

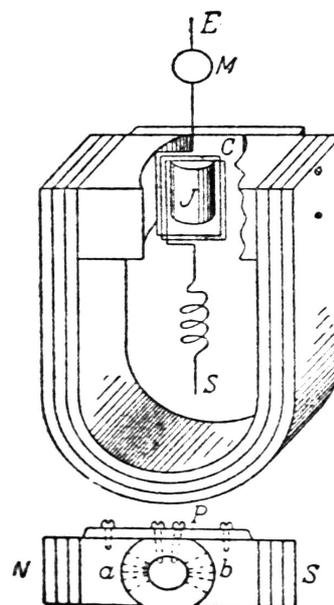
# Изучение гальванометра магнитоэлектрической системы

## Краткое описание и теория

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 чаще применяются гальванометры первого типа.

Подвижная система гальванометра первого типа представляет собой в большинстве случаев четырёхугольную рамку, составленную из плотно уложенных и склеенных изолирующим лаком четырёхугольных витков изолированной тонкой проволоки сечением в несколько сотых квадратного миллиметра. Эффективное поперечное сечение такой катушки, пронизываемое линиями сил магнитного поля, составляет  $nQ$ , где  $n$  — число витков рамки, а  $Q$  — площадь сечения отдельного прямоугольного витка проволоки. Число витков в такой катушке бывает от нескольких десятков до нескольких сотен. Нить  $E$  с укрепленным на ней легким зеркалом  $M$  служит подвесом для рамки  $C$ . Рамка может свободно вращаться в зазоре, образуемом двумя полюсами постоянного магнита и цилиндром  $J$  из мягкого железа, укрепленных на пластинке  $P$  из немагнитного материала. В этом случае, как указывает пунктир нижней части рисунка, магнитное поле в воздушном промежутке почти радиально (на верхней части рисунка один из полюсов магнита частично удалён).



Нитью подвеса служит тонкая металлическая (платиновая) проволочка 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, соединённых с обмоткой рамки (катушки) гальванометра в нижней

её части. Подводы тока к подвижной системе гальванометра не должны оказывать упругого сопротивления вращению подвижной системы, чтобы, таким образом, упругим моментом сил, действующим на рамку, является только крутящий момент нити подвеса.

Перед началом работы гальванометр должен быть правильно установлен, что достигается вращением трёх 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. Узость зазора между полюсами магнита и центральным цилиндром требует точной установки прибора, чтобы вышеуказанное условие было выполнено.

Для правильной установки некоторые системы гальванометров снабжены уровнем, при помощи которого прибор приводится в правильное положение. В других системах гальванометров в корпусе прибора установлено специальное наклонное зеркало, которое облегчает наблюдения положения рамки относительно полюсов магнита.

Приборы первого типа устанавливаются по уровню при арретированной подвижной системе. Приборы второго типа устанавливаются при освобождённой подвижной системе. Арретир приводится в движение специальным рычажком или головкой винта, выведенной из корпуса гальванометра.

Освобождение и закрепление подвижной системы гальванометра следует производить с большой осторожностью, так как толчки подвижной системы гальванометра, подхватываемой вилкой арретира, передаются непосредственно тонкой нити подвеса.

Верхний конец нити подвеса закреплён 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 её в нулевое положение между полюсами магнита. В нулевом положении плоскость витков подвижной системы подвеса устанавливается приблизительно параллельно линии *ab*. 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 с запозданием следует за вращением головки, так как передача крутящего момента идёт к рамке через нить подвеса. Поэтому, вывернув корректор нуля на небольшой угол, следует всякий раз выждать, пока установится в новое положение подвижная система прибора. Только таким ступенчатым вращением корректора нуля можно привести подвижную систему в нужное положение между полюсами магнита.

Измерение силы тока основано на наблюдении углов поворота рамки  $C$ . При протекании через обмотку рамки тока последняя испытывает вращающий момент сил, действующих на ток в магнитном поле. При этом рамка стремится стать 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 промежутке,  $Q$  – площадь витка,  $n$  – число витков,  $D$  – момент сил кручения на единицу угла поворота,  $i$  – сила тока, протекающего по виткам и сообщаемого рамке угловое отклонение  $\alpha_k$ . Отсюда

$$i = C\alpha_k = \frac{1}{S_i}\alpha_k,$$

где

$$C = \frac{D}{BNQ}$$

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

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

называется токовой чувствительностью гальванометра.

Вольтовая<sup>1</sup> чувствительность гальванометра  $S_v$  определяется соотношением

$$S_v = \frac{S_i}{R} = \frac{BnQ}{RD},$$

где  $R$  – сопротивление обмотки рамки гальванометра.

Из уравнения (2) видно, что для увеличения чувствительности гальванометра необходимо, чтобы  $D$  было по возможности малым, а  $B$ ,  $n$  и  $Q$  – по возможности велики. Уменьшение  $D$  достигается уменьшением поперечного сечения нити подвеса или увеличением её 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 условия подбираются так, чтобы обеспечить максимальное значение для  $BnQ$ .

При работе с гальванометром имеет важное значение не только его токовая или вольтовая чувствительность, но также характер движения его

<sup>1</sup> Подразумевается чувствительность к напряжению

подвижной системы и время, в течение которого последняя займёт 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 отсчёты по гальванометру должны соответствовать вполне определённым состояниям той системы, в которую он включён. Движение рамки гальванометра, перед тем как она займёт окончательное отклонённое положение после включения в неё тока  $i$ , можно исследовать, рассмотрев уравнение её движения.

Уравнение движения рамки будет

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = BnQi - P \frac{d\alpha}{dt} - D\alpha, \quad (3)$$

где  $K$  – момент инерции подвижной системы,  $BnQi$  – момент сил, направляющих движение рамки,  $D\alpha$  — момент кручения подвеса рамки и  $P \frac{d\alpha}{dt}$  – момент сил, тормозящих движение рамки, причём  $P = P_1 + P_2$ , где  $P_1$  – коэффициент торможения рамки вследствие трения её о воздух,  $P_2$  – коэффициент электромагнитного торможения, являющегося следствием того, что в обмотке рамки во время её движения индуцируется электродвижущая сила.

Если коэффициент  $P_1$  не поддаётся изменению или регулировке в готовом приборе, то величину коэффициента  $P_2$  можно легко изменять, что позволяет изменять характер движения подвижной системы гальванометра.

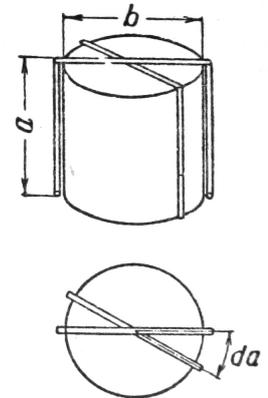
Величина коэффициента  $P_2$  может быть определена путём следующих рассуждений. При повороте рамки на угол  $d\alpha$  за время  $dt$  магнитный поток, пронизывающий её контур, изменится на величину  $d\Phi = 2B ad l$ , где  $dl$  есть расстояние, на которое при этом переместится каждая вертикальная сторона рамки. Но  $dl = d\alpha \frac{b}{2}$ , следовательно,

электродвижущая сила, индуцируемая при этом на витках обмотки, равна

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt} = -n \frac{2B ad \alpha b}{2 dt} = -BnQ \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Если сопротивление обмотки рамки  $R_g$ , а сопротивление внешней цепи  $R$ , то, пренебрегая самоиндукцией обмотки, можно определить индуцируемый в рамке ток  $i'$  по закону Ома

$$i' = \frac{E}{R_g + R} = \frac{BnQ}{R_g + R} \frac{d\alpha}{dt}.$$



Момент пары сил, испытываемый этим током в магнитном поле, будет равен  $BQni' = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_g + R} \frac{d\alpha}{dt} = P_2 \frac{d\alpha}{dt}$ , откуда  $P_2 = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_g + R}$ . У готового гальванометра мы можем изменять величину  $R$ , а следовательно и значение  $P = P_1 + P_2$ .

Вернёмся 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 подведённого к ней тока и в условиях, когда можно пренебречь трением рамки о воздух, будет иметь значение  $\omega_0^2 = \frac{D}{K}$ . Для замкнутой рамки  $\omega_0^2 = \frac{D}{K} - \frac{P^2}{4K^2}$  и колебания рамки (если ток к ней не подведён, но она была выведена из положения равновесия) будут происходить по закону

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

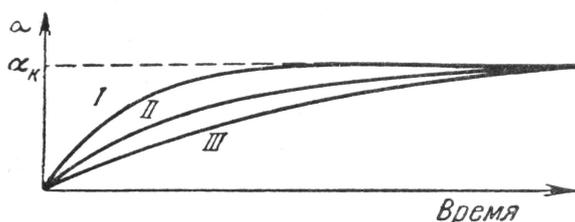
Если же в покоящуюся рамку ( $\alpha = 0$  и  $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ ) будет включён ток постоянной силы, то движение рамки можно описать выражением

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

где  $\alpha_k = \frac{BnQi}{D}$  — 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  $P^2 = 4KD$ , то  $\omega$  равно нулю и поворот рамки на угол  $\alpha$  совершается аperiodически, то есть рамка поворачивается и подходит асимптотически к положению равновесия, не переходя его. Характер движения рамки для этого



случая изображён на рисунке, где по оси абсцисс отложено время от момента замыкания для трёх разных затуханий, а по оси ординат — углы поворота рамки.

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

Пренебрегая  $P_1$ , положим  $P = P_2$ , то есть

$$P = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_g + R},$$

а так как, с другой стороны  $P = 2\sqrt{KD}$ , то для данного случая необходимо, чтобы

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

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  $R_g + R$  называется полным критическим сопротивлением.

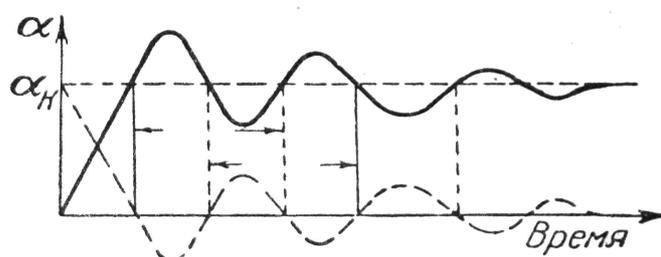
Следует обратить внимание и на то, что электромагнитное торможение пропорционально  $B^2$ , в то время как чувствительность пропорциональна  $B$ , поэтому изменения в напряжённости поля значительно сильнее влияют на условия успокоения гальванометра, чем на его чувствительность.

Близкий к критическому режим работы гальванометра и является практически наиболее удобным для измерений, так как обеспечивает минимальное время подхода подвижной системы гальванометра к положению равновесия. Обыкновенно режим работы сдвигают несколько в сторону периодического колебательного движения рамки, устанавливая для суммы величин  $R_g + R$  значение, равное  $1,1$  критического сопротивления.

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

3. Если между постоянными гальванометра имеет место неравенство

$P^2 < 4KD$ , то движение рамки происходит периодически (колебательно). На рисунке 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:

$$\Delta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \dots = \frac{A_n}{A_{n+1}},$$

где

$$A_n = \alpha_k \sqrt{\frac{\mu^2 + \omega^2}{\omega^2}} e^{-\mu n T} \quad (8)$$

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

$$\lambda = \frac{PT}{2K}.$$

Это выражение можно получить из уравнений 6 и 8.

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

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

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

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

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

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

Из всего изложенного видно, что характер движения рамки (при неизменных  $K$  и  $D$ ) легко и удобно изменяется в широких пределах — от периодического с малым затуханием и до аperiodического, причём тот или иной режим движения рамки достигается в основном регулированием постоянной электромагнитного торможения  $P$ , а последняя зависит от сопротивления внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки прибора. На этом же основан способ быстрого успокоения колебаний рамки (демпфирование). Достаточно её 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 её теперь в функции периода колебаний рамки и критического сопротивления гальванометра. Из ранее приведённых выражений имеем

$$R_g + R = \frac{B^2 n^2 Q^2}{2\sqrt{KD}}$$

и

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{K}{D}},$$

но  $S = \frac{BnQ}{D}$ , следовательно,

$$S^2 = \frac{2(R_g + R)\sqrt{KD}}{D^2} = \frac{(R_g + R)T_0}{\pi D}. \quad (10)$$

Таким образом, при заданном периоде гальванометра (практически 1-5 секунд) чувствительность пропорциональна корню квадратному из критического сопротивления, которое, казалось бы, надо поэтому делать возможно большим. Однако надо иметь в виду, что увеличение значения критического сопротивления ведёт к понижению вольтовой чувствительности прибора. Между тем именно вольтовая чувствительность гальванометра определяет его ценность во многих случаях.

В самом деле, гальванометр может иметь два разных назначения: либо он применяется как прибор для измерения малых токов, либо для измерения 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, включения гальванометра в потенциометрические или мостовые схемы, гальваномагнитные эффекты). 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 таких случаях 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.

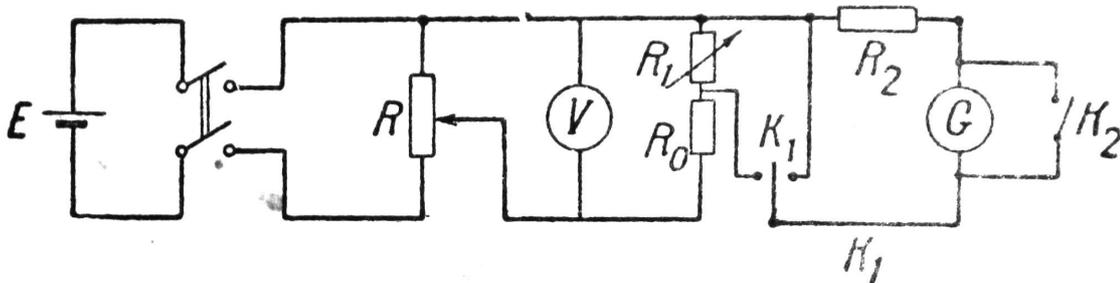
Таким образом, чувствительный к току гальванометр, но с большим

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 самых распространенных 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, которые входят в выражение для токовой чувствительности, и растёт пропорционально её квадрату. Разумный компромисс между этими нелегко совмещаемыми требованиями и составляет трудную задачу конструктора прибора.

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

### Задача №1 Определение чувствительности гальванометра к току

Для определения чувствительности гальванометра к току применяется схема, изображённая на рисунке. Здесь  $E$  – аккумулятор,  $R$  – делитель напряжений,  $V$  – вольтметр,  $R_0$  – постоянное сопротивление (около 10 кОм на каждый вольт напряжения аккумулятора),  $R_1$  – магазин сопротивления (от 1



до 30 Ом на каждый вольт напряжения аккумулятора),  $R_2$  – магазин сопротивления номиналом аналогично  $R_0$ ,  $G$  – гальванометр,  $K_1$  – переключатель цепи гальванометра,  $K_2$  – ключ для демпфирования гальванометра.

Сила тока в цепи гальванометра определяется следующим приближённым выражением:

$$i_g = \frac{V \frac{R_1}{R_0}}{R_0 + R_2}, \quad (11)$$

где  $i_g$  — сила тока в цепи гальванометра,  $R_g$  — сопротивление рамки гальванометра. Значение  $R_g$ , входящее в формулу, может быть определено следующим образом.

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

$$\frac{V' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2'} = \frac{V'' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2''} ,$$

откуда

$$R_g = \frac{V'' R_2' - V' R_2''}{V' - V''} . \quad (12)$$

Входящие в правую часть формулы 12 величины определяются из опыта.

Зная  $R_g$ , можно определить  $i_g$ , а затем и чувствительность к току по формуле

$$S_i = \frac{N}{i_g l} \quad (13)$$

или динамическую постоянную по формуле

$$C_1 = \frac{i_g l}{N} ,$$

где  $N$  — число миллиметров отклонения светового указателя по шкале от нулевого положения,  $l$  — расстояние в метрах от шкалы до зеркала гальванометра. Чувствительность обычно выражают в мм отклонения, вызываемого током в 1 мкА при расстоянии от зеркала до шкалы в 1 м  $\left( \frac{\text{мм}}{\text{мкА} \cdot \text{м}} \right)$ . Чувствительность к напряжению или вольтовая чувствительность выражается, соответственно, в  $\left( \frac{\text{мм}}{\text{мкВ} \cdot \text{м}} \right)$ .

Зная чувствительность к току, можно получить чувствительность к напряжению:

$$S_V = \frac{S_i}{R_g} . \quad (14)$$

Однако на практике эту величину часто приходится заменять другой, а именно

$$S_V' = \frac{S_i}{R + R_g} = \frac{S_i}{R_{сп}} . \quad (15)$$

В задаче необходимо вычислить вольтовые чувствительности, найденные по формулам 14 и 15.

Измерения проводят следующим образом. Подбирая по два значения  $V$  и  $R_2$ , дающие одинаковые отклонения гальванометра, по формулам 12, 13 и 14 определяют  $S_i$ ,  $S_v$  и  $R_g$ . Для величин  $R_g$  и  $S_i$  должно быть получено не менее трёх значений и подсчитаны ошибки измерения.

### **Задача №2** **Определение периода свободных колебаний** **рамки гальванометра**

Для определения периода свободных колебаний рамки гальванометра необходимо получить отклонение светового указателя по шкале на 15-20 см, а затем разомкнуть цепь гальванометра ключом  $K_1$ . После этого следует измерить время нескольких полных колебаний рамки с помощью секундомера и найти их период  $T$ .

### **Задача №3** **Определение внешнего критического** **сопротивления гальванометра**

Получив отклонение светового указателя гальванометра на 15-20 см, быстро переключают ключ  $K_1$  таким образом, чтобы отделить гальванометр от источника напряжения и замкнуть рамку гальванометра на сопротивление  $R_2$ . Ключ  $K_2$  при этом остаётся всё время разомкнутым. Затем наблюдают, в каком режиме (колебательном, апериодическом) указатель подходит к нулевому положению (*указатель будет в одном и том же режиме подходить как к нулевому положению, так и к отклонённому положению, но практически удобнее вести наблюдения за режимом возвращения рамки к нулевому положению, так как отклонённое положение изменяется при подборе нужного значения сопротивления  $R_2$  и цепь гальванометра остаётся при этом под нагрузкой, что нежелательно при наблюдениях режима движения рамки*). Наблюдения повторяют, уменьшая последовательно сопротивление  $R_2$  до тех пор, пока движение рамки не станет апериодическим. Значение сопротивления  $R_2$ , при котором движение рамки гальванометра становится апериодическим, будет равно внешнему критическому сопротивлению гальванометра.

### **Задача №4** **Определение зависимости декремента затухания** **колебаний рамки гальванометра от величины** **внешнего сопротивления**

Порядок работы такой же, как в задаче №3. 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  $R_2$ , можно

рассчитать декремент затухания и его зависимость от сопротивления внешней цепи гальванометра и построить график зависимости декремента затухания от внешнего сопротивления  $R_2$ .

Величину декремента определяют при значениях  $R_2$ , не слишком близких к  $R_{сф}$ .