательный момент, действующий на всю подвижную систему прибора, остается неизменным.

Достоинствами электромагнитных приборов являются простота конструкции, невысокая стоимость, пригодность для постоянного и переменного тока, способность выдерживать большие перегрузки, возможность непосредственного включения амперметров на большие токи, а также пригодность для применения в качестве щитовых приборов. Недостатки: неравномерность шкалы, низкая чувствительность, сравнительно большое собственное потребление энергии, высокая чувствительность к влиянию внешних магнитных полей.

#### 4. Приборы электродинамической и ферродинамической систем

*Принцип действия приборов электродинамической системы основан на механическом взаимодействии двух катушек с током* (рис. 7). Неподвижная катушка 1 состоит из двух секций (для создания однородного поля) и навивается обычно толстой проволокой. Внутри неподвижной помещается легкая подвижная катушка 2, жестко скрепленная с осью и стрелкой. Подвижная катушка включается в измеряемую цепь через спиральные пружины, создающие противодействующий момент. Прибор также содержит воздушный успокоитель 3.

При прохождении тока по катушкам создаются два магнитных поля, которые стремятся повернуть подвижную катушку в положение, в котором энергия всего механизма была бы минимальной.

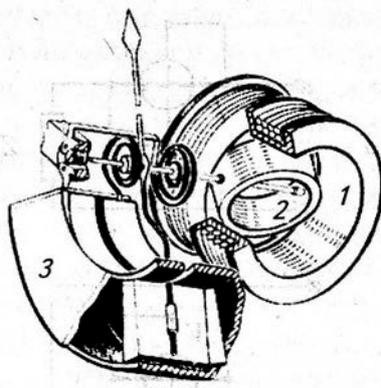


Рис. 7. К принципу действия прибора электродинамической системы

Угол отклонения стрелки прибора электродинамической системы пропорционален произведению токов в катушках:

$$\alpha = kI_1I_2, \quad (8)$$

где  $k$  — постоянная данного прибора.

Электродинамические приборы можно использовать и для переменного тока, так как направления токов в обеих катушках изменяются на противоположные одновременно (или с постоянным сдвигом по фазе), и поэтому направление поворота подвижной катушки остается неизменным.

*Электродинамические приборы используются как вольтметры, амперметры и главным образом как **ваттметры**.*

При использовании электродинамического прибора в качестве амперметра обмотки обеих катушек соединяют параллельно (рис. 8, а). Условно обмотка неподвижной катушки показана толстой линией, подвижной — тонкой.

При использовании электродинамического прибора в качестве вольтметра обе обмотки прибора включают последовательно друг с другом и с добавочным резистором  $R_d$  (рис. 8, б). У вольтметров и амперметров соединение концов обмоток обычно делают внутри прибора, а на его зажимы выведены два конца, подключаемые в цепь.

*Шкалы электродинамических вольтметров и амперметров неравномерны, так как токи в обеих катушках пропорциональны одной и той же измеряемой величине. Например, для вольтметра в обеих катушках течет одинаковый ток, поэтому  $I_1 = I_2 = I$  и  $\alpha = kI^2$ . У электродинамического амперметра угол отклонения стрелки также пропорционален квадрату тока.*

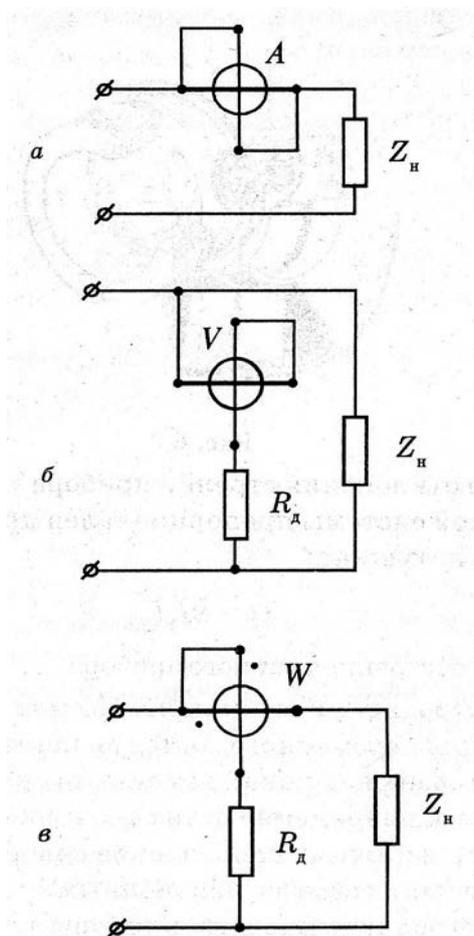


Рис. 8. Использование электродинамического прибора в качестве:  
(а) амперметра; (б) вольтметра; (в) ваттметра

При использовании электродинамического прибора в качестве ваттметра (рис. 8, в) обмотку неподвижной катушки включают в цепь последовательно (тогда  $I_1 = I$ ), а обмотку подвижной катушки, соединенную последовательно с добавочным рези-

стором  $R_d$ , — параллельно зажимам приемника (тогда  $I_2 = \frac{U}{R_2 + R_d}$ , где  $R_2$  - сопротивление подвижной катушки). Следовательно, в соответствии с формулой (8) *угол поворота стрелки пропорционален произведению  $IU$ , т. е. мощности, потребляемой нагрузкой, причем шкала электродинамического ваттметра равномерна.*

Зажимы последовательной обмотки обозначают буквой  $I$  или числом ампер, равным предельному значению ее тока. Эта обмотка называется токовой. Зажимы параллельной обмотки или обмотки напряжения, включаемой так же, как вольтметр, обозначают буквой  $U$  или числом вольт, равным предельному значению напряжения на ней.

Направление отклонения подвижной системы прибора зависит от взаимного направления токов в катушках. Поэтому для правильного включения обмоток их зажимы маркируют. У так называемых «генераторных» зажимов обмоток (зажимов, к которым следует присоединять провода со стороны источника питания) ставится знак \*. На электрических схемах их обозначают точками.

На показания электродинамических приборов могут влиять внешние магнитные поля, так как собственное поле катушек слабое. Для устранения этого влияния применяют астатические измерительные механизмы.

Приборы электродинамической системы изготавливают и применяют в основном как переносные лабораторные приборы классов точности 0,1; 0,2 и 0,5.

К достоинствам электродинамических приборов относятся большая точность и пригодность для измерения в цепях постоянного и переменного тока. Недостатками являются неравномерная шкала, большая чувствительность к перегрузкам (из-за наличия токоведущих пружин) и зависимость от внешних магнитных полей.

Для самопишущих приборов и приборов, в которых требуются большие вращающие моменты, используют *ферродинамические* измерительные механизмы. В этих устройствах обмотка неподвижной катушки размещается на стальном магнитопроводе, выполненном из листовой электротехнической стали или специального сплава (пермаллоя), обладающего малыми потерями на гистерезис и вихревые токи. Введение стального сердечника приводит к значительному повышению чувствительности, так как намного увеличивается вращающий момент. Кроме того, ослабляется влияние внешних магнитных полей, но из-за гистерезиса и вихревых токов снижается точность приборов. Ферродинамические приборы изготавливаются классов точности 1 и 1,5.

В цепях переменного тока с помощью электродинамического ваттметра можно измерять как активную, так и реактивную мощность.

Для измерения активной мощности используют ваттметр с активным добавочным сопротивлением  $R_d$ , включенным в цепь катушки напряжения (подвижной катушки).

В этом случае угол отклонения стрелки ваттметра пропорционален активной мощности:

$$\alpha = k_1 IU \cos \varphi \quad (9)$$

Для измерения реактивной мощности последовательно с катушкой напряжения включают добавочное индуктивное сопротивление  $x_L$  (рис. 7), величина которого значительно превышает сопротивление обмотки напряжения  $x_L \gg R_2$ . В этом случае угол отклонения стрелки ваттметра будет пропорционален реактивной мощности:

$$\alpha = k_2 IU \sin \varphi \quad (10)$$

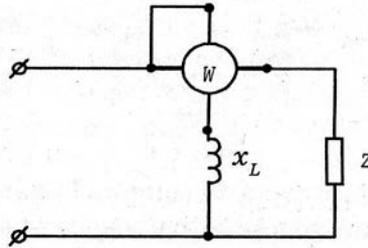


Рис. 9. Измерение реактивной мощности

## 5. Однофазный индукционный счетчик электрической энергии

*Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии переменного магнитного поля с вихревыми токами, индуцируемыми этим же полем в проводящем подвижном диске или цилиндре.* Индукционные приборы пригодны лишь для переменных токов, так как ток в диске или цилиндре может индуцироваться лишь действием переменного магнитного потока.

Индукционный счетчик имеет две катушки с сердечниками: токовую и катушку напряжения. Поэтому переменное магнитное поле создается двумя магнитными потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , сдвинутыми на некоторый угол по фазе и в пространстве. При этом осуществляется взаимодействие потоков с «чужими» (а не со «своими») индукционными токами.

Токовую катушку (рис. 10) навивают толстым проводом на стальной сердечник и включают последовательно с нагрузкой. Магнитный поток  $\Phi_1$  в ней пропорционален току нагрузки.

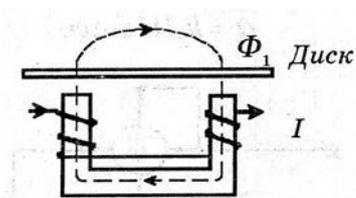


Рис. 10. Токовая катушка индукционного прибора

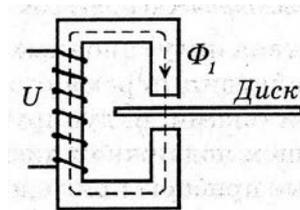


Рис. 11. Катушка напряжения индукционного прибора

Катушку напряжения (рис. 11) навивают большим числом витков тонкого провода на стальной сердечник. Индуктивное сопротивление этого электромагнита намного больше активного, поэтому данную цепь можно считать чисто индуктивной (ток в катушке напряжения отстает по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ ).

Таким образом, счетчик состоит из двух электромагнитов и подвижного алюминиевого диска. Схематически устройство индукционного однофазного счетчика показано на рис. 12. Легкий алюминиевый диск  $D$  укреплен на оси, которая связана с помощью червячной передачи со счетным механизмом, и вращается в зазоре элек-

тромагнитов. Магнитный поток  $\Phi_1$  электромагнита  $U$ -образной формы (см. рис. 10) создается током приемника электрической энергии, так как его обмотка включена последовательно в цепь нагрузки. Можно считать, что поток  $\Phi_1$  пропорционален току:  $\Phi_1 \sim I$ .

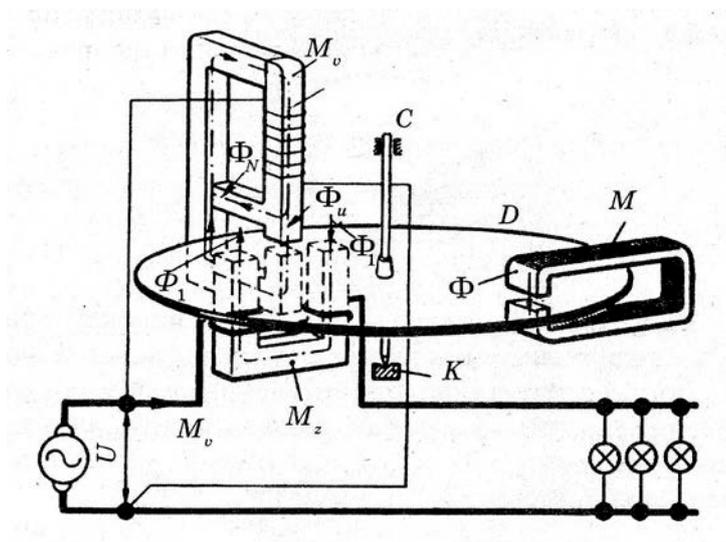


Рис. 12. Устройство индукционного однофазного счётчика



Рис. 13. Однофазный индукционный счётчик

На втором электромагните (см. рис. 11) расположена обмотка, включенная параллельно приемнику электрической энергии, и ток в ней пропорционален напряжению сети  $U$ . Обмотка состоит из большого числа витков тонкого провода и создает магнитный поток  $\Phi_2$ , значение которого пропорционально  $U$ :  $\Phi_2 \sim U$ . Индуктивное сопротивление этого электромагнита несравненно больше активного, поэтому можно считать, что ток в его обмотке сдвинут по фазе от напряжения на  $\frac{\pi}{2}$ . Таким образом, магнитные потоки, сдвинутые по фазе и в пространстве, образуют «бегущее» магнитное поле, пересекающее диск.

Вихревые токи, индуцируемые в диске магнитными потоками, пропорциональны им:  $I_{B1} \sim \Phi_1$  и  $I_{B2} \sim \Phi_2$ . Среднее за период значение электромагнитной силы, возникающей при взаимодействии магнитного поля и вихревого тока и действующей на диск, определяется формулой  $F = \Phi I \cos \gamma$ , где  $\gamma$  - угол сдвига по фазе между потоком  $\Phi$  и током  $I$ .

Из этой формулы видно, что взаимодействие между индуцированным током в диске и созданным им магнитным полем не создает электромагнитной силы, так как  $\gamma = 0$ . Электромагнитные силы появляются только в результате взаимодействия магнитного потока  $\Phi_1$  с током  $I_{B2}$  и потока  $\Phi_2$  с током  $I_{B1}$ , и создают вращающий момент.

Под действием этого вращающего момента диск пришел бы в ускоренное вращение и число оборотов не соответствовало бы израсходованной электрической энергии. Поэтому необходимо наличие противодействующего момента.

Противодействующий момент создается постоянным магнитом, в поле которого вращается диск, и является тормозным моментом, пропорциональным частоте вращения диска. Когда моменты равны, частота вращения диска постоянна (установившийся режим) и число оборотов диска пропорционально расходу электроэнергии.

Индукционные счетчики (рис. 13) обладают слабой чувствительностью к внешним магнитным полям и изменениям температуры окружающей среды и хорошо выдерживают перегрузки. Однако они очень чувствительны к изменению частоты переменного тока в сети, поэтому предназначаются для работы только на определенной частоте (обычно 50 Гц).

## 6. Омметры и мегаомметры

Сопротивления различных элементов электрических цепей изменяются в очень широком диапазоне. Сопротивления условно можно разделить на малые (до 1 Ом), средние (от 1 Ом до 100 кОм) и большие (более 100 кОм). Для измерения сопротивлений используют следующие методы: *косвенный* (с помощью амперметра и вольтметра, с последующим вычислением сопротивления), *непосредственной оценки* и *сравнения* (с помощью мостов и потенциометров).

Для непосредственного измерения сопротивлений применяют *омметры* — приборы, у которых шкала проградуирована в омах. Обычно омметр — прибор, объединяющий в одном корпусе миллиамперметр магнитоэлектрической системы, источник питания (батарейку) и добавочный резистор  $R$ , ограничивающий ток (рис. 14).

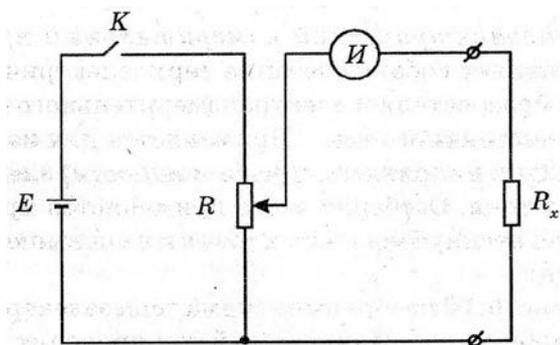


Рис. 14. К принципу действия омметра



Рис. 15. Омметр



Рис. 16. Мегаомметр

Так как малому сопротивлению соответствует большой ток (и наоборот), то для нахождения положения нулевого деления на шкале замыкают ключ  $K$  и перемещением движка резистора  $R$  добиваются наибольшего отклонения стрелки. Это положение стрелки соответствует нулевому делению шкалы. Затем, подключая известные сопротивления, градуируют шкалу в омах. Отсчет по такой шкале ведется справа налево, а так как по закону Ома между током и сопротивлением существует обратно пропорциональная зависимость, то шкала омметра неравномерна (рис. 15). Она сильно сжата у конца, соответствующего большим сопротивлениям.

Для измерения больших сопротивлений (сопротивления изоляции электрических машин, аппаратов, приборов и электрической сети напряжением до 1000 В)

применяются *мегаомметры* (рис. 16). Омметры с электроизмерительным механизмом позволяют измерять сопротивления, не превышающие нескольких тысяч МОм. Для измерения больших сопротивлений используются электронные омметры (тераомметры).

## 7. Термоэлектрические приборы

Термоэлектрический измерительный прибор представляет собой сочетание термоэлектрического преобразователя и электроизмерительного механизма постоянного тока. Применяется для измерения *силы и напряжения* (реже мощности) электрического тока. Особенно часто применяется при измерении несинусоидальных токов и на повышенных частотах.

На рис. 14 изображена схема термоэлектрического амперметра. Измеряемый ток проходит через подогреватель П (обмотка с большим удельным сопротивлением) и нагревает его. Спай термопары Т прикреплен к подогревателю или находится вблизи него. ЭДС термопары создает ток, проходящий через магнитоэлектрический прибор. Таким образом, показания термоэлектрического прибора пропорциональны мощности, расходуемой на нагревание подогревателя (т. е. квадрату действующего значения тока в нем). Поэтому шкала такого прибора почти квадратична и градуируется в единицах действующего значения тока (в случае вольтметра — действующего значения напряжения).

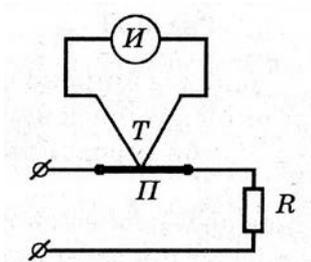


Рис. 17

Показания термоэлектрического измерительного прибора слабо зависят от частоты (поэтому они применяются в цепях как постоянного, так и переменного тока) и формы кривой тока или напряжения. В наиболее точных приборах (до 100-150 мА) для ограничения потерь тепла подогреватель вместе с термопарой помещают в вакуумный стеклянный баллон.

## 8. Цифровые измерительные приборы

Цифровой электроизмерительный прибор — такой прибор, в котором значение измеряемой электрической величины представлено в виде цифр. Показания цифровых приборов легче читать, и они обеспечивают большую точность, чем аналоговые. Однако аналоговые приборы обеспечивают возможность проследить за быстрыми изменениями тока и напряжения. Цифровые приборы применяются для измерений практически всех электрических величин (постоянного и переменного напряжения и тока, сопротивления, емкости, индуктивности, добротности и др., так называемые *мультиметры*, рис. 18), а также неэлектрических (например, давления, температуры, скорости), предварительно преобразованных в электрические.



Рис. 18. Цифровой мультиметр

Принцип действия цифровых измерительных приборов основан на автоматическом преобразовании непрерывной, или аналоговой, измеряемой величины в дискретные сигналы в виде кода, в соответствии с которым ее значение отображается на дисплее в цифровой форме. Представление аналоговых сигналов в виде дискретного кода очень удобно, поскольку в таком виде аналоговые сигналы могут вводиться в ЭВМ или передаваться по каналам телеметрии.

Большинство цифровых электроизмерительных приборов состоит из следующих частей: измерительной цепи, выполняющей необходимые аналоговые преобразования измеряемой величины (измерительные мост, усилитель, преобразователь напряжения во временной интервал и др.), аналого-цифрового преобразователя и дешифратора, в котором кодированный сигнал преобразуется в соответствующее число и затем отображается на дисплее.

Существует несколько методов преобразования непрерывной величины в дискретную, из которых наибольшее распространение получил метод числоимпульсного кодирования. Этим методом измеряемая величина преобразуется в пропорциональное ей число импульсов, которое подсчитывается цифровым электронным счетчиком. Электронные счетчики ведут счет импульсов, как правило, в двоичной системе счисления. Применение двоичной системы счисления в цифровых приборах обусловлено тем, что для записи чисел в ней нужны элементы, имеющие всего два устойчивых состояния.

Результат измерения, полученный в двоичной системе счисления, с помощью специального устройства — дешифратора — переводится в десятичную систему, а затем выдается на световое табло.

## **9. Измерение неэлектрических величин электрическими методами. Датчики**

На практике часто возникает необходимость измерять неэлектрические величины. Проще всего это достигается с помощью электрических методов, хотя сами измеряемые параметры не являются электрическими.

Любой электрический прибор, предназначенный для измерения неэлектрической величины, имеет в своем составе измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую (датчик). В качестве электрического измерительного устройства преобразованной величины применяют магнитоэлектрический милливольтметр, цифровой измерительный прибор и др. При этом шкалу отсчетного устройства электроизмерительного прибора градуируют в единицах измеряемой неэлектрической величины.

Датчики разнообразны по принципу действия. В индуктивных преобразователях используется зависимость индуктивности обмоток от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов магнитной цепи. Емкостные преобразователи основаны на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров и взаимного расположения его обкладок. В пьезоэлектрических преобразователях используется эффект появления электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварца, титаната бария и др.) под влиянием механических напряжений.

Простейшим примером датчика является термопара. ЭДС термопары является функцией температуры. В качестве электрического измерительного устройства используют милливольтметр, который может иметь шкалу, отградуированную в градусах.

Индукционные датчики чаще всего применяются в приборах для измерения угловой скорости, линейных и угловых перемещений и ускорений. Так, действие индуктивного датчика с разомкнутой магнитной цепью основано на изменении индуктивности катушки по мере внесения в нее стального сердечника. Если небольшой генератор соединить с вращающимся или прямолинейно движущимся механизмом, то его ЭДС будет пропорциональна скорости вращения (движения). Таким образом, по значению ЭДС можно судить о скорости движения.

Электроизмерительные приборы, используемые для измерения неэлектрических величин, имеют ряд преимуществ перед неэлектрическими приборами. Здесь прежде всего следует отметить их низкую инерционность, т. е. возможность быстро реагировать на изменение измеряемой величины, широкий диапазон измерений соответствующей величины, возможность включения их в электрические цепи, а потому использование их при дистанционном и автоматическом управлении технологическими процессами.

### **Вопросы для повторения**

1. Что такое абсолютная погрешность электроизмерительного прибора?
2. Что такое класс точности электроизмерительного прибора?
3. Какие условные обозначения имеются на шкале электроизмерительного прибора?
4. Для чего служит корректор?
5. Для чего служит успокоитель?
6. Как действует магнитный успокоитель?
7. Как действует воздушный успокоитель?
8. Опишите устройство и принцип действия магнитоэлектрического электроизмерительного прибора.
9. Опишите устройство и принцип действия электромагнитного электроизмерительного прибора.

10. Опишите устройство и принцип действия электродинамического электроизмерительного прибора.
11. Как нужно соединить обмотки электродинамического прибора, чтобы использовать его как амперметр?
12. Как нужно соединить обмотки электродинамического прибора, чтобы использовать его как вольтметр?
13. Как нужно включить электродинамический прибор, чтобы измерить активную мощность на переменном токе?
14. Как нужно включить электродинамический прибор, чтобы измерить реактивную мощность на переменном токе?
15. Как устроен омметр?
16. Почему у омметра нулевое деление шкалы находится справа?
17. Как устроен термоэлектрический прибор?
18. Как устроен детекторный прибор?
19. Как устроен и работает счетчик электрической энергии?
20. Опишите принцип действия цифрового измерительного прибора.
21. Приведите пример измерения неэлектрической величины с помощью датчика.