

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра экспериментальной физики

**ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА  
УИТСТОНА**

Методические указания к лабораторной работе № 5

по электричеству

Издание АГУ Барнаул, 1989

Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона:  
Методические указания к лабораторной работе по  
электромагнетизму для студентов 2 курса специальностей  
«Физика», «Радиофизика». –Барнаул: изд. АГУ, 1989. –15 с.

Печатается

по решению кафедры экспериментальной физики и  
методического совета физического факультета

Составитель к.ф.-м.н. В.В. Чертищев

Рецензент к.т.н. М.А. Утемесов

План издания УВД 1989 г., п. 147.

Алтайский государственный университет, 1989

# Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона

**Цель задачи:** ознакомление с классическим методом измерения сопротивлений при помощи мостовой схемы.

Классическим методом измерения сопротивлений является метод постоянного тока. На рис.1 изображена схема простейшего моста, называемого обычно мостом Уитстона. Он составлен из четырех последовательно соединенных сопротивлений  $R_x, R_0, R_1, R_2$ , образующих четырехугольник ABCD.

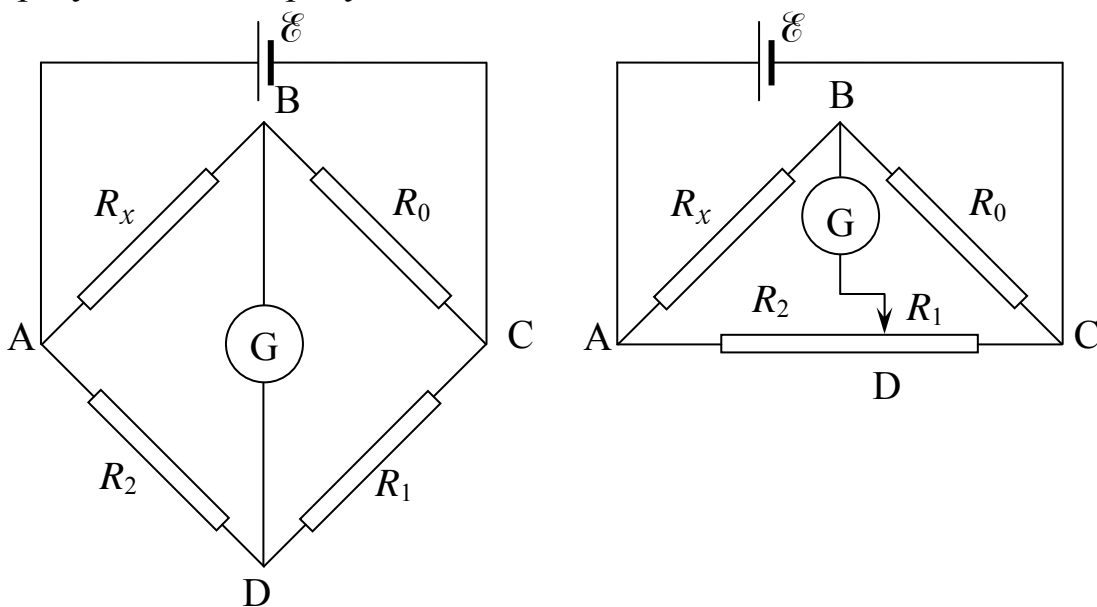


Рис. 1. Схема моста Уитстона

В одну из диагоналей этой схемы включается источник электродвижущей силы. В другую диагональ схемы включается чувствительный гальванометр. Эта диагональ схемы и называется мостом в собственном смысле. Весь процесс измерений при помощи этой схемы связан с требованием равенства нулю силы тока в мосте, отсюда и распространение названия мост на всю схему. Мост в собственном смысле не обязательно состоит только из двух проводов и гальванометра, включенных в диагональ схемы. В некоторых случаях мост составляет и более сложную систему, в которую кроме гальванометра включены еще и сопротивления.

При произвольном соотношении сопротивлений, составляющих всю мостовую схему, через гальванометр, разумеется, должен идти ток. Но, как это можно показать простым расчетом, существует одно определенное соотношение между сопротивлениями, со-

ставляющими схему, при котором сила тока через гальванометр обращается в нуль, хотя при этом во всех других звеньях схемы сила тока не равна нулю.

В качестве сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  часто применяют реохорд. Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку из сплава с высоким омическим сопротивлением, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт.

Когда на проволоке реохорда AC течет ток, вдоль него происходит падение потенциала от значения  $U_A$  в точке A до значения  $V_C$  в точке C. Если пренебречь падением потенциала в низкоомных подводных проводах, можем написать

$$V_A - V_C = \mathcal{E} \quad (1)$$

В цепи ABC при этом тоже течет ток, и потенциал  $V_B$  в точке B будет иметь промежуточное значение между  $V_A$  и  $V_C$ . На участке AC можно найти точку D, потенциал  $V_D$  которой равен потенциалу  $V_B$  точки B:

$$V_D = V_B \quad (2)$$

Если в точку D поместить скользящий контакт реохорда, подключенный через гальванометр G к точке B, ток через гальванометр не пойдет, поскольку

$$V_D - V_B = 0$$

Такое состояние схемы называется равновесием моста.

Из условия (2), используя закон Ома, нетрудно вывести условие равновесия моста

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

Это соотношение может служить для отыскивания любого из четырех сопротивлений, включенных в плечи моста, если известны три других сопротивления. Поэтому сущность процесса измерений на мостовой схеме заключается в экспериментальном определении величин сопротивлений  $R_x$ ,  $R_0$ ,  $R_1$  и  $R_2$ , удовлетворяющих этому соотношению.

Мостовая схема применяется следующим образом. В одно из плеч моста включается известное сопротивление  $R_0$  (например, магазин сопротивлений). В другое плечо включается измеряемое сопротивление  $R_x$ . Наконец, третье и четвертое плечи мостовой схемы составляют два сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  реохорда.

Так как сопротивления  $R_2$  и  $R_1$  участков AD и DC реохорда пропорциональны их длинам  $l_2$  и  $l_1$ , формула (3) позволяет выразить

искомое (измеряемое) сопротивление  $R_x$  через произведение сопротивления  $R_0$  и отношения длин:

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_1} = R_0 \frac{l_2}{l_1} = R_0 \frac{l-l_1}{l_1} = R_0 \frac{l_2}{l-l_2}, \quad (4)$$

где  $l=l_1+l_2$ —длина проволоки реохорда.

В принципе измерение сопротивления  $R_x$  возможно при любом  $R_0$ , и равновесие моста достигается при различных значениях  $l_2/(l-l_2)$ . Определим, как зависит точность измерения  $R_x$  от положения скользящего контакта реохорда при равновесии моста. При этом для простоты будем считать, что ошибка в измерении положения скользящего контакта (длины  $l_2$ ) является единственным источником погрешностей. Оценку погрешности найдем по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= \frac{\partial R_x}{\partial l_2} \Delta l_2 = R_0 \frac{\partial}{\partial l_2} \left( \frac{l_2}{l-l_2} \right) = R_0 \frac{(l-l_2)+l_2}{(l-l_2)^2} \Delta l_2 = \\ &= R_0 \frac{l \Delta l_2}{(l-l_2)^2} = R_0 \frac{l_2}{l-l_2} \cdot \frac{l \Delta l_2}{l_2(l-l_2)} = R_x \frac{l}{l-l_2} \cdot \frac{\Delta l_2}{l_2}. \end{aligned}$$

относительная погрешность

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{l}{l-l_2} \cdot \frac{\Delta l_2}{l_2}$$

минимальна вблизи  $l_2=l/2$ . При изменении  $l_2$  от  $l_2=l/2$  до  $l_2=0.2l$  или до  $l_2=0.8l$  погрешность измерений возрастает в 1.5 раза, а дальнейшее приближение к нулю  $l_2$  или  $(l-l_2)$  приводит ко все более быстрому нарастанию погрешности. Поэтому следует выбирать сопротивление  $R_0$  таким, чтобы баланс моста достигался около середины реохорда и, во всяком случае, в пределах  $0.2l < l_2 < 0.8l$ . В качестве  $R_0$  удобно использовать магазин сопротивлений. В этих условиях процесс измерений на мостовой схеме заключается в установке в магазине сопротивления  $R_0$ , близкого по величине к измеряемому сопротивлению  $R_x$ , и в отыскании при помощи скользящего контакта такого положения моста, при котором сила тока в гальванометре обращается в нуль.

Если магазин сопротивлений  $R_0$  допускает очень небольшие, хотя и скачкообразные, изменения сопротивления в пределах от 0 до  $R_{\max}$ , лучше измерения производить при фиксированных  $R_1=R_2$  ( $l_1=l_2$ ), уравновешивая мост путем изменения  $R_0$ . При равновесии тогда  $R_x=R_0$ .

Для точных измерений в качестве  $R_1$  и  $R_2$  можно использовать магазины сопротивлений или специально изготавливаемые промышленностью эталонные

сопротивления. Промышленностью выпускаются также мосты постоянного тока, выполненные в одном корпусе. Простейший портативный мостик Уитстона имеет одно фиксированное  $R_0$  и вместо реохорда  $R_1$ ,  $R_2$  резистор переменного сопротивления с линейной зависимостью сопротивлений от угла поворота подвижного контакта. На шкале, жестко связанной с ручкой подвижного контакта, приведены значения измеряемого сопротивления.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. Измерение сопротивлений резисторов

Практическая измерительная схема представлена на рис. 2. Эта схема полностью сохраняет принципиальное устройство схемы, изображенной на рис. 1, но она усложнена некоторыми деталями. Прежде всего, в эту схему введен коммутатор  $K$ , допускающий обмен местами сопротивлений, включенных в плечи моста, без переключения для этого соединительных проводов схемы.

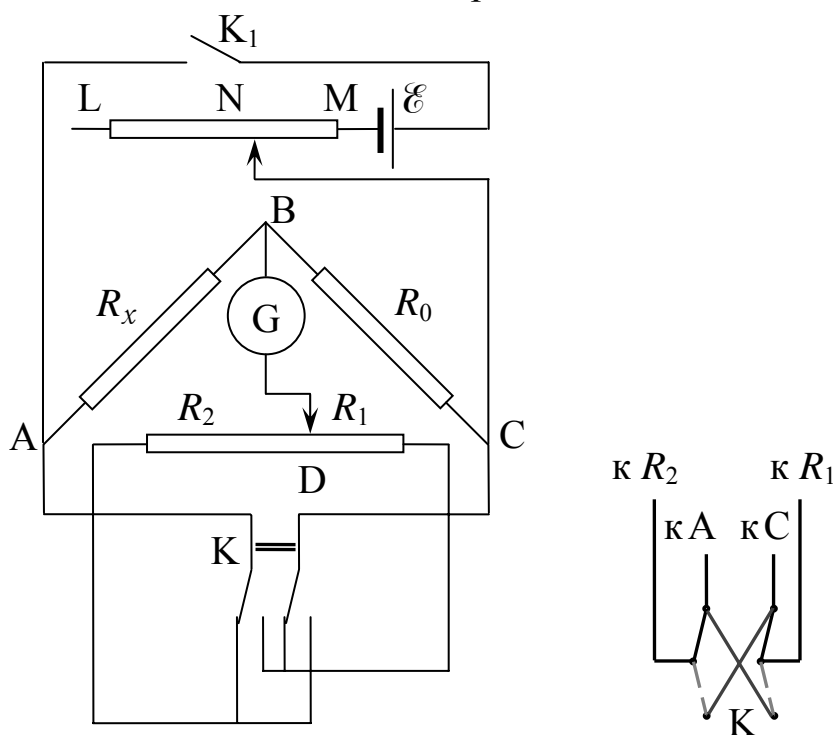


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. Рисунок справа поясняет способ подключения ключа  $K$ .

Целесообразность коммутирования сопротивлений при измерениях связана с тем, что проводник реохорда никогда не бывает вполне однородным по всей длине, а поэтому и отношение сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  не является точно равным отношению длин отрезков  $l_1$  и  $l_2$ . При окончательном расчете неизвестного сопротивления используется среднее арифметическое каждой из величин  $l_1$  и  $l_2$ , найденных при двух положениях коммутатора.

Второе отличие заключается в том, что к источнику схема подключается через переменное сопротивление  $R_{NM}$ , составляющее часть сопротивления  $R_{LNM}$ . Это переменное сопротивление сделано для того, чтобы начинать уравнивание моста при малом токе через гальванометр с тем, чтобы предохранить его подвижную систему от сильных толчков. По мере улучшения равновесия моста переменное сопротивление можно уменьшать до нуля.

Измерения. После сборки схемы

- 1) установите переменное защитное сопротивление  $R_{NM}$  в среднее положение;
- 2) включите в магазине сопротивление в несколько десятков Ом;
- 3) движок реохорда мостика установите на середину шкалы;
- 4) замкните на короткое время цепь источника тока. При этом стрелка отклоняется от нулевого положения. **ВНИМАНИЕ!** Держать длительное время под током уравновешенную схему нельзя, так как нагревание всех частей схемы вызывает изменение их сопротивлений. Постепенно изменяя величину сопротивления в магазине, добейтесь предельного уменьшения отклонений гальванометра при неподвижном движке.
- 5) Если минимально возможное изменение сопротивлений в магазине приводит к отклонениям стрелки гальванометра то в одну, то в другую сторону от нуля, добейтесь уменьшения этих отклонений перемещением движка реохорда.
- 6) Если найдено положение движка, при котором гальванометр перестает давать отклонения при замыкании ключа, то следует постепенно уменьшать защитное сопротивление гальванометра. При этом передвигайте движок реохорда (или в магазине сопротивлений) всякий раз так, чтобы отклонения гальванометра становились незаметными при замыкании ключа  $K_1$ . Уравнивание моста заканчивается при защитном сопротивлении  $R_{NM}=0$ .
- 7) Измерьте и запишите в таблицу значения  $R_0$ ,  $l_1$  и  $l_2$ .
- 8) После окончания первого измерения перебросьте ключ  $K$  в новое положение—такое, чтобы сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  обменялись местами в плечах моста, и снова проделайте все операции по пунктам 1–7 в указанном порядке.

После этого измените сопротивление в магазине примерно на плюс-минус 10% и несколько сместите движок реохорда, чтобы разбалансировать мост, после чего проделайте весь цикл измерений (пункты 1–8) сначала.

С точки зрения теории измерений совокупность проделанных операций (фиксируемые  $R_0$ ,  $l_1$  и  $l_2$  при этом именуется наблюдениями) называется статистическим измерением. Среднее значение, найденное в результате всех наблюдений, и является результатом статистического измерения—оценкой истинного значения.

Отчет о работе включает отсчеты на реохорде, величины сопротивлений в магазине, результаты расчета  $R_x$  из отдельных наблюдений, среднее значение и оценку погрешностей измерений.

9) При выполнении задачи необходимо провести измерения двух неизвестных сопротивлений порознь, измерения сопротивления тех же двух сопротивлений, включенных последовательно, и, наконец, сопротивления тех же двух сопротивлений, включениях параллельно.

10) Последние два результата измерений надо сопоставить с величинами сопротивлений, рассчитанными по формулам для последовательного и параллельного соединения сопротивлений, пользуясь значениями сопротивлений, найденных при их раздельном измерении.

На простом мосте Уитстона возможно вести измерения с точностью до десятых долей Ома. Недостатком схема является то, что неконтролируемое сопротивление соединительных проводов прибавляется к величине измеряемого сопротивления и к величине сопротивления магазина. Этот недостаток существенно исправляется в схеме так называемого двойного моста, а принципиально он исключается при компенсационном методе измерения сопротивлений.

Вопрос о чувствительности мостовой схемы при разных режимах работы достаточно сложен, и обсуждение его выходит за рамки первоначального знакомства с работой схем.

## 2. Измерение сопротивления гальванометра

Для измерения сопротивления гальванометра пользуются методом мостика на постоянном токе с некоторыми изменениями в расположении его отдельных частей, позволяющая ограничить ток через гальванометр. Регулировка тока в этой схеме особенно важна, так как в отличие предыдущего эксперимента во время измерений через гальванометр всегда течет ток. Сила этого тока не должна превышать допустимой для данного гальванометра величины. Если сопротивление гальванометра или реохорда мало (порядка единиц или десятков Ом), используется схема, приведенная на рис. 3.

Ток от источника  $\mathcal{E}$  проходит через резистор LM переменного сопротивления с подвижным контактом N. К ключу  $K_1$  и точке N



присоединены концы одной диагонали AC мостика, а в другой диагонали BD находится ключ  $K_2$ .

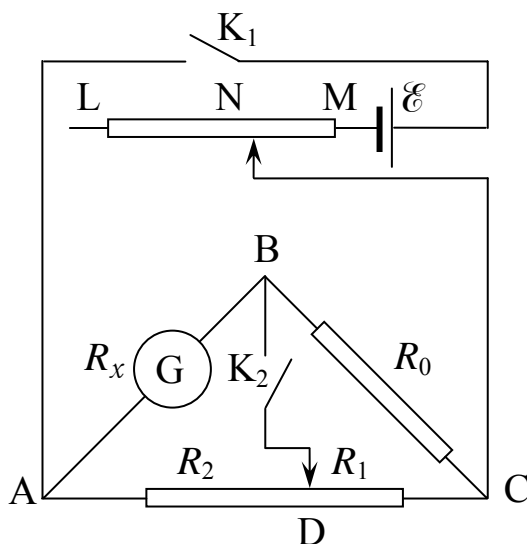


Рис. 3. Схема установки для измерения сопротивления гальванометра при малом сопротивлении реохорда

Гальванометр, сопротивление  $R_x$  которого измеряется, включен в одну из ветвей мостика; сопротивления  $R_0$ ,  $R_1$  и  $R_2$  служат тремя остальными ветвями мостика.

Меняя положение контакта N на реостате LM, мы тем самым изменяем силу тока в цепи от минимального, равного  $\mathcal{E}/(R_{LM} + R_{\text{мост}})$ , где  $R_{\text{мост}}$  — сопротивление всего моста (сопротивление между точками A и C при разомкнутом ключе  $K_1$ ), до максимального, равного  $\mathcal{E}/R_{\text{мост}}$ , причем  $R_{LM} \gg R_{\text{мост}}$ , поскольку сопротивление реохорда довольно мало. Вследствие этого изменяется величина силы тока, поступающего в схему, а следовательно, и величина силы тока через гальванометр.

Если же и сопротивление гальванометра, и сопротивление реохорда не малы, следует использовать схему, приведенную на рис. 4: к источнику схема подключается через переменное сопротивление, включенное по потенциометрической схеме. Потенциометр LNM делит приложенное к нему напряжение, равное (если внутреннее сопротивление источника пренебрежимо мало)  $\mathcal{E}$ . Меняя положение контакта N на реостате LM, мы тем самым изменяем разность потенциалов ( $V_A - V_C$ ) от нуля, когда контакт N совпадает с L, до некоторого максимума, когда контакт N совпадает с M; вследствие этого изменяется величина силы тока, поступающего в схему, а следовательно, и величина силы тока через гальванометр.

Этот способ включения источника тока, питающего схему, параллельно реостату, применен для деления напряжения источни-

ка  $\mathcal{E}$ . В измерительных схемах со слабыми токами этот прием распространен как удобный метод регулировки подаваемых в схему напряжений. Его применение можно проследить на примере целого ряда электроизмерительных задач.

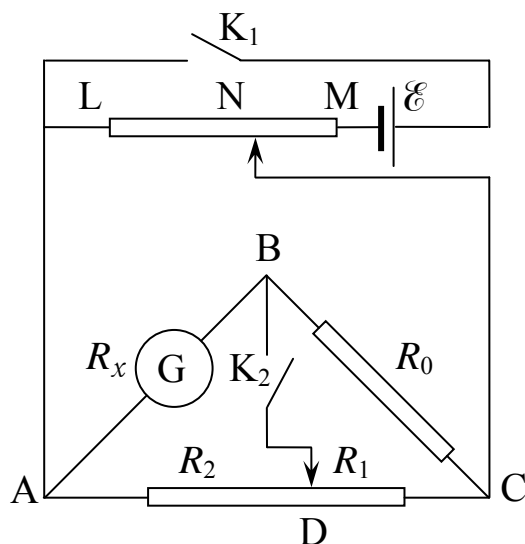


Рис. 4. Схема установки для измерения сопротивления гальванометра при значительном сопротивлении моста

Если потенциалы  $V_B$  и  $V_D$  равны, то сила тока в диагонали  $BD$  равна нулю, а потому замыкание и размыкание ключа  $K_2$  не будет вызывать изменения силы тока в ветвях мостовой схемы, в том числе и в ветви гальванометра  $G$ . Другими словами, при равенстве  $V_B$  и  $V_D$  замыкание ключа  $K_2$  не будет вызывать изменение в показаниях гальванометра. При равенстве же потенциалов  $V_B$  и  $V_D$  для мостика на постоянном токе имеет силу формула (4),

$$R_x = R_0 \frac{l_2}{l_1} = R_0 \frac{l_2}{l - l_2},$$

из которой непосредственно определяется измеряемое сопротивление  $R_x$  гальванометра, если  $R_0$  и отношение  $l_2/l_1$  известны.

Таким образом, мостовая схема может быть использована для измерений сопротивления не только в том случае, когда гальванометр включен в диагональ мостовой схемы, но и тогда, когда он включен в одно из плеч этой схемы. В этом случае надо при измерениях добиться постоянства показаний гальванометра при замыкании ключа в диагонали схемы. Такой прием существен именно для измерения сопротивления гальванометра, так как он не требует включения второго прибора в диагональ схемы для использования схемы в обычном порядке; измерения возможны и с одним измеряемым гальванометром.

Измерения. Соедините приборы по схеме рис. 3 или рис. 4. Далее:

- 1) включите в магазине  $R_0$  приблизительно 1 кОм.
- 2) Движок делителя напряжения установите близко к точке L, а движок D—на середину реохорда.
- 3) Замкните ключ  $K_1$  и передвигайте контакт N до тех пор, пока стрелка гальванометра не отклонится приблизительно на половину шкалы.
- 4) Замыкая ключ  $K_2$ , наблюдайте, в каком направлении изменяется отклонение гальванометра, и в зависимости от этого направления увеличивайте или уменьшайте включенное в магазине сопротивление  $R_0$ . Постепенно подыскивайте такое сопротивление  $R_0$ , чтобы при замыкании ключа  $K_2$  отклонение гальванометра совершенно не менялась. В этом случае  $R_x = R_0$ .
- 5) Если сопротивления в магазине  $R_0$  могут изменяться лишь слишком крупными для этой цели скачками, то окончательную установку на постоянство отклонений гальванометра производите путем перемещения в ту или иную сторону подвижного контакта D. В последнем случае имеем

$$R_x = R_0 \frac{l_2}{l_1} = R_0 \frac{l_2}{l - l_2},$$

где  $l_1$  и  $l_2$ —длина реохорда.

### 3. Измерение внутреннего сопротивления источника питания

Измерительная схема для измерения внутреннего сопротивления аккумулятора или гальванического источника питания (рис. 5) представляет собой мостовую схему на постоянном токе, но распределение токов в ветвях схемы и принцип использования этой схемы отличаются от обычного использования схемы моста на постоянном токе.

В процессе измерений необходимо добиться того, чтобы замыкание ключа  $K_2$  в диагонали мостовой схемы не вызывало изменений силы тока в гальванометре G. Если это достигнуто, то вступает в силу известная пропорция, связывающая четыре сопротивления в ветвях схемы, в одну из которых теперь включен источник питания с неизвестным внутренним сопротивлением. Ниже приводится подробный расчет работы схемы. Изображенное на схеме рис.4 переменное сопротивление  $R_3$  предназначено для защиты гальванометра от перегрузок.

Рассмотрим схему на рис. 5. Мы видим, что гальванометр  $G$  включен в ответвление  $NM$  диагонали  $AC$ ; в диагонали  $BD$  стоит ключ  $K_2$  и в ветви  $AB$ —источник питания  $\mathcal{E}$ , сопротивление которого измеряется. Буквами  $R_x, R_0, R_1, \dots, R_4$  обозначены сопротивления, буквами  $I_x, I_0, I_1, \dots, I_4$  соответствующие токи при замкнутых ключах  $K_1$  и  $K_2$ . Стрелки обозначают направления токов.

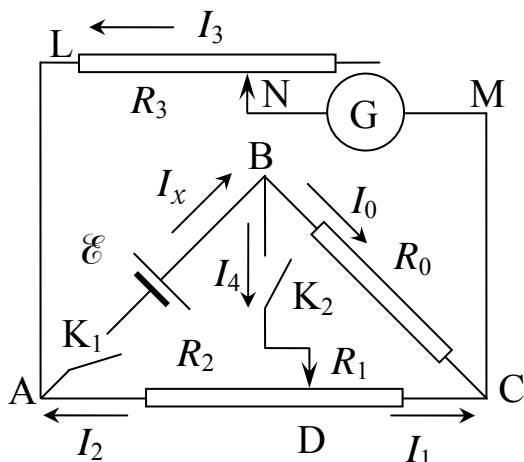


Рис. 5. Измерительная схема для измерения внутреннего сопротивления нестабилизированного источника питания

Первый закон Кирхгофа при замкнутых ключах  $K_1$  и  $K_2$  для точек  $B, A, C$  дает (см. Приложение)

$$I_x = I_0 + I_4; \quad I_x = I_3 + I_2; \quad I_3 = I_0 + I_1.$$

Исключим в этих соотношениях токи  $I_0, I_2$  и  $I_1$ :

$$I_0 = I_x - I_4; \quad I_2 = I_x - I_3; \quad I_1 = I_3 - I_0 = I_3 - I_x + I_4. \quad (5)$$

Второй закон Кирхгофа при тех же условиях для контуров  $ABCMA$  и  $ACMA$  дает ( $R_G$ —сопротивление гальванометра)

$$I_x R_x + I_0 R_0 + I_3 (R_3 + R_G) = \mathcal{E};$$

$$-I_2 R_2 + I_1 R_1 + I_3 (R_3 + R_G) = 0,$$

или после исключения токов  $I_2, I_1$  и  $I_0$ ,

$$I_x R_x + (I_x - I_4) R_0 + I_3 (R_3 + R_G) = \mathcal{E};$$

$$-(I_x - I_3) R_2 + (I_3 - I_x + I_4) R_1 + I_3 (R_3 + R_G) = 0. \quad (6)$$

Предположим, что размыкание ключа  $K_2$  не изменяет тока  $I_3$ , а следовательно, и тока, текущего через гальванометр. Разомкнем ключ  $K_2$ , тогда должно быть  $I'_3 = I_3, I'_4 = 0$  и  $\mathcal{E} = \text{const}$ , но  $I_x$ , вообще говоря, примет значение  $I'_x \neq I_x$ ; получим

$$I'_x R_x + I'_x R_0 + I_3 (R_3 + R_G) = \mathcal{E};$$

$$-(I'_x - I_3) R_2 + (I_3 - I'_x) R_1 + I_3 (R_3 + R_G) = 0, \quad (7)$$

Сравнивая с (6), можем записать

$$\begin{aligned} I'_x(R_x + R_0) + I_3(R_3 + R_G) &= I_x R_x + (I_x - I_4)R_0 + I_3(R_3 + R_G); \\ -(I'_x - I_3)R_2 + (I_3 - I'_x)R_1 &= -(I_x - I_3)R_2 + (I_3 - I_x + I_4)R_1, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} (I_x - I'_x)(R_x + R_0) &= I_4 R_0; \\ (I_x - I'_x)(R_2 + R_1) &= I_4 R_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Отсюда

$$I_x - I'_x = \frac{I_4 R_0}{R_x + R_0} = \frac{I_4 R_1}{R_2 + R_1}, \quad (9)$$

или

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_x}{R_0},$$

и

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_1} = R_0 \frac{l_2}{l_1} = R_0 \frac{l_2}{l - l_2}.$$

Итак, если замыкание или размыкание ключа  $K_2$  в одной диагонали ВD не влияет на ток  $I_3$  в другой, то выполняется соотношение (4).

Если сопротивление  $R_0$  заведомо велико по сравнению с  $R_x$  ( $R_1 \ll R_0$ ), то почти весь ток  $I_3$  проходит по пути ВDС через  $R_1$ . В этом случае размыкание ключа  $K_2$  вызовет уменьшение тока  $I_3$  через гальванометр. Если, наоборот,  $R_0 = 0$ , потенциалы точек В, D, С равны при замкнутом ключе  $K_2$ , а падение напряжения между точками С и А равно

$$I_2 R_2 = I_3 (R_3 + R_G) = \mathcal{E} - I_x R_x,$$

где последний член представляет собой падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника;  $I_x = I_2 + I_3 \approx I_2$ , если сопротивление реохорда мало, так что  $R_3 + R_G \gg R_1 + R_2$ , то в этом случае  $I_2 R_2 \approx \mathcal{E} - I_2 R_x$ .

$$I_2 \approx \frac{\mathcal{E}}{R_2 + R_x}; \quad I_3 \approx \frac{\mathcal{E} - I_2 R_x}{R_3 + R_G} \approx \frac{\mathcal{E}}{R_3 + R_G} \left( 1 - \frac{R_x}{R_2 + R_x} \right). \quad (10)$$

При размыкании ключа  $K_2$  ток  $I_2$ , а соответственно и ток  $I_x$ , уменьшатся, уменьшится падение напряжения  $R_x I_x$  на внутреннем сопротивлении источника и соответственно возрастет разность потенциалов  $V_C - V_A$ :

$$V_C - V_A = I_3'' (R_3 + R_G) = I_2'' (R_2 + R_1) \approx \mathcal{E} - I_2'' R_x.$$

Поэтому ток  $I_3''$  через гальванометр возрастет:

$$I_2'' = \frac{\mathcal{E}}{R_x + R_2 + R_1}; \quad I_3'' = \frac{\mathcal{E} - I_2'' R_x}{R_3 + R_G} = \frac{\mathcal{E}}{R_3 + R_G} \left( 1 - \frac{R_x}{R_x + R_2 + R_1} \right). \quad (11)$$

Его можно уменьшить до значения  $I_3$ , определяемого формулой (10), увеличением  $R_0$ . Поскольку при разомкнутом ключе  $K_2$  сопротивление  $R_0$  включено последовательно с  $R_x$ , сила тока  $I_3'$  через гальванометр равна

$$I_3' = \frac{\mathcal{E}}{R_3 + R_G} \left( 1 - \frac{R_x + R_0}{R_x + R_0 + R_2 + R_1} \right) \quad (12)$$

(это выражение получено из выражения (11) простой заменой  $R_x$  на  $R_x + R_0$ ). При равенстве тока  $I_3'$ , определяемого формулой (7), току  $I_3$ , определяемому формулой (10), имеет место соотношение

$$\frac{R_x}{R_2 + R_x} = \frac{R_x + R_0}{R_x + R_0 + R_2 + R_1},$$

откуда

$$\begin{aligned} R_x^2 + R_0 R_x + R_2 R_x + R_1 R_x &= R_x R_2 + R_0 R_2 + R_x^2 + R_0 R_x \\ R_1 R_x &= R_0 R_2, \end{aligned}$$

что приводит к соотношению (4). Однако к этому соотношению мы пришли в предположении, что влиянием тока  $I_3$  через гальванометр на падение напряжения  $R_x I_x$  на внутреннем сопротивлении источника можно пренебречь. В противном случае при равенстве  $I_3'$  и  $I_3$  условие (4) баланса моста не достигается, и при замыкании ключа  $K_2$  показания гальванометра несколько изменятся. Немного увеличив сопротивление  $R_0$ , можно добиться баланса моста.

Этот метод измерения внутреннего сопротивления источника питания применим в том случае, если оно не сопоставимо с сопротивлениями соединительных проводов в плечах моста. Поэтому этим методом нельзя измерять внутреннее сопротивление аккумуляторов, которое, например, для аккумуляторов большой емкости в нормальных условиях достигает значений лишь в несколько сотых долей Ома.

**Измерения.** Соедините при отключенном источнике питания все приборы по схеме рис. 5. Далее:

- 1) Переменное сопротивление  $R_3$  установите в среднее значение, чтобы при случайном замыкании ключей не испортить гальванометр.
- 2) В реохорде АС подвижный контакт D установите в среднее положение ( $l_1 = l_2$ ).

- 3) Сопротивление  $R_0$  сделайте равным нулю.
- 4) Подключают источник питания к сети. Кратковременно замыкая ключ  $K_1$  при разомкнутом ключе  $K_2$ , уменьшением переменного сопротивления  $R_3$  добейтесь отклонения стрелки гальванометра на конец шкалы.
- 5) Замкните ключ  $K_2$  и при кратковременно замкнутом ключе  $K_1$  снимите показание гальванометра  $I_3$ .
- 6) Разомкните ключ  $K_2$ . Кратковременно замыкая ключ  $K_1$ , увеличивайте сопротивление магазина  $R_0$  до тех пор, пока сила тока через гальванометр не уменьшится до значения, равного  $I_3$ .
- 7) Если при размыкании и замыкании ключа  $K_2$  показания гальванометра будут меняться (хоть и незначительно), сопротивление магазина  $R_0$  несколько увеличьте, пока при размыкании и замыкании ключа  $K_2$  показания гальванометра не перестанут изменяться.
- 8) При необходимости балансировку моста окончательно производите подвижным контактом реохорда.
- 9) Сопротивление  $R_x$  вычислите по формуле (4).

### Приложение. Правила Кирхгофа

1. В каждой точке разветвления проводов алгебраическая сумма сил токов равна нулю. Токи, условно принятые идущими к точке разветвления (узлу), и токи, исходящие из нее, записываются с разными знаками.
2. Сумма ЭДС (электродвижущих сил), действующих в произвольном замкнутом контуре любой электрической цепи, равна сумме произведений сил токов в отдельных участках этого контура на сопротивления этих участков.

При применении правил Кирхгофа следует:

- 1) направления токов, втекающих и вытекающих из точки разветвления (узла), обозначать стрелками, не задумываясь, куда эти токи идут. Если вычисление покажет, что  $I_k > 0$ , то его направление указано правильно. Если  $I_k < 0$ , то истинное направление этого тока противоположно направлению стрелки;
- 2) выбрав произвольный замкнутый контур, все его участки следует обойти в одном направлении. Если это направление совпадает с направлением стрелки, то слагаемое  $I_k R_k$  берется со знаком «+», в противном случае со знаком «-». Если при обходе контура источник тока проходится от отрицательного полюса к положительному (в направлении действия сторон-

ней силы), то его ЭДС следует считать положительной, в противном случае—отрицательной;

- 3) если выписать правила Кирхгофа для всех контуров и узлов, то получится больше уравнений, чем необходимо, поскольку не все уравнения независимы. Выписывая очередное уравнение для замкнутых контуров, необходимо следить, чтобы оно содержало хотя бы одну величину, не вошедшую в предыдущие уравнения; если все величины уже встречались в предшествующих уравнениях, то это уравнение лишнее. Аналогично поступаем и при выписывании уравнений для узлов.

Все ЭДС и все сопротивления цепи должны входить в систему уравнений, иначе она не будет полной и не позволит рассчитать все токи и все напряжения в этой цепи.

### **Указания по технике безопасности**

1. Используйте источник питания с напряжением на выходе не более 3 В во избежание нагрева нихромовой проволоки реохорда.
2. Монтаж схемы производится только при отключенном от сети источнике питания.
3. Не допускайте зашкаливания гальванометра. При смене измеряемого сопротивления разомкните ключ и установите наибольшее защитное сопротивление. Всегда устанавливайте это сопротивление наибольшим, когда есть вероятность существенно разбалансировать мост.

### **Контрольные вопросы**

1. Изменится ли условие равновесия моста, если гальванометр и источник тока поменять местами?
2. Почему гальванометр, применяемый в мостике Уитстона, имеет двустороннюю шкалу?
3. Запишите правила Кирхгофа (см. Приложение) для неуравновешенного моста и выведите из них условие равновесия.

### **Литература**

1. Калашников С.Г. Электричество.—М.:Наука,1977 .—С.39–42, 112–118, 125–126, 132–137.
2. Матвеев А.И. Электричество и магнетизм.—М.: Высшая школа, 1983.—С.198–217.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.III. Электричество.—М.: Наука, 1977.—С.174–177, 190, 194–201.