

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ, ВИДОВ И МЕТОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Электрическим измерением называют нахождение значений параметров электрических величин опытным путем с помощью специальных средств.

Средства измерения. По функциональному назначению в средствах измерения различают: меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные системы и измерительно-вычислительные комплексы.

Меры служат для воспроизведения значений электрических величин заданных размеров.

Измерительные приборы предназначены для выработки измерительной информации о значениях измеряемой величины в форме, доступной для оператора.

Различают измерительные приборы:

- **показывающие**, которые допускают только считывание показаний отчетного устройства; **сравнения**, в которых измеряемая величина непосредственно сравнивается с мерой; **регистрирующие**, допускающие также регистрацию показаний на различных носителях в реальном масштабе времени;
- **аналоговые**, показания которых являются непрерывной функцией значений измеряемой величины, и **цифровые**, в которых значения измеряемой величины через равные интервалы времени заменяются цифровыми кодами;
- **электро механические** на основе различного рода электро механических измерительных механизмов и

электронные, в которых такие механизмы отсутствуют или используются лишь в качестве отсчетных устройств;

- стационарные (щитовые) и переносные — в зависимости от характера применения.

Измерительные преобразователи служат для преобразования значений измеряемых величин в пропорциональные значения величин, удобных для дальнейшей обработки, но не воспринимаемых оператором непосредственно.

В зависимости от характера преобразуемых величин различают измерительные преобразователи электрических величин в электрические величины, неэлектрических величин в электрические величины, магнитных величин (индукции, магнитного потока и др.) в электрические величины и электрических величин в неэлектрические величины (отклонение стрелочного указателя и др.).

Измерительные системы представляют собой совокупность различных средств измерения, соединенных между собой каналами связи, и предназначены для сбора и анализа большого объема измерений.

Измерительно-вычислительный комплекс представляет собой измерительную систему, в состав которой входит свободно программируемый компьютер.

Виды измерений. По способу получения результата различают прямые, косвенные и совместные измерения.

При *прямом* измерении значение измеряемой величины определяется показанием прибора, шкала которого проградуирована в соответствующих единицах.

При *косвенном* измерении значение измеряемой величины рассчитывается по результатам прямых измерений других величин, с которыми она связана известными зависимостями. Например, измерение значения сопротивления резистора в цепи постоянного тока по закону Ома $R = U/I$ на основе измерений тока I и напряжения U .

При *совместном* измерении результат определяется прямыми и косвенными изменениями величин, от которых зависит значение измеряемой величины. Например, измерение температурного коэффициента электрического сопротивления по закону Ома на основе прямых измерений тока и напряжения при различных температурах.

Методы измерений. В зависимости от приемов использования средств измерения различают две группы методов измерений: непосредственной оценки и сравнения с мерой.

Методом непосредственной оценки значение измеряемой величины определяется непосредственным отсчетом по шкале предварительно проградуированного с помощью меры показывающего прибора.

Методом сравнения значение измеряемой величины сравнивается со значением одноименной величины, воспроизводимой мерой. Различают нулевой и дифференциальный методы сравнения. Первым методом значение меры регулируется до значения измеряемой величины, а равновесие фиксируется измерительным прибором высокой чувствительности. Вторым методом значение измеряемой величины неполностью уравнивается значением меры, а разность их значений измеряется непосредственным отсчетом.

Методы сравнения и измерительные приборы на их основе обладают высокой точностью.

5.2. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ

Измерение значения любой физической величины сопровождается погрешностью, т.е. расхождением ее измеренного и действительного значений. Различают погрешности абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютная ΔA и относительная γ_0 погрешности измерения определяются по формулам

$$\left. \begin{array}{l} \Delta A = A_{\text{изм}} - A; \\ \gamma_0 = (\Delta A / A) 100 \%, \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

где $A_{\text{изм}}$ и A — измеренное и действительные значения измеряемой величины.

В большинстве случаев абсолютная погрешность мала и можно принять

$$\gamma_0 = (\Delta A / A_{\text{изм}}) 100 \%$$

Абсолютная и относительная погрешности могут иметь положительное и отрицательное значения.

Например, если амперметр показывает $A_{\text{изм}} = 5$ А, а действительное значение тока $A = 4,9$ А, то абсолютная погрешность $\Delta A = 0,1$ А, относительная погрешность $\gamma_0 = (0,1/5) 100 \% = 2 \%$.

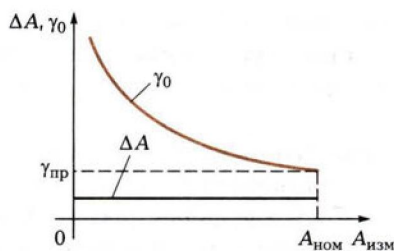


Рис. 5.1

Однако оценивать точность показывающих приборов по относительной погрешности неудобно, так как абсолютная погрешность таких приборов мало изменяется вдоль всей шкалы. Поэтому с уменьшением значения измеряемой величины быстро увеличивается относительная погрешность (рис. 5.1).

Для оценки точности показывающих приборов служит *приведенная относительная погрешность*

$$\gamma_{\text{пр}} = (\Delta A / A_{\text{ном}}) 100 \%, \quad (5.2)$$

Таблица 5.1. Условные обозначения на шкале электромеханического показывающего прибора

Наименование прибора	Условное обозначение
Прибор для измерения в трехфазной цепи с неравномерной нагрузкой фаз	
То же, с двухэлементным измерительным механизмом	
Защита от внешних магнитных полей, например 2 мТл	
Защита от внешних электрических полей, например 10 кВ/м	
Класс точности при нормировании погрешности в процентах диапазона измерения, например 1,5	1,5

Наименование прибора	Условное обозначение
То же, в процентах длины шкалы, например 1,5	
Горизонтальное положение шкалы	
Вертикальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту, например $\pi/3$	
Направление ориентировки прибора в магнитном поле Земли	
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 кВ	
Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак выполняется красным цветом)	

где $A_{\text{ном}}$ — номинальное значение, равное наибольшему значению на шкале прибора.

Например, если на шкале амперметра номинальное значение $A_{\text{ном}} = 10$ А, а абсолютная погрешность $\Delta A = 0,1$ А, то приведенная погрешность $\gamma_{\text{пр}} = (0,1/10)100\% = 1\%$.

Значения погрешностей определяются недостатками самого прибора и внешними влияниями (присутствие вблизи прибора предметов из ферромагнитных материалов, источников магнитных и электрических полей и др.). Приведенная относительная погрешность, определенная в нормальных рабочих условиях и зависящая только от свойств самого прибора, называется *основной погрешностью*.

Измерительные приборы подразделяют на классы точности, обозначением которых служит допустимая основная погрешность: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Класс точности указывают на лицевой панели прибора; он означает, что абсолютная погрешность прибора на всех делениях шкалы не превышает значения, определяемого классом точности.

Например, если амперметр класса точности 1 имеет шкалу с номинальным значением $A_{\text{ном}} = 10 \text{ А}$, то в пределах шкалы абсолютная погрешность измерения будет по (5.2) не больше $\pm \Delta A = \pm A_{\text{ном}}/100 = \pm 10/100 = \pm 0,1 \text{ А}$.

Отклонение внешних условий от нормальных вызывает *дополнительные погрешности*.

Величина da/dA , где a — деление на шкале показывающего прибора, называется его *чувствительностью*.

В табл. 5.1 приведены некоторые условные обозначения на панели приборов, обозначающие их функциональные особенности и условия нормальной эксплуатации.

5.3. ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Работающий электроизмерительный прибор потребляет энергию и тем самым вносит изменение в режим работы электрической цепи, в которую он включен. Это необходимо учитывать при обработке результатов измерений.

Рассмотрим косвенное измерение сопротивления резистора (при постоянном токе) на основе закона Ома с помощью амперметра и вольтметра. Возможны две схемы включения приборов.

В схеме на рис. 5.2 амперметр измеряет ток I в резисторе сопротивлением R , а вольтметр — сумму напряжений на резисторе и цепи амперметра $U' = U + R_A I$, где R_A — сопротивление цепи амперметра; U — напряжение на резисторе. Следовательно, на основании показаний приборов по закону Ома определяется сумма сопротивлений резистора и цепи амперметра

$$U'/I = R' = R + R_A,$$

в то время как действительное значение сопротивления резистора

$$R = R'(1 - R_A/R').$$

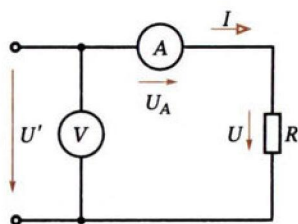


Рис. 5.2

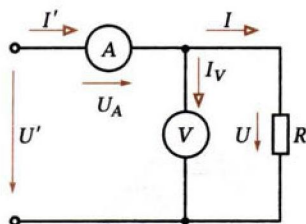


Рис. 5.3

Ошибка измерения тем меньше, чем меньше сопротивление цепи амперметра.

В схеме на рис. 5.3 вольтметр измеряет напряжение U на резисторе, а амперметр — сумму токов в резисторе и цепи вольтметра $I' = I + I_V$. В этом случае на основании показаний приборов по закону Ома определяется сумма проводимостей резистора и цепи вольтметра

$$I'/U = 1/R' = 1/R + 1/R_V,$$

т. е.

$$R = R' / (1 - R'/R_V),$$

где R_V — сопротивление цепи вольтметра.

Ошибка измерения тем меньше, чем больше сопротивление цепи вольтметра.

Влияние потребления энергии измерительными приборами на результаты измерений тем больше, чем меньше мощности контролируемых с их помощью электрических цепей.

5.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ УЗЛЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ

В электромеханических показывающих приборах для прямых измерений его подвижная часть под действием сил, пропорциональных значениям измеряемой величины, перемещается относительно неподвижной. По конструкции отсчетного устройства различают электромеханические приборы со стрелочным и световым указателями при установке подвижной части на растяжках или осях.

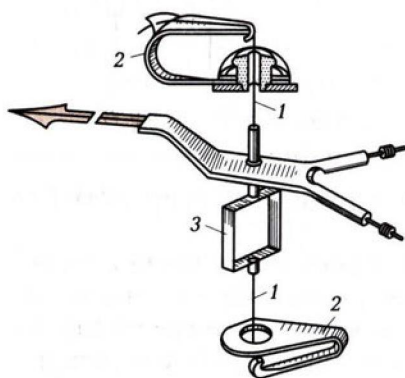


Рис. 5.4

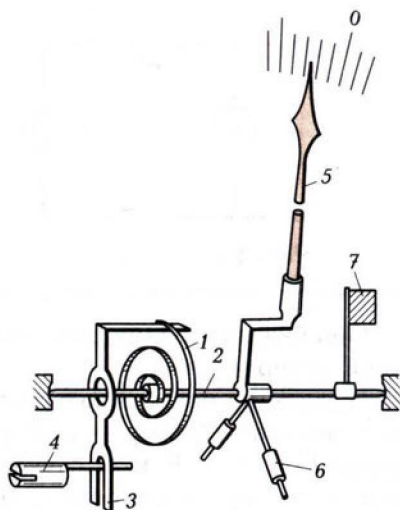


Рис. 5.5

Растяжки — это упругие ленты из бериллиевой или оловянно-цинковой бронзы. Подвижная часть прибора подвешивается на двух растяжках 1 (рис. 5.4), концы которых крепятся к двум плоским пружинам 2. Растяжки могут служить для подвода тока к рамке катушки 3 подвижной части прибора. Закручивание растяжек обеспечивает противодействующий момент.

Ось при установке на ней подвижной части располагается горизонтально для уменьшения трения в опорах, а противодействующий момент создают спиральные пружины, изготовляемые из фосфорной бронзы.

Вследствие остаточных деформаций и механических воздействий стрелочный указатель неработающего прибора может находиться на ненулевом делении. Для его возвращения в нулевое положение служит корректор. Для создания противодействующего момента (рис. 5.5) один конец пружины 1 прикрепляется к поводку 3 корректора, а второй — к оси 2 подвижной части. Стрелочный указатель 5 можно смещать посредством поводка, поворачивая винт 4 на корпусе прибора. Для уравнивания моментов вращения масс подвижной части вокруг оси на ней укрепляют противовесы 6. Показания такого прибора почти не зависят от его положения.

Подвижная часть прибора с пружиной обладает инерцией и упругостью. Поэтому при изменении значений измеряемой вели-

чины новое положение равновесия подвижной части прибора устанавливается не сразу, а часто после нескольких колебаний. Для поглощения кинетической энергии подвижной части и сокращения времени переходного процесса приборы снабжаются успокоителями.

Применяются магнитоиндукционные и воздушные успокоители.

Магнитоиндукционный успокоитель представляет собой алюминиевый сектор, укрепленный на оси подвижной части и движущийся в магнитном поле неподвижных постоянных магнитов. При движении сектора в нем индуцируются ЭДС, а под их воздействием — токи. Взаимодействие последних с магнитным полем неподвижных постоянных магнитов создает силу, которая препятствует движению подвижной части.

Воздушный успокоитель представляет собой закрытую камеру, в которой располагается легкое алюминиевое «крыло» 7 (см. рис. 5.5), укрепленное на оси подвижной части прибора. Для торможения используется разность давлений в камере по обе стороны «крыла» при его движении.

5.5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АНАЛОГОВЫЕ ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Электромеханические аналоговые показывающие приборы состоят из электромеханического измерительного механизма и измерительной цепи.






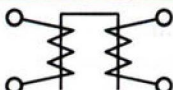






Измерительный механизм преобразует электрическую энергию в механическую энергию перемещения подвижной части и связанного с ней указателя.

Измерительная цепь преобразует значение измеряемой электрической величины (напряжения) в пропорциональное значение величины (ток), непосредственно воздействующей на измерительный механизм.

Один и тот же измерительный механизм в соединении с различными измерительными цепями может служить для измерения различных величин.

В зависимости от принципа действия измерительного механизма различают несколько систем электромеханических аналоговых показывающих приборов, условные обозначения которых даны в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Условное обозначение принципа действия (системы) аналогового электромеханического показывающего прибора

Наименование системы прибора	Условное обозначение	
	Обычный измерительный механизм	Логометрический измерительный механизм
Магнитоэлектрический прибор с подвижной катушкой		
Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом		
Электромагнитный прибор		
Электромагнитный поляризованный прибор		
Электродинамический прибор		
Индукционный прибор		
Электростатический прибор		

Магнитоэлектрическая система. В измерительных механизмах магнитоэлектрической системы вращающий момент создается взаимодействием измеряемого постоянного тока в катушке механизма с магнитным полем постоянного магнита. Различают приборы магнитоэлектрической системы с подвижной катушкой (подвижной рамкой) и с подвижным магнитом.

В магнитоэлектрическом механизме с подвижной катушкой (рис. 5.6) последняя установлена на опорах и может поворачиваться в зазоре магнитной цепи в составе магнитопровода 2, по-

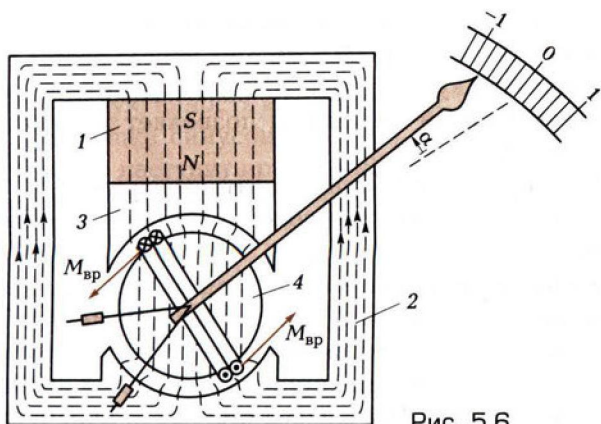


Рис. 5.6

люсного наконечника 3 и цилиндрического сердечника 4, изготовляемых из магнитно-мягкого материала, и постоянного магнита 1.

На подвижную часть механизма действует вращающий момент

$$M_{вр} = 2Fwd/2 = wBI d = k_{вр} I, \quad (5.3)$$

где d и l — диаметр и длина каркаса катушки, содержащей w витков; $F = BI$ — сила, действующая на каждый проводник катушки; $k_{вр} = wBd$ — коэффициент пропорциональности вращающего момента.

Противодействующий момент спиральной пружины (на рис. 5.6 не показана) пропорционален углу поворота катушки α , т. е. $M_{пр} = k_{пр} \alpha$, где $k_{пр}$ — коэффициент пропорциональности. При равенстве моментов $M_{вр} = M_{пр}$ угол поворота катушки пропорционален измеряемому току:

$$I = k_{пр} \alpha / k_{вр} = c_I \alpha \quad (5.4)$$

или

$$\alpha = \frac{1}{c_I} I,$$

где c_I — постоянная прибора («цена деления шкалы»).

Основные достоинства показывающих приборов магнитоэлектрической системы — высокие чувствительность и класс точности (до 0,1) и равномерность шкалы при измерении в цепи постоянного тока вследствие значительной (до 0,35 Тл) и равномерно распределенной в воздушном зазоре магнитной цепи измерительного механизма магнитной индукции поля.

Основной недостаток — измерение только постоянных токов.

Для измерения синусоидального тока используются преобразователи. Например, двухполупериодный выпрямитель (рис. 5.7, где ИМ — измерительный механизм) позволяет измерять среднее значение тока i в цепи (4.3).

Гальванометры — приборы магнитоэлектрической системы с неградуированной шкалой и высокой чувствительностью к постоянному току.

Электромагнитная система. В измерительных механизмах электромагнитной системы вращающий момент обусловлен электромеханическим действием магнитного поля измеряемого тока в неподвижной катушке прибора на подвижный ферромагнитный якорь. Механические силы стремятся переместить якорь так, чтобы энергия магнитного поля механизма стала возможно большей.

В *электромагнитном механизме* (рис. 5.8) якорь 1 втягивается в катушку 2, включенную в цепь измеряемого тока. Для усиления магнитного поля и регулирования значения вращающего момента служит неподвижный ферромагнитный сердечник 3.

Противодействующий момент создается спиральной пружиной 5. Для защиты от внешних магнитных полей измерительный механизм помещен в ферромагнитный экран 4.

В общем случае вращающий момент, действующий на подвижную часть, равен производной энергии магнитного поля $W_M = L(\alpha)i^2/2$ (3.23) по координате перемещения α

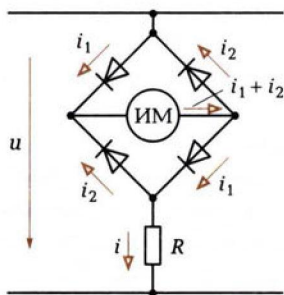


Рис. 5.7

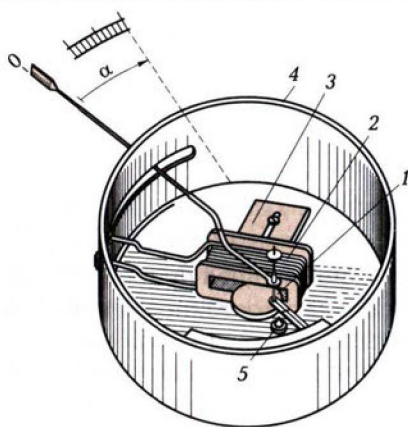


Рис. 5.8

$$M_{\text{вп}} = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\alpha)}{d\alpha}, \quad (5.5)$$

где $L(\alpha)$ и i — индуктивность и ток катушки.

Если ток катушки синусоидальный $i = I_m \sin \omega t$, то равновесие подвижной части наступит при равенстве среднего за период значения вращающего момента и противодействующего момента пружины:

$$M_{\text{вп}} = \frac{I_m^2}{2\pi} \frac{dL(\alpha)}{d\alpha} \int_0^\pi \sin^2 \omega t d\omega t = \frac{I^2}{2} \frac{dL(\alpha)}{d\alpha} = M_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \alpha, \quad (5.6)$$

где I — действующее значение тока.

Следовательно, действующее значение измеряемого тока равно

$$I = \sqrt{\frac{2k_{\text{пр}}}{dL(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_I(\alpha) \sqrt{\alpha} \quad (5.7)$$

или

$$\alpha = \frac{1}{c_I^2(\alpha)} I^2.$$

Аналогичную зависимость имеет электромагнитный механизм при измерении постоянного тока $i = I$.

Магнитное поле катушки с измеряемым током относительно слабое, так как его магнитные линии большую часть пути проходят в воздухе. По этой причине чувствительность измерительного механизма электромагнитной системы мала и его необходимо защищать от внешних магнитных полей или изготавливать астатическим.

В *астатическом измерительном механизме* число катушек, в равной мере участвующих в образовании вращающего момента, удваивается, а их собственные магнитные поля имеют противоположные направления.

Внешнее однородное магнитное поле, усиливая магнитное поле одной катушки, в такой же степени ослабляет магнитное поле второй катушки, не изменяя общий вращающий момент измерительного механизма.

Основные достоинства показывающих приборов электромагнитной системы — простота конструкции, устойчивость неподвижной катушки к перегрузкам по току, независимость показаний от формы кривой тока.

Основные недостатки — неравномерность шкалы, которую частично можно исправить выбором геометрической формы подвижного сердечника, и низкий класс точности (не выше 1,5) вследствие магнитного гистерезиса и потерь энергии в ферромагнитных элементах измерительного механизма.

Электродинамическая система. В измерительном механизме электродинамической системы для создания вращающегося момента используется взаимодействие двух катушек с измеряемым током.

Электродинамический механизм состоит из неподвижной 1 и подвижной 2 катушек (рис. 5.9). Противодействующий момент создает пружина 3.

Вращающий момент электродинамического механизма определяется так же, как электромагнитного механизма (5.5):

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_m}{d\alpha} = i_1 i_2 \frac{dM(\alpha)}{d\alpha}, \quad (5.8)$$

где в выражении энергии магнитного поля от угла поворота α подвижной катушки зависит только составляющая $M(\alpha) i_1 i_2$; i_1 , i_2 и $M(\alpha)$ — токи и взаимная индуктивность неподвижной и подвижной катушек.

Наличие двух катушек в измерительном механизме позволяет использовать его в приборах для измерения различных электрических величин.

При измерении действующего значения синусоидального тока i подвижная и неподвижная катушки соединяются параллельно (рис. 5.10, а, где $i_1 = k_1 i$, $i_2 = k_2 i$ — токи катушек). Сравнив зависимости (5.5) и (5.8) и выполнив преобразования, аналогичные (5.6), получим действующее значение измеряемого тока

$$I = \sqrt{\frac{k_1 k_2 k_{\text{нр}}}{dM(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_I(\alpha) \sqrt{\alpha}$$

или

$$\alpha = \frac{1}{c_I^2(\alpha)} I^2.$$

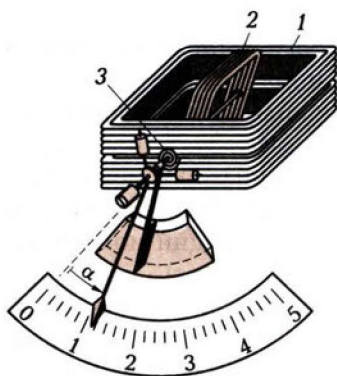


Рис. 5.9

Для расширения пределов измерения и функциональных возможностей

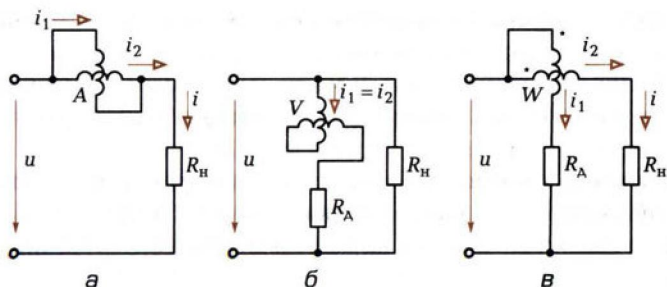


Рис. 5.10

приборов различных систем в цепи измерительных механизмов включают резисторы. Резистор, включаемый последовательно с катушкой измерительного механизма, называется *добавочным резистором*. Резистор, включаемый параллельно с катушкой измерительного механизма или ветвью, содержащей катушку и добавочный резистор, называется *шунтом*.

Включение катушек электродинамического механизма по схемам на рис. 5.10, б и в позволяет измерять действующее значение напряжения и мощность в цепи синусоидального тока

$$U = (R_A + R_k) \sqrt{\frac{k_{np}}{dM(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_U(\alpha) \sqrt{\alpha};$$

$$P = UI \cos \varphi = \frac{(R_A + R_{к1}) k_{np}}{dM(\alpha)/d\alpha} \alpha = c_P(\alpha) \alpha$$

или

$$\alpha = \frac{1}{c_U^2(\alpha)} U^2; \quad \alpha = \frac{1}{c_P(\alpha)} P,$$

где R_A , $R_{к1}$ и R_k — сопротивления добавочного резистора, катушки в цепи напряжения ваттметра и двух последовательно включенных катушек в цепи вольтметра; φ — угол сдвига фаз между напряжением и током.

Заметим, что в отличие от амперметра и вольтметра подвижная и неподвижная катушки ваттметра включаются: одна — в цепь тока, а другая — в цепь напряжения. Поэтому направление отклонения указателя ваттметра, т. е. знак измеряемой мощности, зависит от способа подключения выводов катушек, отмеченных

звездочкой, в цепь с выбранными положительными направлениями тока и напряжения (см. подразд. 4.14).

Аналогичные зависимости имеет электродинамический механизм при измерении одноименных величин в цепи постоянного тока.

Основные достоинства показывающих приборов электродинамической системы — высокий класс точности (до 0,1), независимость показаний от формы кривой измеряемого тока или напряжения.

Основные недостатки — низкая чувствительность вследствие слабого электромеханического действия магнитных полей катушек, неравномерность шкалы при измерении действующих значений тока и напряжения, сложность конструкции.

Электростатическая система. В измерительных механизмах электростатической системы вращающий момент создается электростатическими силами взаимодействия зарядов, образующихся на пластинах конденсатора под действием приложенного между ними измеряемого напряжения.

В *электростатическом механизме* (рис. 5.11) вращающий момент будет стремиться повернуть подвижную часть 1 относительно изолированной неподвижной части 2 так, чтобы энергия электрического поля в объеме между ними (1.15) была возможно

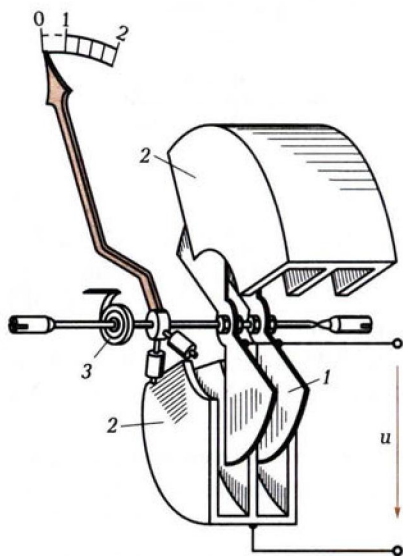


Рис. 5.11

большей. В общем случае вращающий момент равен производной энергии электрического поля $W_{эл} = C(\alpha)u^2/2$ по координате перемещения α

$$M_{вр} = \frac{dW_{эл}}{d\alpha} = \frac{u^2}{2} \frac{dC(\alpha)}{d\alpha},$$

где $C(\alpha)$ и u — электрическая емкость между подвижной и неподвижной частями и напряжение между ними.

Сравнивая это выражение с выражением для вращающего момента в электромагнитном механизме (5.5), видим, что относительно u и i они аналогичны.

Следовательно, подобно (5.7) с учетом противодействующего момента пружины 3 электростатический механизм позволяет измерять действующее значение синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$ и постоянное напряжение $u = U$

$$U = \sqrt{\frac{2k_{пр}}{dC(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_U(\alpha) \sqrt{\alpha}$$

или

$$\alpha = \frac{1}{c_U^2(\alpha)} U^2.$$

Основные достоинства показывающих приборов электростатической системы — малое потребление энергии, широкий диапазон частот (до 10 МГц), независимость показаний от формы кривой напряжения.

Основные недостатки — низкая чувствительность, неравномерность шкалы. Такие приборы применяют для измерения высоких напряжений.

Индукционная система. В измерительных механизмах индукционной системы используется электромагнитное действие вращающегося магнитного поля.

В *индукционном измерительном механизме* вращающий момент создается действием результирующего магнитного поля двух электромагнитов синусоидального тока на подвижную часть — алюминиевый диск, в котором это поле возбуждает вихревые токи.

Значение вращающего момента зависит от значений токов в электромагнитах и угла сдвига фаз между ними. Это свойство индукционного измерительного механизма используется в приборах для измерения мощности и энергии в цепях синусоидального тока (см. подразд. 5.7).

5.6. ЛОГОМЕТРЫ

Логометрами называются показывающие приборы, положение подвижной части которых зависит от отношений значений двух токов. Их применяют для измерения электрических (сопротивления, индуктивности, угла сдвига фаз) и неэлектрических (уровня жидкости, влажности и т. п.) величин. Возможно построение логометрического механизма любой из рассмотренных в подразд. 5.5 измерительных систем с характерной особенностью — отсутствием противодействующего момента, создаваемого пружиной.

Рассмотрим магнитоэлектрический логометр для измерения сопротивления. В неоднородном поле постоянного магнита (рис. 5.12) расположены две взаимно неподвижные катушки 1 и 2, укрепленные на общей оси со стрелочным указателем. Через эластичные токопроводы 3 катушки подключаются к общему источнику. Вращающие моменты, действующие на катушки, зависят от их положения в неоднородном магнитном поле, т. е. угла α , и токов

$$I_1 = \frac{E}{R_0} \text{ и } I_2 = \frac{E}{R_x}, \quad (5.9)$$

где R_0 и R_x — известное и неизвестное сопротивления ветвей катушек.

Направления токов I_1 и I_2 выбирают так, чтобы вращающие моменты катушек были направлены навстречу друг другу. Используя обозначения, принятые в (5.3), получим условие равновесия подвижной части

$$\begin{aligned} M_{\text{вр1}} &= B_1(\alpha) w_1 l d I_1 = \\ &= M_{\text{вр2}} = B_2(\alpha) w_2 l d I_2, \end{aligned} \quad (5.10)$$

где $B_1(\alpha)$ и $B_2(\alpha)$ — зависимости магнитной индукции поля от значения угла α . Соотношение (5.10) показывает, что угол поворота подвижной части зависит только от отношения значений токов в катушках.

Подставив выражения токов I_1 и I_2 из (5.9) в (5.10), получим зависимость

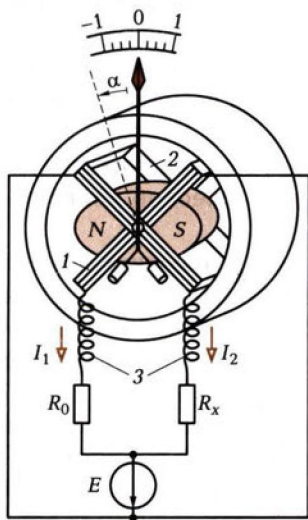


Рис. 5.12

между значениями измеряемого сопротивления и угла поворота подвижной части

$$R_x = R_0 \frac{w_2 B_2(\alpha)}{w_1 B_1(\alpha)} = c_R f(\alpha).$$

Независимость угла поворота подвижной части от значения ЭДС используется в омметрах и мегаомметрах (до 10^{14} Ом). В последних для контроля электрической изоляции применяют источники ЭДС (до 2500 В) в виде генераторов с ручным приводом (см. подразд. 8.9).

Основное достоинство логометров — независимость показания от значения напряжения источника.

Основные недостатки — неравномерность шкалы, низкий класс точности (не выше 1,5).

5.7. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Схема устройства однофазного индукционного счетчика, включенного в электрическую цепь для измерения активной энергии, потребляемой приемником с сопротивлением нагрузки Z_n , показана на рис. 5.13.

Подвижная часть счетчика представляет собой свободно вращающийся алюминиевый диск, на который одновременно действуют в противоположных направлениях вращающий момент, пропорциональный активной мощности приемника,

$$M_{\text{вр}} = k_{\text{вр}} P, \quad (5.11)$$

и тормозной момент. При равенстве вращающего и тормозного моментов диск вращается с постоянной частотой.

Для создания тормозного момента используется магнитоиндукционный принцип. Поле постоянного магнита индуцирует во вращающемся диске ЭДС, значение которой пропорционально потоку Φ постоянного магнита и средней окружной скорости v вращения части диска, находящейся между полюсами:

$$E = k_1 \Phi v = k_1 \Phi 2\pi r n / 60 = k_2 \Phi n,$$

где $n = \Omega_{\text{вр}} 60 / 2\pi$ — частота вращения диска, об/мин; r — средний радиус части диска, находящейся между полюсами; $\Omega_{\text{вр}} = v/r$ — угловая скорость вращения диска.

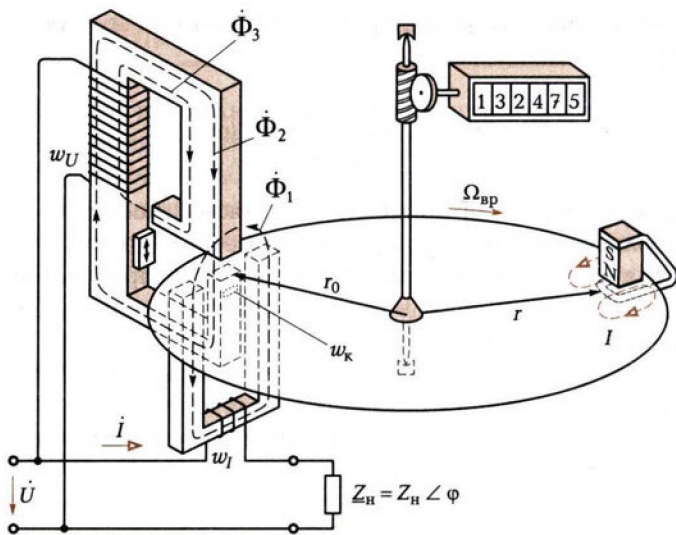


Рис. 5.13

Под действием этой ЭДС в диске возникает ток, значение которого пропорционально удельной проводимости γ материала диска:

$$I = k_3 E \gamma.$$

Взаимодействие поля постоянного магнита с током в диске создает тормозной момент, пропорциональный току и потоку:

$$M_{\text{тор}} = k_4 I \Phi,$$

или после подстановки выражений для тока и ЭДС

$$M_{\text{тор}} = k_5 r \gamma \Phi^2 n = k_{\text{тор}} n, \quad (5.12)$$

где k_1 — k_5 — коэффициенты пропорциональности.

При постоянной частоте вращения диска тормозной и вращающий моменты равны, т. е. из (5.11) и (5.12) активная мощность

$$P = k_{\text{тор}} n / k_{\text{вр}}.$$

Интеграл от мощности по времени равен электрической энергии, полученной контролируемой цепью за промежуток времени $t_2 - t_1$:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \frac{k_{\text{тор}}}{k_{\text{вр}}} \int_{t_1}^{t_2} n dt = \frac{k_{\text{тор}}}{k_{\text{вр}}} N = c_{\text{сч}} N, \quad (5.13)$$

где N — суммарное число оборотов диска за время $t_2 - t_1$; $c_{сч}$ — постоянная счетчика.

Число оборотов N диска регистрирует отсчетное устройство, соединенное с его осью червячной передачей. Передаточное число червячной передачи выбирают так, чтобы отсчетное устройство показывало непосредственно киловатт-часы, а не числа оборотов подвижной части.

Чтобы получить выражение вращающего момента, обратимся к векторной диаграмме цепей тока и напряжения счетчика, приняв за исходный вектор, т.е. с нулевой начальной фазой, вектор напряжения \dot{U} (рис. 5.14). Фазы тока \dot{I} в обмотке w_1 с малым числом и возбуждаемого им магнитного потока $\dot{\Phi}_1$ в магнитопроводе с большим воздушным зазором совпадают. Фазы напряжения \dot{U} между выводами обмотки w_U с большим числом витков, расположенной на магнитопроводе с малым воздушным зазором, отличается от фазы потока в этом магнитопроводе $\dot{\Phi}_2$ на угол $\pi/2$.

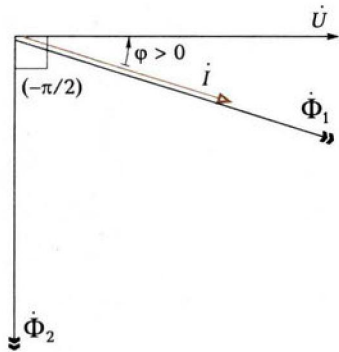


Рис. 5.14

Потокоцепление рассеяния с обмоткой w_U в цепи напряжения счетчика равно $w_U \Phi_3$. Его значение велико и может регулироваться в небольших пределах подвижной ферромагнитной пластиной.

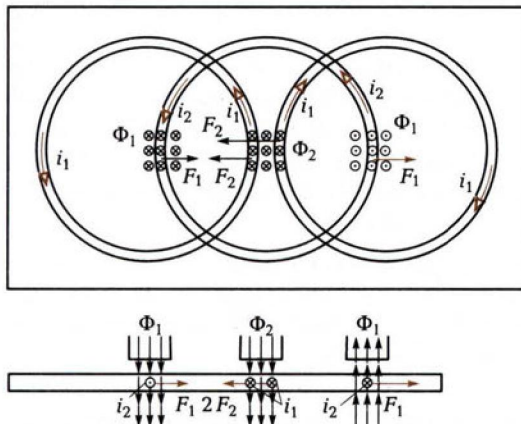


Рис. 5.15

Рассмотрим процессы в модели неподвижного диска (рис. 5.15).
Синусоидальные магнитные потоки

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_{m1} \sin(\omega t - \varphi) \\ \Phi_2 &= \Phi_{m2} \sin(\omega t - \pi/2)\end{aligned}\quad (5.14)$$

возбуждают в диске, подобном вторичной обмотке трансформатора с резистивной нагрузкой, вихревые токи

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \pi/2 - \varphi) \text{ и } i_2 = I_{m2} \sin \omega t$$

и действующие на них силы

$$F_1 = k_1 \Phi_1 i_2 \text{ и } F_2 = k_2 \Phi_2 i_1,$$

где k_1 и k_2 — постоянные коэффициенты, учитывающие геометрические параметры магнитной системы.

Таким образом можно определить среднее значение вращающего момента, действующего на диск,

$$M_{\text{вр}} = \frac{2r_0}{T} \int_0^T (F_1 - F_2) dt = k_{\text{вр}} UI \cos \varphi,$$

где r_0 — радиус приложения сил; $k_{\text{вр}}$ — постоянный коэффициент, и учтены соотношения (5.14) и пропорциональные зависимости между действующими значениями магнитного потока Φ_1 и тока цепи I , магнитного потока Φ_2 и напряжения цепи U .

Выводы цепей тока и напряжения счетчика должны иметь разметку, принятую для ваттметров (см. подразд. 4.14).

5.8. МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Мостовые методы применяют для измерений значений параметров резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов. Для измерений значений параметров катушек индуктивности и конденсаторов необходимы мосты синусоидального тока. Для измерений значений сопротивлений резисторов чаще применяются мосты постоянного тока.

Мост постоянного тока. На рис. 5.16 приведена схема *четырехплечевого моста постоянного тока*. В одну диагональ моста включен источник постоянной ЭДС E , в другую с помощью ключей K_1 и K_2 — гальванометр G .

В плечо моста между узлами b и d включен резистор с неизвестным сопротивлением R_x . В остальных плечах моста находятся регулируемые резисторы — магазины образцовых сопротивле-

ний, представляющие собой набор образцовых катушек сопротивлений с бифилярной намоткой из манганиновой проволоки (см. табл. 2.1), имеющих класс точности до 0,0005.

При равновесии моста потенциалы точек b и c одинаковы ($V_b = V_c$), т. е.

$$R_1 I_1 = R_2 I_2; \quad R_x I_1 = R_3 I_2.$$

Разделив почленно первое равенство на второе, найдем значение измеряемого сопротивления:

$$R_x = R_1 R_3 / R_2. \quad (5.15)$$

Мост синусоидального тока. Схемы четырехплечевых мостов синусоидального тока весьма разнообразны. Рассмотрим простейшие из них. На рис. 5.17, a и b приведена схема *четырёхплечевого моста синусоидального тока* и его векторная диаграмма при разомкнутой цепи гальванометра. Так как треугольники напряжений правой (см. рис. 4.24, b) и левой (см. рис. 4.23, b) ветвей

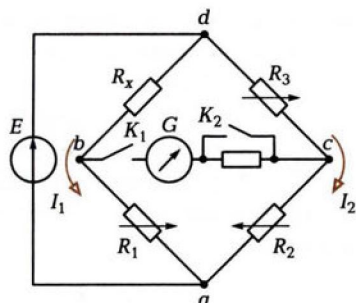


Рис. 5.16

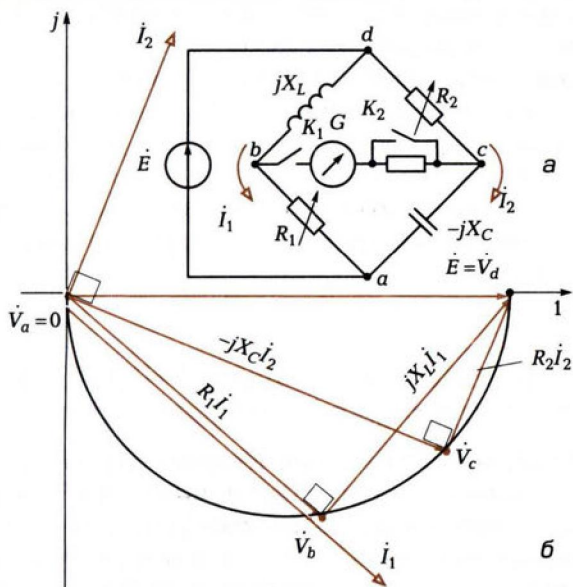


Рис. 5.17

моста прямоугольные, то концы векторов, изображающих комплексные потенциалы точек b и c , находятся на полуокружности диаметром, равным ЭДС $\dot{E} = E$ (начальная фаза ЭДС выбрана нулевой). Изменяя параметры регулируемых элементов моста, можно изменять значения потенциалов V_b и V_c . Равновесие моста ($\dot{V}_b = \dot{V}_c$) фиксируется гальванометром.

При равновесии моста из равенства треугольников напряжений следует, что

$$R_1 \dot{I}_1 = -jX_C \dot{I}_2; \quad jX_L \dot{I}_1 = R_2 \dot{I}_2.$$

Разделив почленно одно уравнение на другое и учитывая, что $X_L = \omega L$ и $X_C = 1/\omega C$, получим

$$L/R_1 = R_2 C. \quad (5.16)$$

Выражение (5.16) показывает, что мост синусоидального тока позволяет измерять параметры индуктивного или емкостного элемента, если параметры других элементов моста известны и можно пренебречь потерями в катушке и конденсаторе.

Образцовые катушки индуктивности в пределах 0,0001—1 Гн представляют собой каркас из немагнитного материала (обычно фарфора) с намотанной на него обмоткой из медной проволоки.

Образцовыми мерами переменной индуктивности служат *вариометры*, представляющие собой две последовательно соединенные катушки, одна из которых подвижная.

Образцовые меры постоянной (до 0,01 мкФ) и переменной (до 0,001 мкФ) емкостей изготавливают в виде воздушных конденсаторов, образцовые меры большей емкости — из конденсаторов, в которых в качестве диэлектрика используется слюда.

Набор образцовых катушек индуктивности и конденсаторов различных номинальных значений образуют магазины индуктивностей и емкостей.

5.9. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Компенсационный метод применяется для измерения малых ЭДС и напряжений в цепях постоянного тока, например ЭДС термопары, и градуировки электроизмерительных приборов.

Принципиальная схема цепи для измерения малых ЭДС E_x компенсационным методом показана на рис. 5.18, где $E_{н.э}$ — ЭДС *нормального элемента*, представляющего собой гальванический

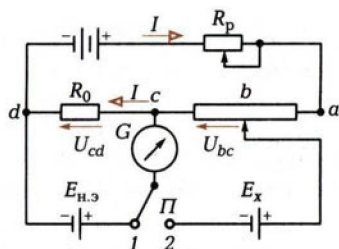


Рис. 5.18

элемент (см. рис. 2.10) с насыщенным или ненасыщенным раствором серно-кислого кадмия. Значения ЭДС насыщенных (ненасыщенных) нормальных элементов высшего класса точности 0,0005 (0,002) при 20 °С находятся в пределах 1,0185—1,0187 В (1,0188—1,0196 В) при токе не более 1 мкА. При меньшей точности ненасыщенные элементы имеют меньшее внутреннее сопротивление (около 300 Ом) и меньшую зависимость ЭДС от температуры.

Сначала производится калибровка рабочего тока. Для этого переключатель Π устанавливают в положение 1 и перемещением движка реостата R_p добиваются отсутствия тока в гальванометре G , т. е. равенства

$$U_{cd} = R_0 I = E_{н.э.}, \quad (5.17)$$

где R_0 — сопротивление образцового резистора.

Затем измеряется ЭДС E_x . Для этого переключатель Π переводится в положение 2 и вновь добиваются отсутствия тока в гальванометре перемещением движка образцового реостата, т. е. равенства

$$U_{bc} = R_{bc} I = E_x$$

или с учетом (5.17)

$$E_x = \frac{R_{bc}}{R_0} E_{н.э.},$$

где R_{bc} — сопротивление образцового реостата на участке $b—c$.

Устройства, реализующие компенсационный метод измерения, называются *потенциометрами*.

Основные достоинства потенциометров — отсутствие отбора энергии от объекта измерения и высокий класс точности (до 0,001).

Основной недостаток — измерения только в цепях постоянно-го тока малой мощности.

5.10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Электрические приборы для измерений неэлектрических величин состоят из двух основных частей: измерительного преобразователя (датчика) значения неэлектрической величины в пропорциональное значение электрической величины и средства измерения значения электрической величины. Различают параметрические и генераторные измерительные преобразователи.

Параметрические измерительные преобразователи. Такие устройства преобразуют значение измеряемой неэлектрической величины в значение параметра одного из пассивных элементов (резистивного, индуктивного, емкостного) электрической цепи. Для их работы требуется дополнительный источник электрической энергии.

В *реостатных преобразователях* используется зависимость сопротивления участка провода, длину которого определяет положение подвижного контакта, зависящее от координаты контролируемого объекта. Их применяют для преобразования неэлектрических величин (например, давления) в линейные перемещения.

В *термочувствительных преобразователях* (терморезисторах) используется зависимость сопротивления проводника или полупроводника от температуры.

По режиму работы различают преобразователи перегревные и без преднамеренного нагрева.

В преобразователях без преднамеренного нагрева ток терморезистора мал и его температура определяется температурой среды. Такие преобразователи используют для измерения температуры.

При температуре от -260 до $1\ 100$ °С применяют терморезисторы из платиновой проволоки; от -200 до 200 °С — из медной проволоки; от -60 до 120 °С — на основе полупроводников.

В перегревных преобразователях ток терморезистора вызывает его сильный нагрев. Эти преобразователи применяют для измерения скорости движения газового потока (*термоанемометры*), степени разреженности газа (*вакуумметры*), состава газовых смесей (*газоанализаторы*) и т.д.

В *индуктивных преобразователях* используется зависимость индуктивности или взаимной индуктивности катушек от координат взаимного расположения элементов магнитной цепи. Например, зависимость индуктивности катушки от линейного перемещения в ней сердечника $L(x)$ или взаимной индуктивности двух

соосно расположенных катушек от расстояния между ними $M(x)$. Для измерения индуктивных параметров преобразователя применяют мосты синусоидального тока (см. подразд. 5.8).

В емкостных преобразователях используется зависимость емкости C конденсатора (1.11) от взаимного расположения его обкладок $C = f_1(x)$ и от относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r диэлектрика между ними $C = f_2(\epsilon_r)$. Зависимость $C = f_1(x)$ применяется для измерения линейных и угловых перемещений, зависимость $C = f_2(\epsilon_r)$ — для измерения влажности вещества, толщины изделия из диэлектрика и т.д. Для измерения емкости измерительных преобразователей применяются мосты синусоидального тока (см. подразд. 5.8).

В тензометрических преобразователях используется зависимость сопротивления участка проводников (из некоторых металлов) и полупроводников от механических напряжений, возникающих, например, при их изгибах или скручивании.

Генераторные измерительные преобразователи. Такие устройства преобразуют значение измеряемой неэлектрической величины в пропорциональное значение ЭДС или электрического заряда. Их работа не требует источника электрической энергии.

Термоэлектрические преобразователи основаны на термоэлектрическом эффекте в термопаре. Термопара представляет собой два электрода из разнородных металлов, спаянных на одном конце. Если спаянные концы термопары поместить в среду повышенной температурой, то между свободными (холодными) концами термопары возникнет термоЭДС. Ее значение зависит от температуры среды, если температура холодных концов термопары поддерживается постоянной. Для примера приведем параметры широко распространенной термопары на основе материалов хромель (90 % Ni + 10 % Cr) — конпель (56 % Cu + 44 % Ni): верхний предел измеряемых температур 600 °С, значение термоЭДС 6,9 мВ при температурах спаивания 100 °С и свободных концов 0 °С.

Индукционные преобразователи основаны на законе электромагнитной индукции $e = -d\Psi/dt$ (3.18). Их применяют для измерения скорости линейных $v(t)$ и угловых $\Omega(t)$ перемещений. Если при этом мгновенные значения ЭДС $e(t)$ преобразователя проинтегрировать или продифференцировать, то полученные значения напряжения будут пропорциональны линейному и угловому перемещению или ускорению. Широкое применение индукционные преобразователи получили в приборах для измерения угловой скорости (*тахометрах*). Такие преобразователи представля-

ют собой генераторы постоянного тока (см. подразд. 8.8) мощностью до 100 Вт с независимым возбуждением от постоянных магнитов. ЭДС генератора пропорциональна угловым скоростям якоря и вращающейся части контролируемого объекта, механически связанных общим валом.

Пьезоэлектрические преобразователи основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта — образовании электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварца, сегнетоэлектрической соли и др.) под действием механических напряжений. Наибольшее распространение получили преобразователи на основе кварца, а также поляризованной керамики из титаната бария.

Пьезоэлектрические преобразователи применяют для измерений значений быстроизменяющихся неэлектрических величин (вибраций, переменных давлений и др.).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют методы и виды измерений?
2. Дайте определения абсолютной, относительной и приведенной погрешностей.
3. Что означает класс точности прибора?
4. Для какой цели применяются добавочные сопротивления и шунты?
5. Какова основная область применения мостового метода измерений?
6. Какова основная область применения компенсационного метода измерений?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Чему равна абсолютная погрешность ΔI амперметра класса точности 0,1 при номинальном значении измеряемого им тока $I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}$?
Ответ: 5 мА.
2. Необходимо измерить постоянное напряжение 15 В с абсолютной погрешностью не более $\Delta U = \pm 10 \text{ мВ}$. Выберите необходимый класс точности магнитоэлектрического вольтметра при номинальном значении измеряемого им напряжения $U_{\text{ном}} = 20 \text{ В}$.
Ответ: не ниже 0,05.