

Лабораторная работа №309

ГАЛЬВАНОМЕТР И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Приборы и принадлежности: источник питания постоянного тока Б5-70, ампервольтметр М2018, реостат, лабораторная панель с гальванометром ЛМ, вольтметром М252, двумя магазинами сопротивлений.

Введение. Гальванометрами называются электроизмерительные приборы, предназначенные для измерения малых величин тока, напряжения или прошедшего электрического заряда. В лабораторной практике применяются гальванометры различных конструкций с разнообразными электрическими и механическими параметрами. Но наибольшее распространение получили гальванометры постоянного тока магнитоэлектрической измерительной системы, основное достоинство которых – высокая чувствительность. В этих приборах вращение подвижной части и связанного с ней указателя (стрелочного, светового) происходит в результате взаимодействия рамки с током и магнитного поля постоянного магнита (рис.1).

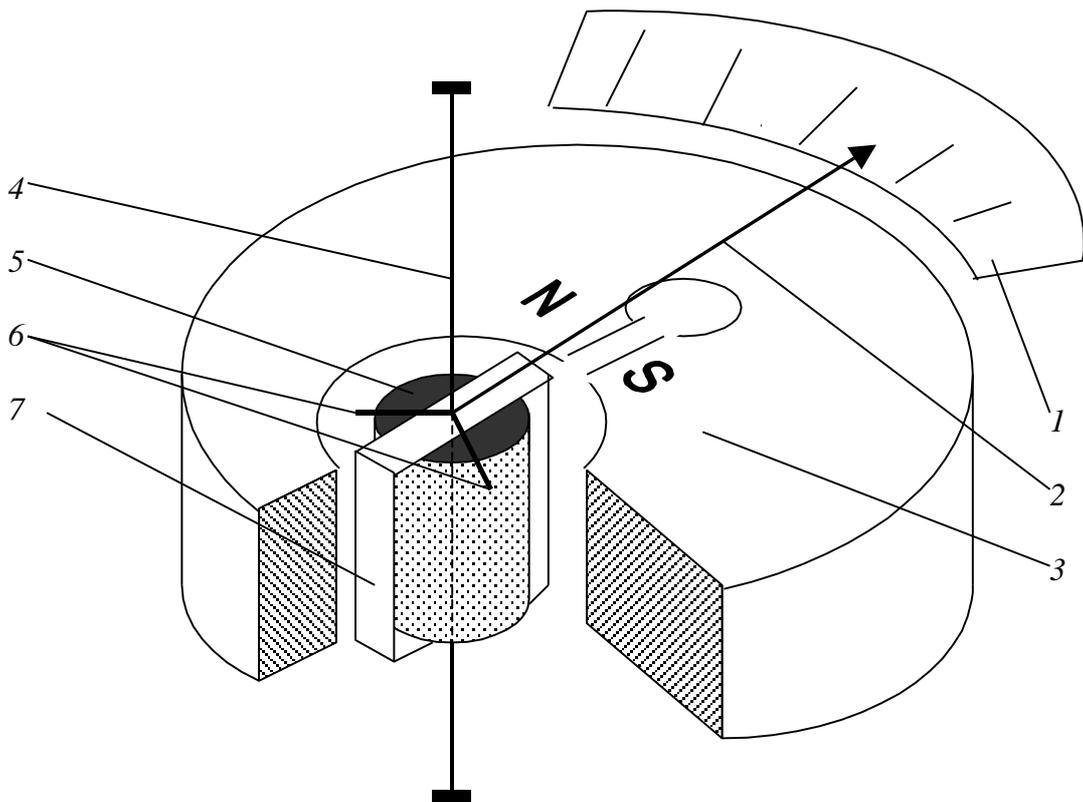


Рис.1

В воздушном зазоре между полюсами постоянного магнита 3 и неподвижного цилиндрического сердечника 5 создается радиальное магнитное поле. Подвижная рамка 7, укрепленная на растяжках 4, может поворачиваться вокруг сердечника 5 в поле магнита. К рамке 7 прикреплена указательная стрелка 2, сбалансированная противовесами 6. Электрический ток к измерительной рамке подводится по растяжкам 4.

Рассмотрим поведение рамки в данных условиях (рис.2).

При протекании электрического тока I по обмотке рамки, состоящей из n витков тонкой проволоки, на вертикальные стороны b , находящиеся в радиальном магнитном поле, действует пара сил F , создающих вращающий момент,

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}, \quad (1)$$

где \vec{p}_m – магнитный момент рамки.

Величина вращающего момента равна

$$M = IsnB \sin(\vec{p}_m, \vec{B}), \quad (2)$$

где s – площадь рамки.

Под действием этого момента рамка и связанная с ней стрелка поворачиваются до тех пор, пока момент упругих сил M_{yn} , возникающих в растяжках при их кручении, не уравновесит момент M .

В положении равновесия

$$M = M_{yn}, \quad IsnB = k\varphi. \quad (3)$$

Здесь k – коэффициент упругости растяжек, φ – угол поворота рамки гальванометра.

Успокоение подвижной части происходит благодаря токам, индуцируемым в каркасе рамки и в ее обмотке, если последняя замкнута на внешнее сопротивление.

В положении равновесия при наличии в рамке тока I угол отклонения стрелки прибора составляет

$$\varphi = \frac{snB}{k} I = S_I I. \quad (4)$$

Таким образом, угловое перемещение указателя пропорционально току, протекающему в рамке. Коэффициент пропорциональности S_I называется чувствительностью гальванометра по току.

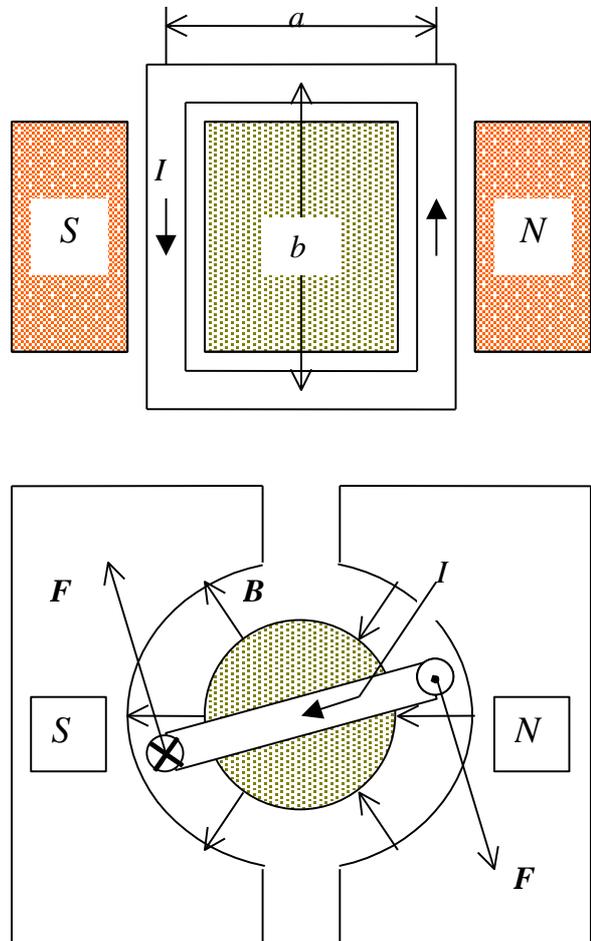


Рис.2. Схематическое изображение рамки гальванометра в магнитном поле (вид спереди и вид сверху)

$$S_I = \frac{\varphi}{I}, \quad S_I = \frac{snB}{k}. \quad (5)$$

Из приведенного соотношения видно, от каких конструктивных параметров гальванометра зависит его чувствительность.

Величина, обратная чувствительности, называется *постоянной по току*

$$c_I = \frac{1}{S_I} = \frac{I}{\varphi}.$$

Однако, отклонение стрелки прибора удобнее измерять числом делений шкалы N , которое прямо пропорционально φ , поэтому заменим c_I другой величиной – C_I , назвав ее *ценой деления шкалы по току*

$$C_I = \frac{I}{N}. \quad (6)$$

Цена деления измеряется в $A/\text{дел}$ и показывает, какой ток нужно пропустить через гальванометр, чтобы его стрелка отклонилась на одно деление шкалы.

При токе I в рамке измерительного прибора на его зажимах создается напряжение

$$U = IR_G = C_I N R_G = C_U N, \quad (7)$$

где R_G – внутреннее сопротивление гальванометра. Следовательно, по отклонению стрелки можно определить напряжение на зажимах гальванометра, т.е. гальванометр в данном случае выполняет функцию вольтметра. Величина C_U называется *ценой деления шкалы по напряжению* и измеряется в $V/\text{дел}$

$$C_U = \frac{U}{N}, \quad C_U = C_I R_G. \quad (8)$$

Гальванометры с малым внутренним сопротивлением, предназначенные для измерения тока, называются *микроамперметрами*. При включении амперметра в цепь сопротивление ее почти не увеличивается и почти не изменяется протекающий ток.

Максимальный ток, который можно пропускать через рамку гальванометра, мал, по определению. Для расширения диапазона измеряемых токов используются *шунты* – резисторы, включенные *параллельно* измерительному прибору. При шунтировании только часть подлежащего измерению тока, причем малая, протекает через измерительный прибор и непосредственно воздействует на рамку, большая проходит через шунт. Поэтому для отвлечения большей части тока требуется шунт малого сопротивления по сравнению с сопротивлением рамки R_G . Таким образом, гальванометр с шунтом (амперметр) в целом будет обладать еще меньшим сопротивлением, чем R_G .

Пусть необходимо измерить ток I_0 , в n раз больший, чем *ток полного отклонения гальванометра* I_{lim} – ток, вызывающий отклонение стрелки на всю шкалу, он же – *максимально допустимый (предельный) ток* прибора без шунта.

Для расчета сопротивления шунта R_s применим правила Кирхгофа к контуру, изображенному на рис.3,

$$\begin{aligned} I_0 &= I_{lim} + I_s, \\ I_{lim}R_G - I_sR_s &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Используя условие $I_0 = nI_{lim}$, находим сопротивление шунта

$$R_s = \frac{R_G}{n-1}. \quad (10)$$

Шунт обычно делают из отрезка высокоомного провода (константан, манганин) с удельным сопротивлением ρ и сечением S_s . Длина его рассчитывается по формуле

$$l = \frac{R_s S_s}{\rho}. \quad (11)$$

Гальванометры, приспособленные для измерения разности потенциалов, можно называть вольтметрами. Сопротивление вольтметра должно быть значительно больше сопротивления участка цепи, на котором измеряется падение напряжения, чтобы включение вольтметра не вызывало нежелательного перераспределения тока между нагрузкой и измерительным прибором. Если внутреннее сопротивление гальванометра недостаточно, то последовательно с ним включают добавочный резистор R_{ad} (рис.4).

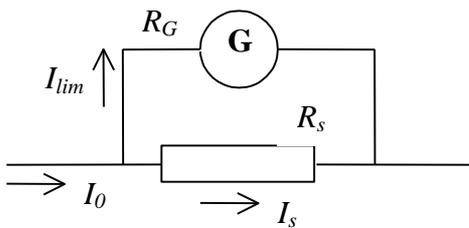


Рис.3

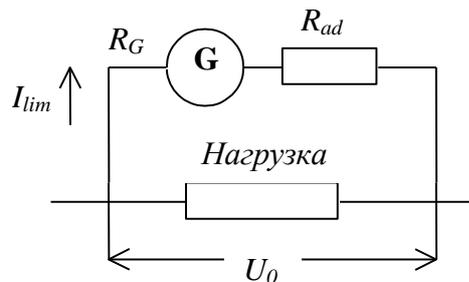


Рис.4

Включение добавочного резистора R_{ad} производится также в тех случаях, когда необходимо расширить пределы измерения прибора по напряжению. Величина R_{ad} рассчитывается из условия, что ток в измерительном приборе не должен превышать ток полного отклонения гальванометра I_{lim} . Применяя закон Ома для участка цепи

$$U_0 = I_{lim}(R_G + R_{ad}),$$

находим

$$R_{ad} = \frac{U_0}{I_{lim}} - R_G. \quad (12)$$

Если есть необходимость измерять напряжение U_0 , которое в m раз больше предельного напряжения U_{lim} , измеряемого гальванометром напрямую

$U_0 = mU_{lim}$, то величина добавочного резистора рассчитывается следующим образом:

$$R_{ad} = \frac{mU_{lim}}{I_{lim}} - R_G = \frac{mI_{lim}R_G}{I_{lim}} - R_G.$$

Итак,

$$R_{ad} = R_G(m - 1), \quad (13)$$

т.е. для расширения предела измерения по напряжению в m раз сопротивление добавочного резистора должно быть в $(m-1)$ раз больше внутреннего сопротивления гальванометра.

Таким образом, для расчета сопротивления шунтов R_s и добавочных резисторов R_{ad} нужно знать внутреннее сопротивление данного гальванометра R_G . Измерять его обычным способом, омметром например, нельзя, так как через гальванометр можно пропускать малый ток, значительно меньший, чем ток омметра. Поэтому поступают по-другому. Внутреннее сопротивление гальванометра, его чувствительность по току и по напряжению могут быть, в частности, определены путем измерений в электрической цепи, схема которой приводится на рис. 5. Здесь G – исследуемый гальванометр, $ИП$ –

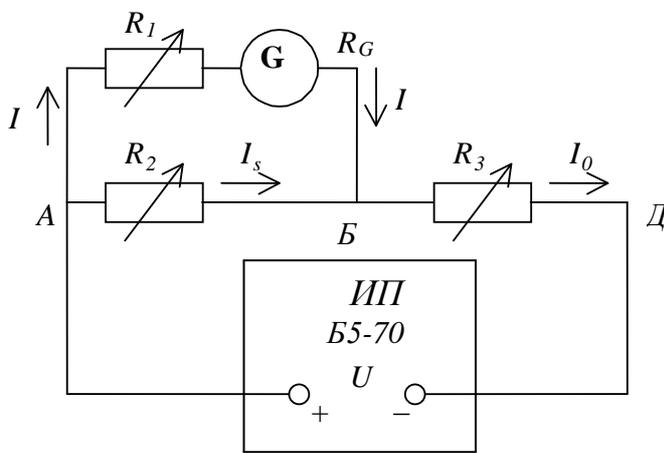


Рис.5

стабилизированный источник постоянного тока со встроенным вольтметром, резисторы R_2 , R_3 составляют делитель напряжения, в то же время резистор R_2 является шунтом, а R_1 – добавочным сопротивлением к гальванометру.

Ток на участке AD , согласно закону Ома, равен

$$I_0 = \frac{U}{R_{AD}}, \quad (14)$$

где $R_{AD} = R_{AB} + R_3. \quad (15)$

U – напряжение на выходе источника питания $ИП$.

Тогда
$$I_0 = \frac{U}{R_{AB} + R_3}. \quad (16)$$

Падение напряжения на участке цепи AB

$$U_{AB} = I(R_1 + R_G). \quad (17)$$

По первому правилу Кирхгофа

$$I_0 = I + I_s. \quad (18)$$

Решая совместно уравнения (16,17,18) относительно I – тока в гальванометре, получим

$$I = \frac{UR_2}{(R_{AB} + R_3)(R_1 + R_G + R_2)} = C_I N, \quad (19)$$

где N – число делений, на которое отклонилась стрелка при токе I ,

$$R_{AB} = \frac{R_2(R_1 + R_G)}{R_2 + R_1 + R_G}.$$

Сделаем сопротивление $R_1=0$ и с помощью переменных резисторов R_2 и R_3 установим стрелку гальванометра на *крайнее правое оцифрованное* деление шкалы. Этому состоянию соответствует число делений шкалы N_{lim} и ток гальванометра I_{lim} . Тогда формула (19) примет следующий вид:

$$I_{lim} = \frac{UR_2}{(R_{AB}^1 + R_3)(R_G + R_2)} = C_I N_{lim}, \quad (20)$$

$$R_{AB}^1 = \frac{R_2 R_G}{R_2 + R_G}.$$

Начнем понемногу увеличивать сопротивление R_1 , ток гальванометра будет уменьшаться. Остановимся на некотором значении R_{1i} . Ток при этом будет $I_i < I_{lim}$ и стрелка установится на каком-то делении шкалы N_i .

Из выражения (19) напишем следующее:

$$UR_2 = C_I N_i (R_{AB} + R_3) (R_{1i} + R_2 + R_G), \quad (21)$$

а из (20) –

$$UR_2 = C_I N_{lim} (R_{AB}^1 + R_3) (R_2 + R_G). \quad (22)$$

Приравняв правые части выражений (21) и (22) и подставив R_{AB} и R_{AB}^1 , получим

$$R_G = \frac{N_i R_{1i}}{N_{lim} - N_i} - \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}. \quad (23)$$

Цена деления шкалы по току определяется из уравнения (20)

$$C_I = \frac{UR_2}{N_{lim} [R_G (R_2 + R_3) + R_2 R_3]}. \quad (24)$$

Цена деления шкалы гальванометра по напряжению

$$C_U = C_I R_G. \quad C_U = \frac{UR_2 R_G}{N_{lim} [R_G (R_2 + R_3) + R_2 R_3]}. \quad (25)$$

Описание установки. На лабораторной панели установлены следующие приборы: гальванометр магнитоэлектрической системы типа ЛМ, два магазина сопротивлений Р33 в качестве резисторов R_1 и R_3 , переменный резистор R_2 на 1 Ом со ступенчатым регулированием через 0,1 Ом. В состав установки входит стабилизированный источник постоянного тока Б5-70 со встроенным вольтметром, дающий на выходе регулируемое напряжение 0...30 В, и многопредельный ампервольтметр.

Величина тока в гальванометре ограничивается тем, что резистор R_2 имеет малое сопротивление, а на резисторе R_3 устанавливается максимально

возможное сопротивление, так что коэффициент деления напряжения становится порядка 10^6 .

Упражнение 1 Определение характеристик гальванометра

Измерения. 1.Подготовьте приборы к работе. Для этого установите $R_1=0$, $R_2=1 \text{ Ом}$, R_3 – максимальное.

2.Перед сборкой цепи ручку регулировки “ U ” на источнике питания ИП поставьте на минимальное выходное напряжение, переключатель «Внеш/Внутр» – в положение «Внутр», переключатель индикации «V/A» – в положение «V» (измерение выходного напряжения).

3.Соберите электрическую цепь по схеме (рис.5) и предложите преподавателю или лаборанту проверить ее.

4.Включите в сеть источник питания Б5-70 и установите ручкой регулятора “ U ” выходное напряжение 4...6 В.

5.Уменьшая сопротивление магазина R_3 (начиная со старшей декады), установите стрелку гальванометра на крайнее правое деление шкалы (на деление N_{lim}). Значения N_{lim} и R_3 запишите в таблицу.

6.Подберите сопротивление магазина R_1 так, чтобы стрелка гальванометра установилась последовательно на $N_i=35; 25; 15$ делениях шкалы. Значения N_i и R_{1i} запишите в таблицу.

$U=$		$R_2=$		$\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} =$	
$N_{lim}=$		$R_3=$			
N_i	$R_{1i},$ Ом	$N_{lim}-N_i$	$R_G,$ Ом	$C_B,$ А/дел	$C_U,$ В/дел

Обработка результатов измерений. 1.По формулам (23, 24, 25) вычислите внутреннее сопротивление гальванометра, цену деления по току и по напряжению для каждого измерения. Найдите их средние значения.

2.Вычислите полуширину доверительного интервала по Стьюденту

$$\Delta R_G = t_{p,n} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{R}_G - R_{Gi})^2}.$$

3.Окончательный результат запишите в виде

$$R_G = \bar{R}_G \pm \Delta R_G$$

с указанием коэффициента доверия.

4.В таком же виде запишите результаты определения цены деления шкалы гальванометра по току и цены деления по напряжению.

Упражнение 2

Работа гальванометра в качестве вольтметра

Как было сказано выше, гальванометр можно использовать в качестве вольтметра, если искусственно увеличить его сопротивление. Это достигается путем включения последовательно с измерительной рамкой добавочного резистора R_{ad} . Наибольшее напряжение, которое можно измерить гальванометром напрямую, определяется ценой деления прибора по напряжению и количеством делений на его шкале N_{lim} , т.е. $U_{lim} = C_U N_{lim}$.

Измерения. 1. Рассчитайте величину добавочного сопротивления по формуле (13) для указанного преподавателем предела измеряемого напряжения U_0 (но не более 30 В, которое обеспечивает данный источник питания). Коэффициент расширения предела $m = U_0 / U_{lim}$.

2. Перед сборкой цепи ручку регулировки “U” на источнике питания ИП поставьте на минимальное выходное напряжение, переключатель «Внеш/Внутр» – в положение «Внутр», переключатель цифрового индикатора «V/A» – в положение «V» (измерение выходного напряжения).

3. Соберите электрическую цепь по схеме (рис.6). Роль добавочного резистора пусть выполняет, например, магазин сопротивлений R_1 . В качестве образцового вольтметра V используйте многопредельный ампервольтметр М2018.

4. Предложите лаборанту или преподавателю проверить цепь.

5. Установите на магазине R_1 рассчитанную величину R_{ad} . Ваши дальнейшие действия позволят проверить правильность сделанного расчета, а также проградуировать вольтметр, сконструированный на базе гальванометра, по контрольному вольтметру V .

6. Увеличивая выходное напряжение источника ИП, выведите стрелку гальванометра на крайнее правое оцифрованное деление шкалы. Если сопротивление добавочного резистора рассчитано и установлено правильно, то контрольный вольтметр при этом должен показывать заданное напряжение U_0 . Если это условие не выполняется, то необходимо подобрать на магазине R_1 величину сопротивления, которая удовлетворила бы поставленному требованию. Найденное опытным путем значение добавочного сопротивления запишите, назвав его *экспериментальным*.

7. Установите на магазине R_1 оптимальное значение добавочного сопротивления и проведите градуировку сконструированного таким образом вольтметра на базе гальванометра. Для этого ручкой регулировки выходного напряжения источника ИП поочередно устанавливайте стрелку гальванометра

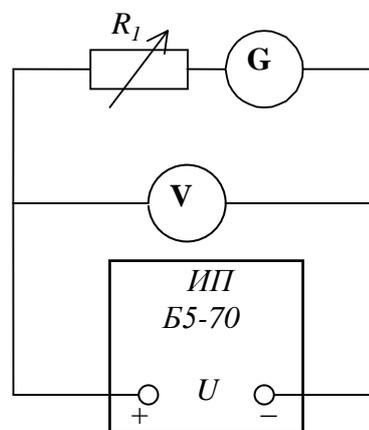


Рис.6

на *каждое оцифрованное* деление его шкалы и записывайте показания контрольного вольтметра V в заранее подготовленную таблицу.

8. По полученным результатам постройте *градуировочный график*, на котором по оси абсцисс отложите деления шкалы гальванометра, по оси ординат – показания контрольного вольтметра V .

Упражнение 3

Работа гальванометра в качестве амперметра

Пределы измерения гальванометра по току можно существенно расширить с помощью шунтов, превратив его тем самым в амперметр.

Измерения. 1. Рассчитайте сопротивление шунта по формуле (10), чтобы предел измерения по току расширить до $I_0=45$ мА (или 90 мА). Большее расширение пределов в условиях учебного практикума невозможно реализовать, если в качестве шунта использовать магазин Р-33. Если такая необходимость возникает, то шунт *изготавливают* из константановой или манганиновой проволоки (ленты) и подгоняют его сопротивление индивидуально (см. формулу (11)). Коэффициент расширения пределов $n=I_0/I_{lim}$, где I_{lim} – ток полного отклонения гальванометра, он определяется через постоянную по току C_I , найденную в упр.1, и число делений всей шкалы $I_{lim}=C_I N_{lim}$.

2. Перед сборкой цепи реостат R (500...600 Ом), используемый в качестве нагрузки, поставьте на наибольшее сопротивление, чтобы нечаянно не устроить короткое замыкание.

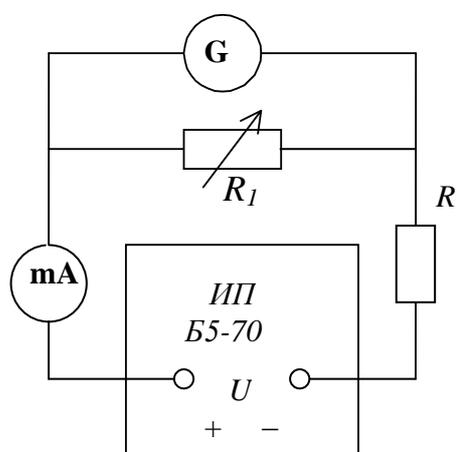


Рис.7

3. Соберите электрическую цепь по схеме (рис.7). В качестве образцового миллиамперметра mA используйте ампервольтметр М2018 с подходящим пределом измерения.

4. Предложите преподавателю или лаборанту проверить собранную цепь.

5. Установите на магазине R_1 *рассчитанное* Вами сопротивление шунта R_s на выбранный предел измерения тока.

- На магазине R_1 , используемом в данном случае как шунт, поставьте нулевое сопротивление в целях защиты гальванометра от перегрузки при возможных ошибках в сборке цепи.
- На источнике питания $ИП$ ручку регулировки выходного напряжения установите на минимум, переключатели: один – в положение «Внутр», другой – в положение «V».

3. Соберите электрическую цепь по

6. Включите источник питания в сеть. Увеличивайте медленно и плавно выходное напряжение источника, наблюдая за показаниями гальванометра, доведите стрелку гальванометра до наибольшего оцифрованного деления шкалы. Если шунт рассчитан и установлен правильно, то показания контрольного миллиамперметра будут совпадать с заданным предельным значением тока I_0 , если же будут отличаться, то отличие не должно быть значительным.

7. Проградуируйте шкалу гальванометра, работающего теперь как амперметр, в единицах силы тока. Для этого медленно понижайте выходное напряжение источника, останавливайтесь на каждом оцифрованном делении его шкалы и записывайте в подготовленную таблицу показания контрольного миллиамперметра **мА**.

8. Постройте градуировочный график, на котором по оси абсцисс откладываете показания гальванометра в делениях шкалы, а по оси ординат – показания контрольного миллиамперметра **мА**.

Контрольные вопросы

1. Рассмотрите устройство и принцип действия приборов магнито-электрической системы.

2. Что такое гальванометр? Что специфического в его конструкции надо заложить, чтобы он отвечал своему назначению?

3. За счет чего достигается высокая чувствительность гальванометра к току? Выведите формулу чувствительности.

4. Почему рамка гальванометра наматывается на алюминиевый каркас, а не на пластмассовый, например?

5. Зачем в зазор магнита помещается цилиндрический сердечник из магнитомягкого железа? Что будет без него?

6. Почему рамка подвешивается на растяжках, а не устанавливается на полуосях как в других электроизмерительных приборах?

7. Как можно расширить диапазон измерения гальванометра по току? Рассчитайте шунт на заданный предел измерения тока. Можно ли на основе данного гальванометра изготовить амперметр на 100 А?

8. Как расширить пределы измерения гальванометра по напряжению? Рассчитайте добавочное сопротивление, например на 100 В.

Список рекомендуемой литературы

1. Кортнев А.В., Рублев Ю.А., Куценко А.Н. Практикум по физике. М.: Высшая школа, 1963. С.214.
2. Попов В.С. Электрические измерения. М.: Энергия, 1974. С. 72-76.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1998. Кн.2. С. 123-132.