

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Для количественного измерения электрических (q , I , U , ...) и магнитных (B , Φ , L , ...) величин применяются различные электроизмерительные приборы: гальванометры G , амперметры A , вольтметры V и др., а также комбинации этих приборов в различных измерительных схемах.

Измеряют электрические величины по различным их проявлениям и воздействиям: а) механическим; например, разность потенциалов между двумя пластинами может быть измерена по силе их взаимного притяжения; б) химическим; например, количество протекшего электричества может быть измерено по весу выделившегося на электродах вещества; в) тепловым—по нагреву проводника и т. д. Измерение одной величины можно часто заменить измерением другой, с ней связанный. Например, зная сопротивление участка цепи и измерив вольтметром падение напряжения, можно найти величину тока по закону Ома. Измерение может быть абсолютным (измерение q электрометром) или сравнительным (измерение R мостовой схемой). Как правило, всякое измерение в конечном счете сводят к измерению перемещения стрелки или луча света («зайчика») по шкале.

Измерительная аппаратура разделяется на меру (эталоны сопротивления, электродвигущей силы, емкости и т. д.) и измерительный прибор, сравнивающий измеряемую величину с единицей ее измерения. Сам измеритель заключен обычно в корпус, предохраняющий его от механических повреждений. Вспомогательные детали могут находиться вне корпуса.

Приборы разделяются: а) по характеру замера—на приборы с непосредственным отсчетом и самозаписывающие; б) по условиям работы—на стационарные, переносные и транспортные; в) по точности—на классы 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2; цифра класса, наносимая на шкалу прибора, дает процент погрешности от номинального предела измерения; г) по принципу работы—

Обозначения систем
электроизмерительных приборов

Система	Условные обозначения
Магнитоэлектрическая	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Тепловая	

магнитоэлектрические, электромагнитные, тепловые, электродинамические и т. д. Символ, указывающий принцип действия прибора, также наносится на его шкалу (см. таблицу этих символов на стр. 353). На шкалу, кроме того, наносятся и другие характеристики прибора: род тока—постоянный (—) или переменный (\circlearrowleft); установка прибора—вертикально (\downarrow), горизонтально (\rightarrow) или под углом ($\angle 60^\circ$); пробивное напряжение изоляции ($\sqrt{2} \text{ кв}$) и т. д.

1. Магнитоэлектрические приборы

В лабораториях наиболее употребительными являются магнитоэлектрические приборы, основанные на действии постоянного магнита на катушку, через которую идет измеряемый ток. Основным магнитоэлектрическим прибором является гальванометр—высокочувствительный прибор, служащий для измерения слабых токов и других электрических величин.

На рис. П. 1 изображена схема стрелочного гальванометра. Катушка (рамка) K из тонкой проволоки может вращаться между полюсами постоянного магнита. Для усиления магнитного поля внутри расположен железный сердечник C_p . При пропускании тока через катушку она стремится установиться по полю.

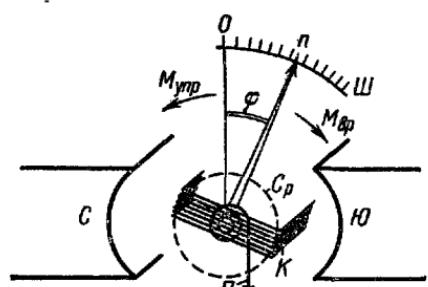


Рис. П. 1.

Вращающий момент $M_{\text{вр}}$ зависит от угла ϕ и равен $M_{\text{вр}} = k_1 I$, где коэффициент k_1 зависит от размеров катушки, числа витков, материала и т. д. Вращающий момент $M_{\text{упр}}$ создается пружиной P и равен $M_{\text{упр}} = k_2 \phi$, где коэффициент k_2 зависит от размеров и материала пружины.

При равновесии

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{упр}},$$

т. е.

$$k_1 I = k_2 \phi \quad \text{и} \quad I \sim \phi \sim n, \quad (\text{П. 1})$$

где n —число делений, отмечаемое стрелкой на пропорциональной шкале $Ш$. Как видно из соотношения (П. 1), шкала магнитоэлектрического гальванометра равномерная.

Следовательно,

$$I = Cn, \quad \text{или} \quad n = SI.$$

Зависящий от параметров прибора коэффициент пропорциональности C называется постоянной прибора. Обратная ему величина $S = 1/C$ называется чувствительностью прибора. Обычно постоянная гальванометра имеет порядок величины $C \approx 10^{-7} \text{ а/дел}$.

Для увеличения чувствительности гальванометра облегчают его подвижную часть и заменяют спиральную пружину упругой закручивающейся нитью, на которой подвешивают маленькую катушку, так называемую рамку. Схема подобного зеркального гальванометра изображена на рис. П. 2. Для регистрации угла закручивания нити Φ к ней при-

крепляют маленькое зеркальце З. Луч света от источника И падает на зеркальце и, отражаясь, попадает на прозрачную шкалу, расположенную на некотором расстоянии от прибора. При повороте зеркальца световой «зайчик» перемещается на соответствующее число делений по шкале. Деления обычно измеряются в мм при расстоянии от шкалы до зеркальца в 1 м.

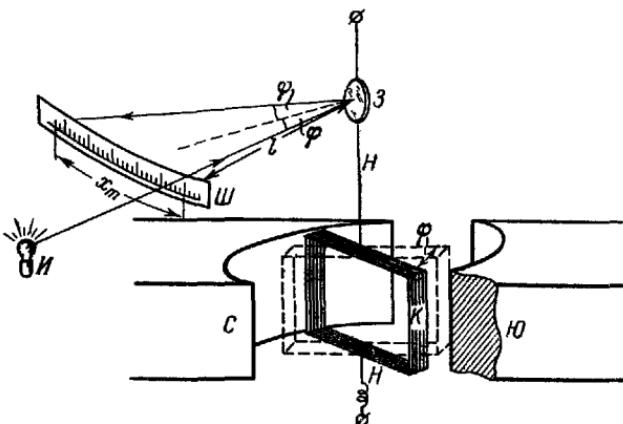


Рис. П. 2.

В соответствии с высокой чувствительностью постоянная зеркального гальванометра достигает $C \approx 10^{-11} \frac{a}{\text{мм}/\text{м}}$. Если столь малый ток $I = 10^{-11} \text{ а}$ измерять электрохимически, то для выделения на электроде 1 мг серебра пришлось бы ожидать около 3000 лет.

Прикрепляя к рамочке дополнительные грузики (рис. П. 3) и увеличивая тем самым ее момент инерции J , можно превратить зеркальный гальванометр в так называемый баллистический гальванометр и измерять с его помощью кратковременные импульсы тока. Если ток I проходит через рамку в течение короткого промежутка времени Δt , то прошедший заряд $q = I \Delta t \sim M_{\text{вр}} \Delta t$, т. е. пропорционален импульсу момента сил, действующих при этом на рамку. Из законов механики следует, что этот импульс равен приращению момента количества движения рамки, т. е.

$$M_{\text{вр}} \Delta t = J(\omega - 0),$$

где ω — угловая скорость вращения, приобретенная рамкой к концу этого промежутка. В результате толчка рамка приобретает кинетическую энергию вращения $J\omega^2/2$ и начинает закручивать нить. При этом совершается работа против сил упругости, и через некоторое время, обычно через 5—10 сек, рамка останавливается, повернувшись на некоторый угол Φ . В этот момент вся кинетическая энергия, накопленная рамкой при толчке, перейдет в потенциальную энергию упругой деформации нити, т. е.

$$\frac{J\omega^2}{2} = \frac{k\Phi^2}{2},$$

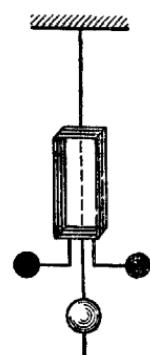


Рис. П. 3.

где $k = \frac{M_{\text{упр}}}{\varphi}$ — коэффициент упругости нити. Отсюда $\varphi \sim \omega$, и из последовательных соотношений

$$q = I \Delta t \sim M_{\text{вр}} \Delta t \sim \omega \sim \varphi \sim n_{\text{макс}}$$

следует, что прошедший заряд q прямо пропорционален максимальному отбросу «зайчика», т. е.

$$q = C_6 n_{\text{макс}}. \quad (\text{П.2})$$

Величина C_6 носит название баллистической постоянной гальванометра и обычно имеет порядок $10^{-9} \frac{\text{кН}}{\text{мм}/\text{м}}$.

После остановки нить начнет раскручиваться, и рамка станет совершать колебания, которые вследствие трения будут затухающими. Для успокоения (демпфирования) колебаний рамку замыкают накоротко, и в ней возникают индукционные токи, резко тормозящие ее движение.

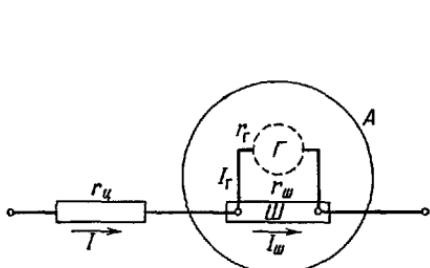


Рис. П. 4.

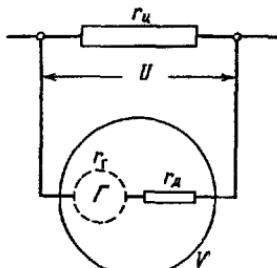


Рис. П. 5.

Рамка гальванометра наматывается из тонкой проволоки, и через нее нельзя пропускать большие токи. Поэтому гальванометр нельзя включить в обычную цепь постоянного тока во избежание пережога рамки.

Для измерения тока I в цепи применяют амперметры, представляющие собой соединение гальванометра с включенным параллельно ему малым сопротивлением, так называемым шунтом, как показано на рис. П.4. При разветвлении большая часть тока $I_{\text{ш}}$ течет через шунт и лишь небольшая доля $I_{\text{г}}$ — через гальванометр. Так как $r_{\text{ш}} \ll r_{\text{г}}$, то из соотношений

$$I_{\text{г}} r_{\text{г}} = I_{\text{ш}} r_{\text{ш}} = (I - I_{\text{г}}) r_{\text{ш}},$$

полученных на основании законов Кирхгофа, следует:

$$I_{\text{г}} = I \frac{r_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}} + r_{\text{г}}} \ll I. \quad (\text{П.3})$$

Ток в гальванометре $I_{\text{г}}$ много меньше тока в цепи I , но прямо пропорционален последнему. Пользуясь этой пропорциональностью, можно отградуировать шкалу гальванометра непосредственно на значения тока в цепи.

При измерениях амперметр включается в цепь последовательно. Во избежание пережога нельзя включать его накоротко с источниками тока. Для уменьшения потерь мощности в амперметре его сопротивление $r_{\text{г}} = r_{\text{г}} r_{\text{ш}} / (r_{\text{г}} + r_{\text{ш}})$ должно быть мало по сравнению с сопротивлением цепи $r_{\text{ц}}$.

В многошкальных амперметрах имеется набор шунтов, которые могут переключаться в зависимости от величины измеряемых токов.

Включая последовательно с гальванометром очень большое добавочное сопротивление $r_d \gg r_g$, можно уменьшить проходящий через прибор ток и использовать прибор как вольтметр. Вольтметр включается параллельно участку цепи, на котором измеряется падение напряжения U , как это показано на схеме рис. П.5. По закону Ома ток, идущий через вольтметр (а значит, и через гальванометр):

$$I_v = \frac{U}{r_v} = \frac{U}{r_d + r_g} \ll \frac{U}{r_g}, \quad (\text{П.4})$$

прямо пропорционален падению напряжения U на участке цепи. Пользуясь этой пропорциональностью, можно отградуировать шкалу гальванометра непосредственно на значения U .

Чтобы включение вольтметра не искажало существенно распределения потенциала в цепи, необходимо, чтобы сопротивление вольтметра во много раз превышало сопротивление участка цепи, $r_v \gg r_u$. Тогда суммарное сопротивление при параллельном включении

$$r_{\text{сумм}} = \frac{r_v r_u}{r_v + r_u} \approx r_u$$

практически не меняется при включении вольтметра.

В многошкальных вольтметрах имеется набор сопротивлений, которые могут переключаться в зависимости от измеряемых напряжений.

2. Другие системы электроизмерительных приборов

Приборы магнитоэлектрической системы обладают высокой чувствительностью, но пригодны лишь для измерения постоянных токов. В связи с этим в измерительной технике применяется ряд других систем приборов, пригодных для измерения как постоянных, так и переменных токов. Остановимся на некоторых из них.

На рис. П.6 изображена схема прибора электромагнитной системы. Когда через катушку K проходит ток I , то в ней возникает магнитное поле, которое втягивает в катушку железный сердечник C , подвешенный на пружине.

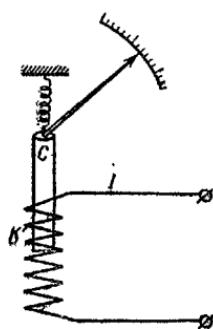


Рис. П. 6.

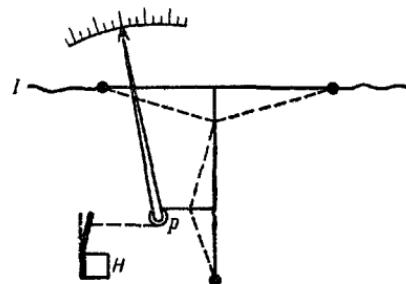


Рис. П. 7.

Чем больше ток, тем большее растяжение пружины и поворот связанной с нею стрелки. Конструктивно эти приборы обычно оформляются так: сердечник делается фигурным и поворачивается вместе со стрелкой вокруг неподвижной оси, а пружина является спиральной, как в магнитоэлектрическом гальванометре.

По катушке прибора могут непосредственно пропускаться большие токи. В зависимости от характера тока—постоянного или переменного—градуировка шкалы будет различной.

На рис. П.7 изображена схема теплового прибора. Ток I , идущий по проводнику, разогревает его, и проводник удлиняется. Через систему «рычагов» это перемещение передается одному концу нити H , намотанной на ролик P . При этом другой конец нити оттягивается пластинчатой пружиной, и катушка поворачивается, вращая вместе с собой стрелку. Так как выделяющееся тепло и разогрев нити по закону Джоуля—Ленца пропорциональны I^2 , то шкала теплового амперметра не является равномерной. Приборы этой системы служат для грубых измерений, так как обладают большой тепловой инерцией (проводник с током разогревается и охлаждается постепенно).

В приборах электродинамической системы используется взаимодействие двух катушек, по которым идет ток. На рис. П.8 изображен электродинамический ваттметр W . Первая большая катушка с малым сопротивлением включена в цепь последовательно. По этой катушке идет

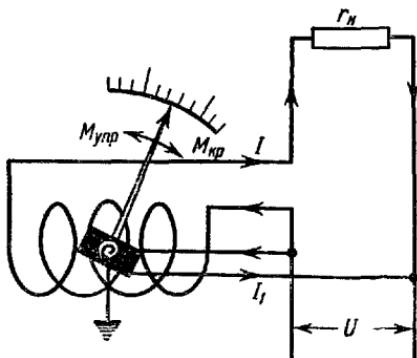


Рис. П. 8

такой же ток I , как в измеряемой цепи; он создает в катушке магнитное поле с индукцией B , пропорциональной току I . Внутри этой катушки на перпендикулярной к ней оси помещается вторая катушка с большим сопротивлением, которая включается, как вольтметр.

Ток в этой катушке I_1 пропорционален падению напряжения U . Магнитное поле первой катушки будет действовать на вторую катушку с крутящим моментом, пропорциональным магнитной индукции B и току во второй катушке I_1 , т. е. $M_{kp} \sim BI_1$; так как $B \sim I$, а $I_1 \sim U$, то $M_{kp} \sim IU$.

Поворачиваясь, вторая катушка растягивает спиральную пружину, и крутящий момент уравновешивается моментом упругих сил. Тогда угол поворота катушки и связанной с нею стрелки:

$$\varphi \sim M_{upr} = M_{kp} \sim IU, \quad (П.5)$$

оказывается пропорциональной произведению IU , т. е. мощности, выделяемой током в цепи.

Существует ряд других, менее употребительных систем электроизмерительных приборов, на которых мы не останавливаемся. Измерения некоторых величин требуют составления специальных измерительных схем, содержащих, в частности, различные электронные лампы.

3. Реостаты, потенциометры, мосты

Для изменения тока в цепи в нее включают последовательно переменное сопротивление — так называемый реостат. Реостат представляет собой голый металлический провод определенного сечения, намотанный на жесткий каркас. Параллельно этой катушке, как показано на рис. П.9, расположен металлический пруток, по которому передвигается

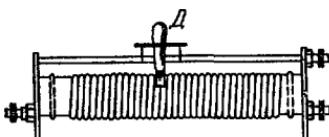


Рис. П. 9.

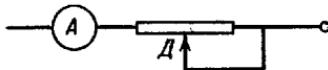


Рис. П. 10.

скользящий контакт (так называемый движок D). В зависимости от положения движка ток проходит через часть основного провода, сопротивление которого пропорционально его длине.

Схема включения реостата в цепь показана на рис. П.10. На корпусе реостата указываются его полное сопротивление и максимальный допустимый ток.

Для подбора различных сопротивлений в широком интервале применяются так называемые магазины сопротивлений. На рис. П.11

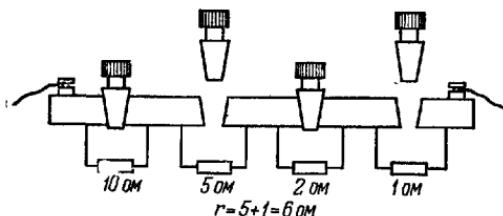


Рис. П. 11.

изображен штепсельный магазин сопротивлений, состоящий из толстых медных пластин ничтожно малого сопротивления со сквозными прорезями. Между прорезями включены катушки с точно подобранными сопротивлениями. Вставляя в прорези специальные штепсели, можно закорачивать эти катушки и выключать их из цепи. Сопротивление такого магазина равно сумме сопротивлений незакороченных катушек, т. е. определяется тем, какие штепсели вынуты из своих гнезд.

В рычажных магазинах сопротивлений катушки соединяются последовательно в группы одинаковых сопротивлений (1 ом , 10 ом , 100 ом и т. д.), и от каждой катушки делается отдельный отвод. Передвигая рычаг на каждой декаде, как показано на рис. П.12, можно включить в цепь необходимое суммарное сопротивление.

Для деления напряжения используются все три зажима реостата, и последний включается по схеме потенциометра, изображенной на рис. П.13. Полное сопротивление потенциометра r_p включается последовательно с источником напряжения. Чтобы потенциометр не нагревался, по нему должен идти слабый ток и его сопротивление должно быть много больше внутреннего сопротивления источника r . Если в цепи у потребителя необходимо иметь не полное напряжение источника E , а некоторую его долю U , то цепь включают между одной из крайних точек и движком.

Чтобы включение потребителя не искажало распределения падения напряжения на потенциометре, сопротивление цепи должно быть большим:

$$r_{\text{ц}} \gg r_{\text{п}} \gg r. \quad (\text{П 6})$$

Только при соблюдении этого условия напряжение у потребителя U будет прямо пропорционально длине участка потенциометра до движка.

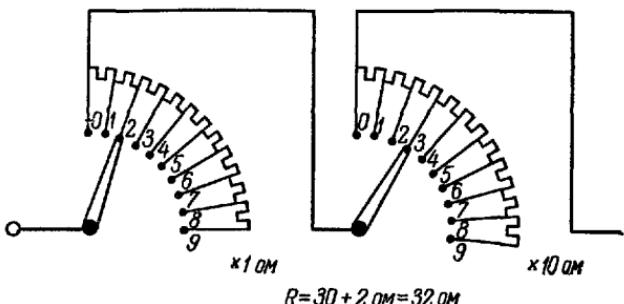


Рис. П. 12

Для измерения сопротивлений проводников применяют различные мостовые схемы. На рис. П. 14 изображен простейший мостик

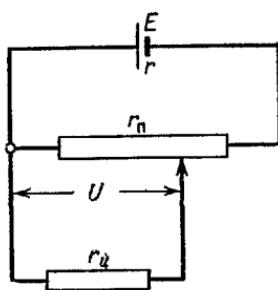


Рис. П. 13.

Уントона с реохордом. Реохорд представляет собой калиброванную проволоку, сопротивление которой прямо пропорционально ее длине. Параллельно реохорду включается измеряемое сопротивление r_x и эталонное r_0 . В одну из диагоналей моста включается источник тока E , а в другую — гальванометр и движок. Перемещая движок вдоль реохорда, добиваются отсутствия тока в гальванометре ($I_g = 0$). В этом случае потенциалы точек A и B схемы одинаковы и падения напряжения на последовательных участках прямо пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{r_x}{r_0},$$

Отсюда находится искомое сопротивление

$$r_x = r_0 \frac{r_1}{r_2} = r_0 \frac{l_1}{l_2},$$

В магазинных мостиках сопротивления r_1 и r_2 остаются постоянными, а вместо сопротивления r_0 включается магазин сопротивлений.

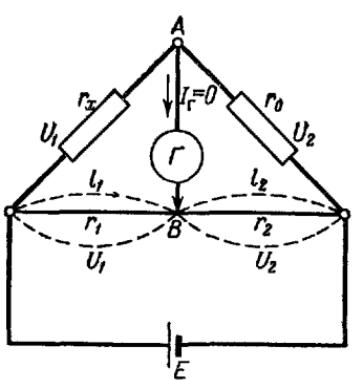


Рис. П. 14

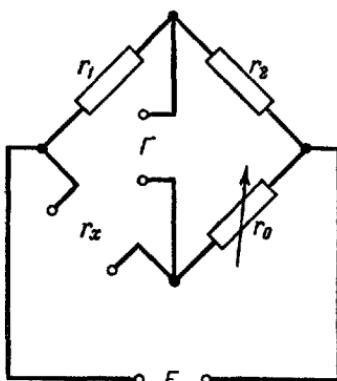


Рис. П. 15.

Схема магазинного мостика с указанием точек включения батареи, гальванометра и искомого сопротивления приведена на рис. П. 15.