

этому в той цепи, в которой измеряется сила тока, кроме постоянного балластного сопротивления  $R_x$  имеются еще переменное сопротивление  $R$  и миллиамперметр. Переменное сопротивление позволяет устанавливать последовательно по этапам различные значения силы тока, текущего через миллиамперметр, постепенно проходя всю его шкалу. Каждое установленное значение силы тока измеряется компенсационным методом.

По результатам работы следует построить калибровочный график миллиамперметра, выражающий зависимость показаний этого прибора от силы протекающего через него тока. На основании этого графика надо найти среднее значение цены деления шкалы прибора, выраженное в миллиамперах.

### Упражнение 3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Компенсационный метод измерения сопротивлений является дальнейшим развитием описанного выше метода измерения силы тока.

Пусть мы хотим найти значение балластного сопротивления  $R_x$  в нашей схеме рис. 3. Так как это сопротивление включено последовательно с  $R$ , то через оба сопротивления идет ток одной и той же силы. Исходя из этого, легко написать, что  $U_N = IR_N$  и  $U_x = IR_x$ , где  $U_N$  и  $U_x$  — соответственно значения падений напряжения на эталонном и балластном сопротивлениях. Следовательно, если мы измерим тем же компенсационным методом величины  $U_N$  и  $U_x$ , то, зная  $R_N$ , мы можем найти

$$R_x = R_N \frac{U_x}{U_N}$$

Для этого надо к клеммам перекидного рубильника 1 и 2 (см. рис. 2) присоединить поочередно провода от клемм балластного и эталонного сопротивлений (см. рис. 3) и обычным путем измерить с помощью компенсационной схемы величины  $U_x$  и  $U_N$ . Измерения надо сделать при нескольких значениях силы тока в цепи, варьируя в ней сопротивление  $R$  так же, как это делалось при градуировке миллиамперметра. Измерения надо начинать всегда при разомкнутом и заканчивать при замкнутом ключе  $S_2$  (см. рис. 2). В конце работы надо оценить точность сделанных измерений сопротивления.

В заключение необходимо отметить особые преимущества компенсационного метода измерения сопротивлений перед другими способами. При этом способе измерений на результате не сказывается сопротивление подводящих проводов. Существенно также и то, что значение силы тока, идущего через измеряемое и эталонное сопротивления, также никак не входит в конечный результат. Сила тока может иметь совершенно произвольное значение в пределах нагрузок, допустимых для сопротивлений данной конструкции. Кроме того, сила тока должна быть постоянна только в течение времени, достаточного для измерения величин  $U_N$  и  $U_x$ .

Как показывает ближайшее рассмотрение, компенсационный метод позволяет также полностью исключать влияние паразитных термоэлектродвижущих сил, легко возникающих во всех контактах цепи. Для этого требуется лишь добавление в схему специальных инверсионных переключателей у источников электродвижущих сил, включенных в схему. В настоящей работе мы ими не пользовались, чтобы не затруднять понимание принципиальной стороны.

Компенсационный метод является основным точным лабораторным приемом измерения сопротивлений и используется, в частности, для обслуживания таких важных приборов для измерения температуры, как термометры сопротивления. Метод позволяет при наилучших условиях измерений доводить их точность до сотых долей процента измеряемой величины.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему метод, используемый при измерениях в данной работе, называется компенсационным?
2. Какими существенными достоинствами обладает данный метод в сравнении с другими?
3. Нарисовать электрическую схему измерительной установки. Объяснить порядок действий, выполняемых при измерениях.
4. В чем состоит назначение двойного ключа  $S_1$ ?
5. Каким образом в схеме устанавливается нужное значение рабочего тока?
6. С какой целью общее сопротивление в цепи вспомогательной батареи поддерживается постоянным?
7. Какова точность выполненных измерений? Какие факторы ее ограничивают?

### Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

### Лабораторная работа 5

#### ГАЛЬВАНОМЕТР МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Изучаются устройство и принцип действия гальванометра магнитоэлектрической системы, измеряются его параметры: чувствительность по току и напряжению, период свободных колебаний рамки гальванометра, величина внешнего критического сопротивления, декремент затухания колебаний рамки.

Устройство и принцип действия гальванометра. Гальванометры — приборы, служащие для измерения слабых электрических токов — подразделяются по своей конструкции на две основные группы: 1) с подвижной катушкой, обтекаемой током и вращающейся в поле неподвижного магнита или электромагнита; 2) с подвижным магнитом и неподвижной катушкой.

Для измерения силы тока как в тех, так и в других приборах используется вращение подвижной системы, отклоняющейся от некоторого положения равновесия под влиянием взаимодействия тока и магнита. При точных измерениях применяются исключительно гальванометры первого типа.

Подвижная система такого гальванометра представляет собой в большинстве случаев четырехугольную рамку, составленную из плотно уложенных и склеенных изолирующим лаком четырехугольных витков изолированной тонкой проволоки сечением в несколько сотых миллиметра. Эффективное поперечное сечение такой катушки, пронизываемое линиями сил магнитного поля, составляет  $nQ$ , где  $n$  — число витков рамки,  $Q$  — площадь сечения отдельного прямоугольного витка проволоки. Число витков в такой катушке бывает от нескольких десятков до сотни. Нить  $E$  с укрепленным на ней легким зеркальцем  $M$  (рис. 1, а) служит подвесом для рамки  $C$ . Рамка может свободно вращаться в зазоре, образуемом двумя полюсами постоянного магнита  $NS$  и цилиндром  $L$  из мягкого железа. В этом случае магнитное поле в воздушном промежутке почти радиально.

Нитью подвеса служит тонкая металлическая (платиновая) проволока или бронзовая ленточка сечением в несколько микрон, или тонкая кварцевая нить, иногда платинированная по поверхности. Вторым подводом тока к катушке служит обычно металлическая серебряная или золотая ленточка толщиной в несколько десятых микрона. В гальванометрах с кварцевым подвесом обычно оба подвода тока к рамке выполняются в виде таких ленточек, соединенных с обмоткой рамки (катушки) гальванометра в нижней ее части. Подводы тока к подвижной системе гальванометра не должны оказывать упругого сопротивления вращению подвижной системы. Таким образом, моментом упругих сил, действующим на рамку, является только крутящий момент нити подвеса.

Перед началом работы гальванометр должен быть правильно установлен, что достигается вращением трех установочных винтов, на которые опирается корпус прибора. Это значит, что подвижная система гальванометра, удерживаемая в фиксированном положении до начала работы специальным приспособлением (арретиром), должна после освобождения арретира свободно двигаться между полюсами магнита, не касаясь их при вращении. Малость зазора между полюсами магнита и центральным цилиндром требует весьма точной установки прибора.

Для правильной установки некоторые системы гальванометров снабжены уровнями. В других системах гальванометров в корпусе прибора установлено специальное наклонное зеркальце, которое облегчает наблюдения положения рамки относительно полюсов магнита.

Приборы первого типа устанавливаются по уровню при арретированной подвижной системе. Приборы второго типа устанавливаются при освобожденной подвижной системе. Арретир приводится в движение специальным рычажком или головкой винта, вы-

веденной где-либо из корпуса гальванометра и снабженной надписью.

Освобождение и закрепление подвижной системы гальванометра перед работой прибора (или по окончании ее) следует производить с большой осторожностью, так как толчки подвижной системы гальванометра, подхватываемой вилкой арретира, передаются непосредственно тонкой нити подвеса. Студентам выполнять самостоятельно эту операцию в практикуме не рекомендуется.

Верхний конец нити подвеса закреплен во вращающейся головке (обозначенной на корпусе прибора надписью «корректор нуля»), выведенной на верхнюю часть корпуса гальванометра. Вращением этой головки можно поворачивать подвижную систему гальванометра для установки ее в нулевое положение между полюсами магнита. Операция поворота рамки (катушки) гальванометра требует тех же предосторожностей, что и освобождение арретира прибора. Необходимо при этом иметь в виду, что при вращении головки корректора нуля рамка следует за вращением головки с запаздыванием, так как передача крутящего момента к рамке осуществляется через нить подвеса. Поэтому, повернув корректор нуля на небольшой угол, следует всякий раз выждать, пока подвижная система прибора установится в новое положение. Только таким прерывистым вращением корректора нуля можно привести подвижную систему в нужное положение между полюсами магнита. В практикуме эти операции производятся также не студентами, а лаборантами.

Измерение силы тока основано на наблюдении углов поворота  $\alpha$  рамки  $C$ . При протекании тока через обмотку рамки последняя испытывает вращающий момент сил, действующих на ток в магнитном поле. Как известно, при этом рамка стремится расположиться так, чтобы магнитный момент протекающего по ней тока был направлен вдоль внешнего магнитного поля.

При установившемся отклонении рамки имеет место равенство моментов сил, действующих на рамку со стороны магнитного поля, и крутящего упругого момента нити подвеса:

$$BnQI = D\alpha_k, \quad (1)$$

где  $B$  есть индукция магнитного поля в воздушном промежутке,  $Q$  — площадь витка,  $n$  — число витков,  $D$  — момент сил кручения на единицу угла поворота, а  $I$  — сила тока, протекающего по виткам и сообщающего рамке угловое отклонение  $\alpha_k$ . Отсюда

$$I = C\alpha_k = \frac{1}{S_I} \alpha_k, \quad \text{где } C = \frac{D}{BnQ}$$

есть динамическая постоянная прибора, выражающая численно силу тока, отклоняющую подвижную часть прибора на угол  $\alpha = 1$ .

$$S_I = \frac{1}{C} = \frac{BnQ}{D} \quad (2)$$

называется токовой чувствительностью гальванометра.

Вольтовая чувствительность гальванометра  $S_U$  определяется соотношением

$$S_U = \frac{S_I}{R} = \frac{BnQ}{RD},$$

где  $R$  — сопротивление обмотки рамки гальванометра.

Из выражения (2) видно, что для увеличения чувствительности гальванометра необходимо, чтобы  $D$  было по возможности мало, а  $B$ ,  $n$  и  $Q$  — по возможности велики. Уменьшение  $D$  достигается уменьшением поперечного сечения нити подвеса или увеличением ее длины. Значение величины  $B$  в воздушном промежутке возрастает при уменьшении размеров этого промежутка; увеличение  $nQ$  достигается увеличением числа витков, а это неизбежно приводит к уменьшению  $B$ . Обычно эти условия подбираются так, чтобы получалось максимальное значение произведения  $BnQ$ .

Описанная система приборов позволяет измерять самыми совершенными гальванометрами силу тока до  $10^{-11}$  А и разность потенциалов до  $10^{-8}$  В. Следует заметить, что техника конструирования и изготовления гальванометров достигла в настоящее время такого совершенства, что подвижная система гальванометра реагирует на статистические тепловые флуктуации тока в цепи гальванометра, что мешает точным измерениям в приборах высшей чувствительности.

При работе с гальванометром имеет важное значение не только его токовая или вольтовая чувствительность, но также характер движения его подвижной системы и время, в течение которого последняя займет положение равновесия; отвечающее конечному углу отклонения. Дело не только в том, чтобы экономить время измерений, но и в том, что режим измерительной цепи не всегда возможно поддерживать длительное время постоянным и отсчеты по гальванометру должны соответствовать вполне определенным состояниям той системы, в которую он включен. Движение рамки гальванометра, перед тем как она займет окончательное отклоненное положение после включения тока  $I$ , можно исследовать, рассмотрев уравнение ее движения.

Уравнение движения рамки будет

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = BnQI - P \frac{d\alpha}{dt} - Da, \quad (3)$$

где  $J$  — момент инерции подвижной системы,  $BnQI$  — момент сил, направляющих движение рамки,  $Da$  — момент кручения подвеса рамки,  $Pda/dt$  — момент сил, тормозящих движение рамки, причем  $P = P_1 + P_2$ , где  $P_1$  — коэффициент торможения рамки вследствие трения ее о воздух,  $P_2$  — коэффициент электромагнитного торможения, являющегося следствием того, что в обмотке рамки во время ее движения индуцируется электродвижущая сила.

Если коэффициент  $P_1$  не поддается изменению или регулиров-

ке в готовом приборе, то величину коэффициента  $P_2$  можно легко изменять, что позволяет, как будет видно дальше, изменять характер движения подвижной системы гальванометра.

Величина коэффициента  $P_2$  может быть определена из следующих рассуждений. При повороте рамки на угол  $d\alpha$  за время  $dt$  скорость возрастания площади двух полосок цилиндрической поверхности, описываемой вертикальными сторонами поворачивающейся рамки, будет  $ab \frac{d\alpha}{dt} = Q \frac{d\alpha}{dt}$  (рис. 1, б), а скорость изменения потока магнитной индукции через поверхность этих полосок в радиальном магнитном поле будет  $BQ \frac{d\alpha}{dt}$  (см. рис. 1, а).

Следовательно, электродвижущая сила, индуцируемая при этом в витках обмотки, равна

$$\mathcal{E} = -BnQ \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Если сопротивление обмотки рамки  $R_r$ , а сопротивление внешней цепи  $R$ , то, пренебрегая самоиндукцией обмотки, можно определить индуцируемый в рамке ток  $I'$ ; получим

$$I' = \frac{\mathcal{E}}{R_r + R} = \frac{BnQ}{R_r + R} \frac{d\alpha}{dt}.$$

Момент пары сил, действующих в магнитном поле на рамку, будет равен

$$BnQI' = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_r + R} \frac{d\alpha}{dt} = P_2 \frac{d\alpha}{dt},$$

откуда

$$P_2 = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_r + R}.$$

У готового гальванометра мы можем изменять величину  $R$ , а следовательно, и значение  $P = P_1 + P_2$ .

Вернемся к уравнению (3), рассмотрим его решение и разные случаи движения рамки гальванометра. Из этого уравнения видно следующее. Угловая частота  $\omega_0$  свободных колебаний разомкнутой рамки в отсутствие подведенного к ней тока и в условиях, когда можно пренебречь трением рамки о воздух, будет иметь значение  $\omega_0 = D/J$ . Для замкнутой рамки  $\omega^2 = D/J - P^2/4J^2$ , и колебания рамки (если ток к ней не подведен, но она была выведена из положения равновесия) будут происходить по закону

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\mu t} \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{где } \mu = \frac{P}{2J}. \quad (5)$$

Если же в покоящуюся рамку ( $\alpha=0$  и  $da/dt=0$ ) будет включен

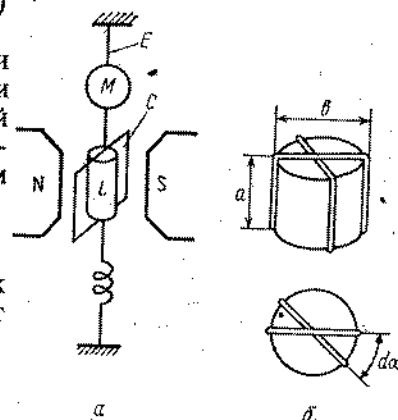


Рис. 1. Устройство гальванометра (а); изменение ориентации рамки (б)

ток постоянной силы, то движение рамки можно описать выражением

$$\alpha = \alpha_n \left[ 1 - e^{-\mu t} \sqrt{\frac{\mu^2 + \omega^2}{\omega^2}} \sin \left( \omega t + \arctg \frac{\omega}{\mu} \right) \right], \quad (6)$$

где  $\alpha_n = BnQI/D$  — установившееся отклонение рамки гальванометра при прохождении по ней тока  $I$  (см. формулу (1)).

Рассмотрим следующие частные случаи применения найденного решения уравнения (3).

1. Если между постоянными прибора имеет место равенство  $P^2 = 4JD$ , то  $\omega$  равно нулю и поворот рамки на угол  $\alpha$  совершается аperiodически, т. е. рамка поворачивается и подходит асимптотически к положению равновесия, не переходя его. Характер движения рамки для этого случая изображен на рис. 2, а (кривая I).

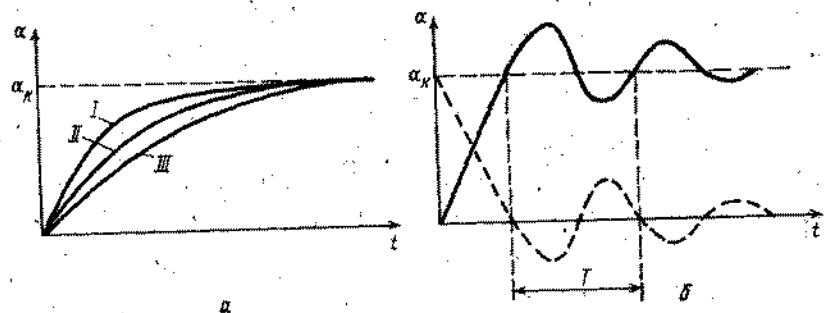


Рис. 2. Различные режимы движения рамки гальванометра

где по оси абсцисс отложено время от момента замыкания для трех разных затуханий, а по оси ординат — углы поворота рамки.

Гальванометр, у которого подобрано указанное равенство постоянных, называется критически успокоенным, причем этого удобнее достигнуть, изменяя величину того внешнего сопротивления  $R$ , на которое замкнута обмотка рамки.

Пренебрегая  $P_1$ , положим  $P = P_2$ , т. е.  $P = B^2 n^2 Q^2 / (R_1 + R)$ , а так как, с другой стороны,  $P = 2\sqrt{JD}$ , то для данного случая необходимо, чтобы

$$R_1 + R = \frac{B^2 n^2 Q^2}{2\sqrt{JD}}, \quad (7)$$

что легче всего осуществить, подобрав соответствующее сопротивление  $R$  внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки. Иногда гальванометры снабжаются переменным магнитным шунтом, который, изменяя величину  $B$ , позволяет добиться критического успокоения при заданном значении  $R$ . В случае соблюдения равенства (7) величина  $R_1 + R$  называется полным критическим сопротивлением.

Следует обратить внимание на то, что электромагнитное торможение пропорционально  $B^2$ , в то время как чувствительность пропорциональна  $B$ , поэтому изменения в напряженности поля значительно сильнее влияют на условия успокоения гальванометра, чем на его чувствительность.

Практически наиболее удобным для измерений является режим работы гальванометра, близкий к критическому, так как он обеспечивает минимальное время подхода подвижной системы гальванометра к положению равновесия. Обычно режим работы сдвигают несколько в сторону периодического колебательного движения рамки, устанавливая для суммы величин  $R_1 + R$  значение, равное 1,1 полного критического сопротивления.

2. Увеличивая трение, т. е. уменьшая сопротивление  $R$  внешней цепи гальванометра так, чтобы  $P^2$  стало больше  $4JD$ , мы заставим поворачиваться рамку гальванометра тоже аperiodически, но с меньшей скоростью (см. кривые II и III на рис. 2, а). В этих случаях гальванометр называется переуспокоенным.

3. Если между постоянными гальванометра имеет место неравенство  $P^2 < 4JD$ , то движение рамки происходит периодически (колебательно). На рис. 2, б сплошная кривая изображает движение рамки в этом случае после замыкания цепи гальванометра, а пунктирная — то же после размыкания.

Колебательный характер движения рамки гальванометра описывается периодом  $T$  колебания и величиной затухания колебаний. Декремент затухания  $\Delta$  определяется отношением двух следующих друг за другом амплитуд:

$$\Delta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \dots = \frac{A_n}{A_{n+1}}, \quad \text{где } A_n = \alpha_n \sqrt{\frac{\mu^2 + \omega^2}{\omega^2}} e^{-\mu n T} \quad (8)$$

(см. уравнение (6)). Натуральный логарифм этого отношения  $\ln \Delta = \Lambda$ , называемый логарифмическим декрементом затухания, весьма просто зависит от соотношения постоянных гальванометра:

$$\Lambda = \frac{PT}{2J}.$$

Это выражение легко получить из уравнений (6) и (8).

Период колебаний  $T$  в свою очередь зависит от соотношения постоянных гальванометра. Из уравнения (6) находим

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{J} - \frac{P^2}{4J^2}}}.$$

Из этого выражения видно, что у готового гальванометра период колебания рамки можно изменять, воздействуя на постоянную торможения  $P$ , ибо  $J$  и  $D$  не меняются.

При  $P \approx 0$ , чего можно достигнуть, заставляя работать гальванометр при замкнутой цепи рамки, период колебания его подвижной системы

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}} \quad (9)$$

Период  $T_0$  является, как мы увидим дальше, одной из основных характеристик гальванометра.

Из всего изложенного видно, что характер движения рамки (при неизменных  $J$  и  $D$ ) можно легко изменять в широких пределах — от периодического с малым затуханием и до аperiodического, причем тот или иной режим движения рамки достигается в основном регулированием постоянной электромагнитного торможения  $P_2$ , а последняя зависит от сопротивления внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки прибора. На этом же основан способ быстрого успокоения колебаний рамки (демпфирование). Достаточно ее обмотку замкнуть накоротко в тот момент, когда она в процессе колебаний проходит через положение покоя (нуля), чтобы она быстро остановилась.

Для уяснения вопроса о том, от каких факторов зависит чувствительность гальванометра, полезно выразить ее теперь в функции периода колебаний рамки и критического сопротивления гальванометра. Из ранее приведенных выражений имеем

$$R_T + R = \frac{B^2 n^2 Q^2}{2\sqrt{JD}} \quad \text{и} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}},$$

но  $S = BnQ/D$ , следовательно,

$$S^2 = \frac{2(R_T + R)\sqrt{JD}}{D^2} = \frac{(R_T + R)T_0}{\pi D} \quad (10)$$

Таким образом, при заданном периоде гальванометра (практически 1—5 с) чувствительность пропорциональна корню квадратному из критического сопротивления, которое, казалось бы, надо делать возможно большим. Однако надо иметь в виду, что увеличение значения критического сопротивления ведет к понижению вольтовой чувствительности прибора. Между тем именно вольтовая чувствительность гальванометра определяет его ценность в целом ряде случаев.

В самом деле, гальванометр может иметь два разных назначения: он применяется как прибор для измерения либо малых токов, либо малых напряжений. Практически оказывается, что режимы работы цепей, в которых важно измерение малых токов и малых напряжений, в большинстве случаев резко различны. Так, измерение малых токов характерно для случаев, когда измерительная схема содержит большие сопротивления (фотоэлементы, ионные или электронные трубки). В этих случаях большие значения критического сопротивления гальванометра не являются помехой. Другое дело, когда гальванометр применяется для измерения малых разностей потенциала (термоэлектродвижущие силы, гальваномагнитные эффекты, включения гальванометра в потенциометрические или мостовые схемы). Обычно в этих случаях

сопротивление той цепи, на которую включается гальванометр, невелико, и при больших значениях критического сопротивления прибора он будет практически полностью задемпфирован. Поэтому в цепь гальванометра, обладающего значительным критическим сопротивлением, приходится искусственно вводить последовательно с прибором дополнительное сопротивление, создающее для подвижной системы режим движения, более близкий к критическому. А это значит, что вольтовая чувствительность гальванометра будет практически определяться частным от деления его токовой чувствительности не на внутреннее сопротивление прибора, а на его критическое сопротивление.

Таким образом, чувствительный к току гальванометр, но с большим критическим сопротивлением оказывается часто, несмотря на формально значительную чувствительность, мало пригодным для измерения малых разностей потенциала. Между тем измерение малых разностей потенциала или контроль за доведением их до нуля является одним из распространеннейших назначений прибора. Изготовление гальванометров специально для этих целей (с малым значением критического сопротивления) не так просто, потому что значение критического сопротивления пропорционально величине тех же параметров (сравни соответствующие формулы), которые входят в выражение для токовой чувствительности,

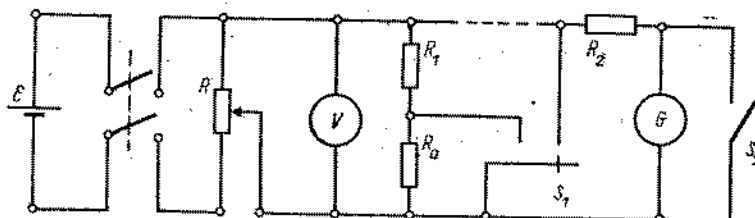


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

и растет пропорционально ее квадрату. Разумный компромисс между этими требованиями и составляет нелегкую задачу конструктора прибора.

Из всего сказанного следует, что выбор гальванометра для рационального обслуживания заданной электрической схемы имеет большое значение для успеха измерений.

**Описание экспериментальной установки.** Схема установки представлена на рис. 3. Здесь  $G$  — гальванометр М-21 или М-17,  $\mathcal{E}$  — аккумулятор на 1,4 В,  $R$  — делитель напряжения,  $V$  — вольтметр,  $R_0$  — постоянное сопротивление (9000 Ом),  $R_1$  — магазин сопротивлений (1—50 Ом),  $R_2$  — магазин сопротивления (1—9999 Ом),  $S_1$  — переключатель цепи гальванометра,  $S_2$  — ключ для демпфирования гальванометра.



## Упражнение 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГАЛЬВАНОМЕТРА ПО ТОКУ

Сила тока в цепи гальванометра, как легко видеть из схемы, определяется следующим приближенным выражением:

$$I_{\Gamma} = \frac{U \frac{R_1}{R_0}}{R_{\Gamma} + R_2} \quad (11)$$

где  $I_{\Gamma}$  — сила тока в цепи гальванометра,  $R_{\Gamma}$  — сопротивление рамки гальванометра. Значение  $R_{\Gamma}$ , входящее в формулу, может быть определено следующим образом.

При неизменном токе через гальванометр, но при различных значениях  $U$  и  $R_2$  можно написать

$$\frac{U' \frac{R_1}{R_0}}{R_{\Gamma} + R_2'} = \frac{U'' \frac{R_1}{R_0}}{R_{\Gamma} + R_2''}, \text{ откуда } R_{\Gamma} = \frac{U'' R_2' - U' R_2''}{U' - U''} \quad (12)$$

Входящие в правую часть формулы (12) величины определяются из опыта (см. ниже). Зная  $R_{\Gamma}$ , можно определить  $I_{\Gamma}$ , а затем и чувствительность к току по формуле

$$S_I = \frac{N}{I_{\Gamma} l} \quad (13)$$

или динамическую постоянную по формуле

$$C_1 = \frac{I_{\Gamma} l}{N}$$

где  $N$  — число миллиметров отклонения светового указателя по шкале от нулевого положения,  $l$  — расстояние в метрах от шкалы до зеркальца гальванометра. Чувствительность обычно выражают в миллиметрах отклонения, вызываемого током в 1 мкА при расстоянии от зеркальца до шкалы в 1 м ( $\text{мм} \cdot \text{мкА}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ).

Постоянная гальванометра определяется силой тока (в мА), вызывающей отклонение указателя на 1 мм при расстоянии от зеркальца до шкалы в 1 м ( $\text{мкА}/\text{мм}/\text{м}$ ).

Зная чувствительность к току, легко получить чувствительность к напряжению (вольтную чувствительность) по формуле

$$S_U = \frac{S_I}{R_{\Gamma}} \quad (14)$$

Однако, как подробно указано выше, практически эту величину часто приходится заменять другой, именно

$$S_U = \frac{S_I}{R_{\Gamma} + R} = \frac{S_I}{R_{\text{кр}}} \quad (15)$$

В настоящей лабораторной работе подлежат вычислению вольтные чувствительности, найденные и по формуле (14), и по формуле (15).

После сборки схемы (см. рис. 3) и проверки ее преподавателем необходимо установить шкалу так, чтобы изображение нити светового указателя отсчетного устройства находилось на средней части его шкалы.

Включить рубильник и установить напряжение по вольтметру 0,5–0,8 В.

Включить сопротивление  $R_1$  на 3–5 Ом, а сопротивление  $R_0$  — на 9000 Ом и после этого ключом  $K_1$  включить гальванометр. Если отклонение будет невелико, то, уменьшая сопротивление  $R_2$ , добиться отклонения на 100–150 мм от нулевого положения и затем перейти к выполнению упражнения.

Подбирая по два значения  $U$  и  $R_2$ , дающих одинаковые отклонения гальванометра, зафиксировать их в рабочей тетради.

Выполнив измерения несколько раз, по формулам (12), (13) и (14) вычислить средние значения величин  $S_I$ ,  $S_U$  и  $R_{\Gamma}$  и оценить ошибки измерения.

## Упражнение 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАМКИ ГАЛЬВАНОМЕТРА

Для определения периода свободных колебаний рамки гальванометра необходимо получить отклонение светового указателя по шкале на 150–200 мм, а затем разомкнуть цепь гальванометра ключом  $S_1$ . После этого следует измерить время нескольких полных колебаний рамки с помощью секундомера и найти их период  $T$ .

## Упражнение 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО КРИТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА

Получив отклонение светового указателя гальванометра на 150–200 делений, быстро переключают ключ  $S_1$  таким образом, чтобы отделить гальванометр от источника напряжения и замкнуть рамку гальванометра на сопротивление  $R_2$ . Ключ  $S_2$  при этом, разумеется, остается все время разомкнутым. Затем наблюдают, в каком режиме движения (колебательном, аperiodическом) указатель подходит к нулевому положению. Наблюдения повторяют, уменьшая последовательно сопротивление  $R_2$  до тех пор, пока движение рамки не станет аperiodическим. Разумеется, при каждом значении  $R_2$  световой указатель будет в одном и том же режиме подходить как к нулевому положению (при вышеуказанной последовательности действия с ключом), так и к своему отклоненному положению (при обратном присоединении рамки гальванометра к источнику напряжения). Но практически удобнее вести наблюдения за режимом возвращения рамки к нулевому положению, так как отклоненное положение изменяется при

подборе нужного значения сопротивления  $R_2$  и цепь гальванометра остается при этом присоединенной ко всей схеме, что нежелательно при наблюдениях режима движения рамки. Значение сопротивления  $R_2$ , при котором движение рамки гальванометра становится аperiodическим, будет равно внешнему критическому сопротивлению гальванометра.

#### Упражнение 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РАМКИ ГАЛЬВАНОМЕТРА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Схема остается без изменения, порядок работы тот же, что и в упражнении 3. В этом упражнении наблюдают за колебаниями светового указателя по шкале и записывают величину последовательных его отклонений вправо и влево (или в одну сторону). Произведя подобные измерения для различных сопротивлений  $R_2$ , рассчитать декремент затухания и его зависимость от сопротивления внешней цепи гальванометра и построить график зависимости декремента затухания от внешнего сопротивления гальванометра  $R_2$ .

Величину декремента определяют при значениях  $R_2$ , не слишком близких к  $R_{кр}$ . Рекомендуемые для этого значения  $R_2$  указаны непосредственно на установке.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен гальванометр магнитоэлектрической системы?
2. Доказать, что установившееся отклонение рамки гальванометра пропорционально силе протекающего по ней тока.
3. Какие факторы определяют работу гальванометра в периодическом, критическом и аperiodическом режимах? Каким образом можно переводить гальванометр из одного режима работы в другой? Какой режим работы гальванометра считается оптимальным?
4. Что называют внешним критическим сопротивлением гальванометра?
5. Нарисовать электрическую схему установки для определения параметров гальванометра. Объяснить порядок действий при измерениях.
6. Какой прием рекомендуется для быстрого успокоения рамки гальванометра?
7. Какие минимальные ток и напряжение можно измерять гальванометром?
8. Как режим гальванометра влияет на его чувствительность?
9. Объяснить природу электромагнитного торможения рамки гальванометра.
10. Почему гальванометр, предназначенный для измерения малых токов, не годится для измерения малых напряжений?

11. Какими параметрами описывается затухание колебаний?
12. Для чего гальванометры снабжаются магнитным шунтом?
13. Какова точность измерения параметров гальванометра?

#### Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

#### Лабораторная работа 6

#### СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

В настоящей работе изучается зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности поля и от температуры.

**Параметры сегнетоэлектриков.** Титанат бария ( $BaTiO_3$ ) относится к группе сегнетоэлектриков. Изучение диэлектрических свойств сегнетоэлектриков представляет большой интерес. Титанат бария — важнейший сегнетоэлектрик, обладающий высокой механической прочностью, большой механической устойчивостью, нашедший благодаря этому широкие научно-технические применения.

Сегнетоэлектрики относятся к классу ионных кристаллов, а электрические свойства кристаллов тесно связаны с их симметрией. Симметрия характеризует особенности расположения электрических зарядов в кристаллах. Можно выделить три типа этого расположения для диэлектриков.

В первом из них расположение положительных и отрицательных зарядов является centrosимметричным, центры тяжести зарядов каждого знака совпадают друг с другом. В пределах одной элементарной ячейки такое совпадение означает, что эти центры тяжести совпадают с центром ячейки. Такие кристаллы называют неполярными.

В диэлектриках второго типа центры тяжести зарядов противоположных знаков в пределах элементарной ячейки не совпадают, и получающиеся при таком распределении электрические дипольные моменты во всех соседних ячейках параллельны. Совокупность всех так построенных элементарных ячеек, образующих кристалл, делает его макроскопически поляризованным в отсутствие внешнего поля (спонтанная поляризация). Такие кристаллы называют полярными.

В диэлектриках третьего типа центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, но распределение зарядов каждого знака не является centrosимметричным. Отсутствие centrosимметричности в распределении зарядов каждого знака разрешает наличие полярных направлений, однако геометрическая сумма всех дипольных моментов оказывается равной нулю. Такие кристаллы называют полярно-нейтральными.

Примером полярных диэлектриков служат сегнетоэлектрики —