

Ярославский государственный педагогический
университет им.К.Д.Ушинского

П.Г. Штерн

Электроизмерительные приборы

Ярославль
2003

Оглавление

1. Общие сведения	3
2. Погрешности приборов	3
3. Классификация приборов	4
4. Магнитоэлектрические приборы	6
5. Электромагнитные приборы	9
6. Электродинамические приборы	11

1. Общие сведения

Измерение — это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Технические средства **электрических** измерений, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации, функционально связанных с измеряемыми физическими величинами в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, называются **электроизмерительными приборами**.

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывными функциями изменения измеряемых величин, называются **аналоговыми**. Измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме, называются **цифровыми**.

Если электроизмерительный прибор допускает только считывание показаний, то его называют **показывающим**, а если возможны и считывание, и регистрация (или только регистрация) показаний, то прибор называют **регистрирующим**.

Если показания прибора можно записать в форме диаграммы, то его называют **самопишущим**.

В практике часто применяют **интегрирующие приборы**, в которых значения измеряемой величины суммируются по времени или по другой независимой переменной. Из интегрирующих приборов всем хорошо известен счетчик электрической энергии.

Электроизмерительные приборы подразделяют на **приборы непосредственной оценки**, в которых подвижная часть измерительного механизма реагирует на значение измеряемой величины, и **приборы сравнения**, в которых измеряемая величина сравнивается с величиной, значение которой известно. Примером приборов сравнения являются измерительные мосты, потенциометры.

2. Погрешности приборов

Действительное значение измеряемой величины может отличаться от полученного из опыта значения. Это может быть обусловлено несовершенством технологии изготовления прибора, конструктивными недостатками, неправильной градуировкой, влиянием различных внешних факто-

ров.

Разность между показанием прибора X и истинным значением X_0 измеряемой величины называется **абсолютной погрешностью** измерительного прибора:

$$\Delta X = X - X_0.$$

Относительная погрешность измерения γ определяется обычно в процентах к истинному значению X_0 , но так как отклонение X от X_0 сравнительно малы, то

$$\gamma = \pm \frac{\Delta X}{X_0} \simeq \pm \frac{\Delta X}{X}.$$

Оценить качество прибора по значению абсолютной и относительной погрешностей измерений невозможно, так как X во время измерения может принимать любые значения от 0 до X_N , где X_N - нормирующее значение прибора, т.е. верхний предел его диапазона измерений или арифметическая сумма двух верхних значений диапазона (если нулевая отметка находится внутри диапазона измерений).

Поэтому было введено понятие **приведенной погрешности**.

$$\delta = \pm \frac{\Delta X}{X_N}.$$

Значение предела приведенной погрешности, выраженной в процентах:

$$\delta = \Delta X \frac{100}{X_0},$$

определяет **класс точности** прибора.

3. Классификация приборов

В соответствии с ГОСТ - 22251 - 76 "Приборы электроизмерительные. Общие технические требования" приборы классифицируются по следующим признакам.

1. По **виду измеряемой величины**, когда классификация производится по наименованию единицы измеряемой величины. На шкале

прибора пишут ее полное наименование или его начальную латинскую букву, например: амперметр — A , вольтметр — V , ваттметр — W и т.д.

Для многофункциональных приборов эти обозначения указывают около переключающих устройств и сочетают с наименованием прибора, например, вольтамперметр. К условной букве наименования прибора может быть добавлено обозначение краткости основной единицы: миллиампер — mA , киловольт — kV , мегаватт — MW и т.д.

2. По **физическому принципу действия измерительного механизма прибора**. Такая классификация определяется способом преобразования электрической величины в механическое действие подвижной части прибора (см. плакат).

3. По **роду тока**. Эта классификация позволяет определить в цепях какого тока можно применять данный прибор. Это обозначают условными знаками (см. плакат) на шкале прибора.

На приборах переменного тока указывают номинальное значение частоты, или диапазон частот, при которых их применяют, например, 20 - 50 - 120 Гц; 45 - 550 Гц; при этом подчеркнутое значение является номинальным для данного прибора.

Если на приборе не указан диапазон рабочих частот, то он предназначен для работы в установках с частотой 50 Гц.

4. По **классу точности**. Класс точности прибора обозначают цифрой, равной допускаемой приведенной погрешности δ , выраженной в процентах. Выпускают приборы следующих классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Для счетчиков активной энергии шкала классов точности несколько иная : 0,5; 1,0; 2,0; 2,5. Цифра, обозначающая класс точности, указывается на шкале прибора.

5. По **типу отсчетного устройства**. Отсчетное устройство прибора состоит из шкалы и указателя. Шкалы могут быть проградуированные в единицах измеряемой величины (в однодиапазонных приборах) , или же условные, которые имеют 75, 100 или 150 делений (в многодиапазонных приборах).

В качестве указателя применяют стрелки или световое пятно с чертой. Во избежание параллакса, вызываемого неправильным положением глаза наблюдателя относительно шкалы и стрелки, шкалу дополняют зеркалом. При измерении необходимо добиться такого положения глаза, чтобы стрелка совпала со своим отображением в зеркале.

6. По **исполнению в зависимости от условий эксплуатации**. Класс прибора определяется пятью группами по диапазону рабочих температур и относительной влажности. В пределах диапазона рабочих температур дополнительная погрешность лежит в пределах класса точности приборов.
7. По **устойчивости к механическим воздействиям** приборы подразделяются на группы в зависимости от значения максимального ускорения при тряске и вибрации.
8. По **степени защиты от внешних магнитных и электрических полей** приборы делятся на категории I и II. От воздействия внешних полей приборы защищают экранированием измерительного механизма.

4. Магнитоэлектрические приборы

Действие магнитного поля на рамку с током широко используется в различных электроизмерительных приборах.

В **магнитоэлектрических приборах** рамка с током помещается в магнитное поле подковообразного магнита. Устройство магнитоэлектрического гальванометра показано на рис. 4.1

Рамка D , состоящая из нескольких витков тонкой проволоки, помещена в цилиндрический зазор между полюсными наконечниками магнита A и сплошным железным цилиндром C , укрепленным в корпусе прибора. Благодаря влиянию железного цилиндра C линии магнитной индукции в зазоре направлены радиально, а модуль \vec{B} постоянен. При пропускании через рамку измеряемого тока I на нее действует вращающий момент

$$M = ISNB,$$

где N — число витков провода в рамке, S — площадь рамки.

4. Магнитоэлектрические приборы

Под действием момента M рамка поворачивается, закручивая пружину E на угол φ . В пределах упругой деформации угол φ пропорционален моменту M :

$$\varphi = \alpha M,$$

где α — коэффициент, зависящий от упругих свойств материала пружины и ее размеров. Таким образом, угол поворота рамки пропорционален току в рамке:

$$\varphi = \alpha SNBI = \beta I, \quad (4.1)$$

где $\beta = \alpha SNB$ — постоянная прибора, определяемая при его градуировке путем пропускания че-

рез прибор тока, сила которого известна. Угол поворота рамки φ регистрируется поворотом стрелки прибора $З$, жестко связанной с рамкой $Д$. Из выражения (4.1) видно, что шкала такого прибора равномерная.

Рамка поворачивается в противоположную сторону, если изменить направление тока в рамке. Поэтому приборы такого типа пригодны только для измерения постоянных токов. Для измерения силы тока прибор следует включить в цепь последовательно, а для измерения разности потенциалов на участке цепи — параллельно этому участку.

Магнитоэлектрический гальванометр можно использовать для измерения электрического заряда q , проходящего через поперечное сечение цепи при кратковременном токе (например, при разрядке конденсатора). Такой гальванометр называется **баллистическим**. В нем искусственно увеличен момент инерции J_0 подвижной системы. Основное уравнение динамики вращательного движения тела относительно неподвижной оси имеет вид:

$$J_0 \varepsilon = M_0^{\text{BP}},$$

где $\varepsilon = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \ddot{\varphi}$ — угловое ускорение тела, а M_0^{BP} — вращающий мо-

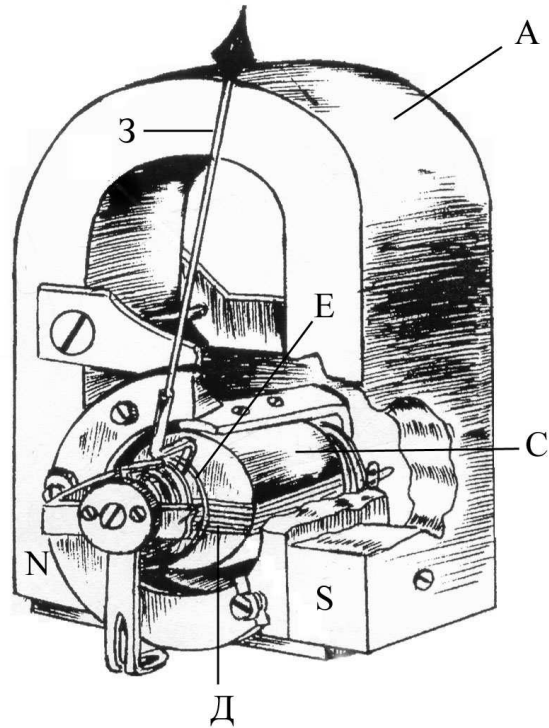


Рис. 4.1

мент относительно оси. Противодействующий момент, создаваемый пружиной:

$$M^{\text{пр}} = -M_0^{\text{БП}} = -ISNB.$$

При малых колебаниях подвижной системы можно считать, что ее уравнение движения имеет вид

$$J_0\ddot{\varphi} = -\frac{1}{\alpha}\varphi \quad \text{или} \quad \ddot{\varphi} + \frac{1}{J_0\alpha}\varphi = 0,$$

т.е. угол φ удовлетворяет дифференциальному уравнению гармонических колебаний с собственной циклической частотой ω_0 равной

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{J_0\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{J_0\alpha}}$$

и периодом колебаний

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{J_0\alpha}.$$

Отсюда следует, что при большом моменте инерции J_0 период T_0 свободных колебаний рамки гальванометра сравнительно велик. Пусть τ — малое время прохождения тока через гальванометр ($\tau \ll T_0$). Импульс момента сил, действующих на рамку при прохождении кратковременного тока I , равен

$$\int_0^{\tau} M_0^{\text{БП}} dt = \int_0^{\tau} ISNB dt = SNB \int_0^{\tau} I dt.$$

Так как $I dt = dq$, то $\int_0^{\tau} I dt = \int_0^q dq$ и, следовательно, $\int_0^{\tau} M_0^{\text{БП}} dt = SNBq$, где q — искомый электрический заряд, прошедший через рамку гальванометра.

Поскольку $\tau \ll T_0$, то можно считать, что за время τ рамка практически не успевает выйти из положения равновесия, а лишь приобретает начальный момент импульса $L_0 = J_0\omega_0$. Из соотношения $\frac{dL}{dt} = M$ имеем

$$J_0\omega_0 = \int_0^{\tau} M_0^{\text{БП}} dt = SNBq,$$

где ω_0 — угловая скорость, приобретенная подвижной системой гальванометра за время τ . Отсюда получим

$$\omega_0^2 = \left(\frac{SNBq}{J_0} \right)^2.$$

Начальная кинетическая энергия, приобретенная подвижной системой гальванометра в результате прохождения заряда q через рамку, равна

$$W_{k0} = \frac{J_0 \omega_0^2}{2} = \frac{(SNB)^2}{2J_0} \cdot q^2.$$

В дальнейшем при движении рамки происходит закручивание пружины E (рис. 4.1), сопровождающееся переходом кинетической энергии подвижной системы в потенциальную энергию упругодеформированной пружины, равную $W_n = \int_0^\varphi M_0^{\text{вп}} d\varphi$. Учитывая, что $M_0^{\text{вп}} = \frac{\varphi}{\alpha}$, получаем

$$W_n = \int_0^\varphi \frac{\varphi d\varphi}{\alpha} = \frac{\varphi^2}{2\alpha},$$

т.е. энергия W_n пропорциональна квадрату деформации φ .

При максимальном угле φ_0 отклонения подвижной системы вся ее начальная кинетическая энергия переходит в потенциальную, поэтому

$$\frac{(SNB)^2}{2J_0} \cdot q^2 = \frac{\varphi_0^2}{2\alpha}, \quad \text{откуда} \quad q = C_0 \varphi_0, \quad (4.2)$$

где $C_0 = \frac{1}{SNB} \sqrt{\frac{J_0}{\alpha}}$ — постоянная прибора.

Формула (4.2) показывает, что заряд, прошедший через баллистический гальванометр, пропорционален максимальному углу отклонения φ_0 подвижной системы гальванометра из положения равновесия.

5. Электромагнитные приборы

Электромагнитные приборы действуют по принципу перемещения подвижного сердечника из ферромагнитного материала под влиянием магнитного поля неподвижной катушки. Сердечник укреплен на одной оси со

стрелкой указателя (см. рис. 5.1). Лепесток 2 из ферромагнитного материала (мягкой стали или специального сплава) эксцентрично насаженный на ось со стрелкой, втягивается магнитным полем неподвижной катушки 1, которое образуется током, проходящим по ее обмотке.

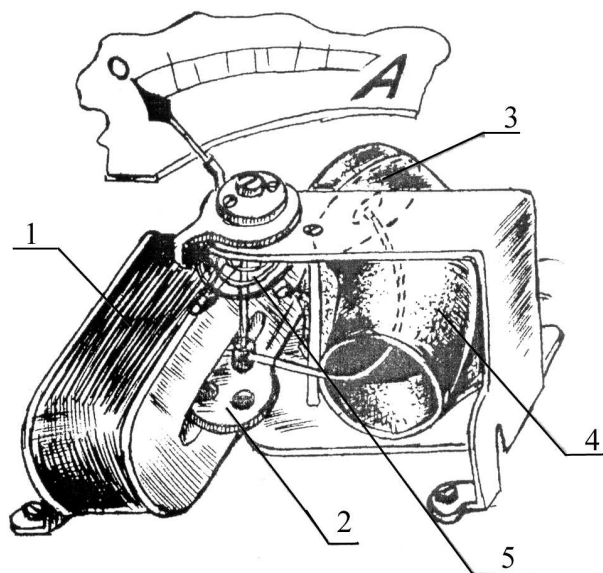


Рис. 5.1

Вращающий момент в электромагнитных приборах может быть определен исходя из измерения энергии магнитного поля катушки прибора при изменении в ней тока I и ее индуктивности L при перемещении сердечника. Как известно, энергия магнитного поля

$$W_m = \frac{LI^2}{2},$$

а потенциальная энергия упругодеформированной пружины, обусловленная поворотом сердечника на угол φ ,

$$W_n = M_{вр}\varphi.$$

При вращении сердечника, а, следовательно, и оси

$$M_{вр}d\varphi = \frac{I^2 dL}{2},$$

откуда

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

В режиме установившегося отклонения при создании противодействующего момента пружиной $M_{пр} = M_{вр}$, т.е. с учетом того, что $M_{пр} = \alpha\varphi$, получим

$$\alpha\varphi = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\varphi},$$

откуда

$$\varphi = \frac{1}{2\alpha} I^2 \frac{dL}{d\varphi}.$$

Из полученного выражения видно, что знак угла отклонения стрелки прибора не зависит направления тока в катушке. Следовательно, приборы пригодны для измерения в цепях постоянного и переменного токов. В цепи переменного тока они измеряют **действующее** значение тока или напряжения.

6. Электродинамические приборы

В электродинамических приборах (см. рис. 6.1) магнитное поле, действующее на рамку с током 2, создается соленоидом 1. Ось вращения рамки с током, помещенной внутри соленоида, перпендикулярна его оси. В отсутствие тока плоскость рамки параллельна оси соленоида. Соленоид и рамка включаются последовательно, так что по ним проходит один и тот же ток I . Вращающий момент $M_{\text{вр}}$, действующий на рамку, можно определить по формуле

$$M_{\text{вр}} = IS_1 N_1 B_2 \sin \beta = IS_1 N_1 B_2 \cos \varphi,$$

где N_1 — число витков провода в рамке; S_1 — площадь витка;

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2}\right) - \varphi \quad \text{— угол между осью соленоида и нормалью к плоскости}$$

рамки;

φ — угол поворота рамки из положения равновесия;

$B_2 = \mu_0 n_2 I$ — магнитная индукция поля соленоида, содержащего n_2 витков на единицу длины.

Так как $M_{\text{вр}} = \frac{\varphi}{\alpha}$, то угол поворота подвижной системы равен

$$\varphi = \alpha S_1 N_1 \mu_0 n_2 I^2 \cos \varphi.$$

Так как обычно угол φ небольшой, то

$$\cos \varphi \approx 1 \quad \text{и} \quad \varphi \approx \gamma I^2,$$

где $\gamma = \alpha S_1 N_1 n_2 \mu_0$ — постоянная прибора.

Электродинамический гальванометр неудобен тем, что вследствие квадратичной зависимости угла поворота стрелки от силы тока в рамке его шкалу нельзя сделать равномерной. Зато гальванометр такого типа пригоден для измерения как постоянных, так и переменных токов.

Электродинамический гальванометр можно использовать для измерения мощности, развиваемой электрическим током на пассивном участке цепи. Для этого обмотку соленоида следует включить параллельно участку цепи, а обмотку рамки — последовательно. Тогда ток I_2 в соленоиде и индукция B_2 его магнитного поля пропорциональны не силе тока I в цепи, а напряжению U на рассматриваемом участке:

$$B_2 = \mu_0 n_2 I_2 = \mu_0 n_2 \frac{U}{R_2},$$

где R_2 — сопротивление цепи соленоида. Следовательно

$$\varphi = \frac{\gamma UI}{R_2} = \gamma' UI,$$

где $\gamma' = \frac{\gamma}{R_2}$, а $U \cdot I$ — измеряемая мощность тока.

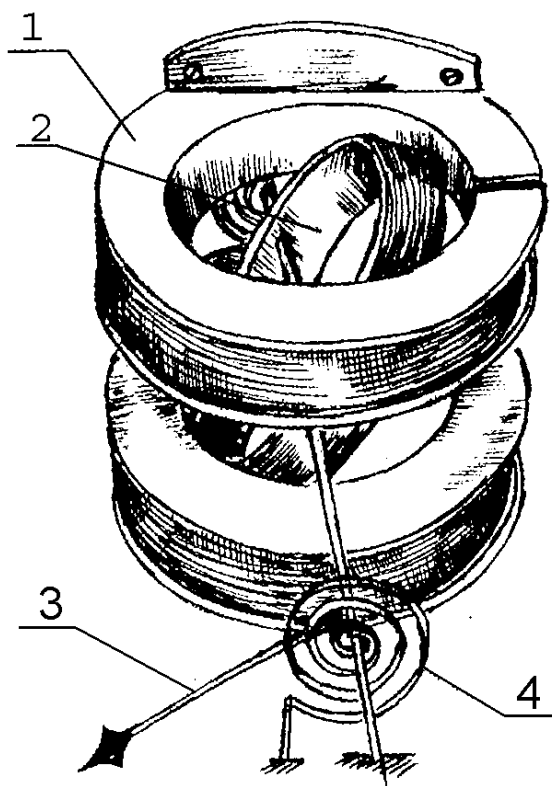


Рис. 6.1