

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

М.Л. Игольников

Лабораторная работа № 3Б
Измерение сопротивления
методом моста Уитстона

Ярославль
2006

Оглавление

1. Цель работы	3
2. Подготовка к лабораторной работе	3
3. Краткая теория	4
4. Описание экспериментальной установки	7
5. Задание и порядок его выполнения	9
6. Содержание отчета	11

Лабораторная работа № 3Б.

Измерение сопротивления методом моста Уитстона

1. Цель работы

1. Изучить метод работы моста Уитстона для измерения сопротивлений на постоянном токе.
2. Приобрести навыки в проведении измерений сопротивлений указанным методом.
3. Экспериментально проверить точность метода путём сопоставления результатов измерений с номинальными значениями сопротивления резисторов.
4. Экспериментально проверить справедливость формул для последовательного и параллельного соединений сопротивлений путём сопоставления результатов расчётов и измерений.
5. Приобрести навыки количественной оценки точности результатов измерений и расчётов.

2. Подготовка к лабораторной работе

1. Уясните цель и содержание работы.
2. Изучите рекомендуемую литературу:
 - Телеснин Р.В., Яковлев В.Ф. "Курс физики", Электричество. М., 1970, §§ 47-50, 54, 57, 58.
 - Калашников С.Г. "Электричество", М., 1977, §§ 57-50, 70.
3. Дайте ответы на контрольные вопросы:
 - Как рассчитать максимальную абсолютную погрешность электроизмерительного прибора?

- Объясните сущность метода измерения сопротивлений с помощью моста Уитстона. Приведите схему моста. Выведите расчётную формулу.
 - Рассчитайте положение движка реохорда в мосте Уитстона, при котором относительная погрешность измерений будет минимальной.
 - Выведите формулу для эквивалентного сопротивления двух последовательно соединённых резисторов.
 - Выведите формулу для эквивалентного сопротивления двух параллельно соединённых резисторов.
4. Изучите принципиальную схему лабораторной установки, ознакомьтесь с приданными к ней приборами, уясните назначение элементов схемы и методику измерений.
 5. Повторите правила техники безопасности.

3. Краткая теория

Мост Уитстона предназначен для измерения сопротивлений методом сравнения. При этом методе не требуется измерять токи и напряжения, что обуславливает получение более точных результатов.

Принципиальная схема моста Уитстона, работающего на постоянном токе, представлена на рисунке 3.1.

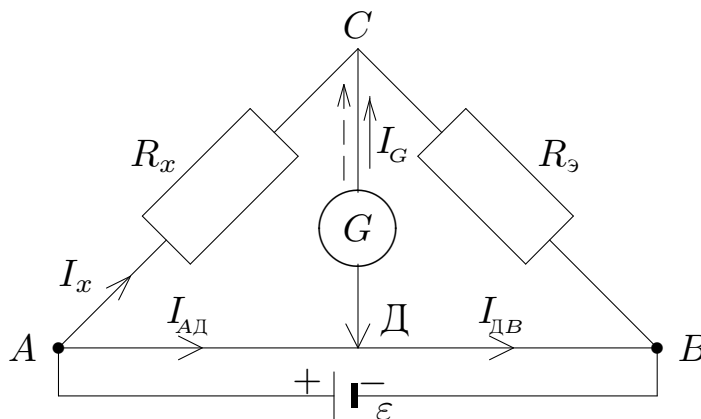


Рис. 3.1

Мост Уитстона состоит из реохорда AB , гальванометра G и двух резисторов — с известным эталонным сопротивлением R_3 и неизвестным

сопротивлением R_x . Питание моста осуществляется источником тока с ЭДС.

Реохорд представляет собой однородный проводник в виде струны, укрепленной на панели с измерительной линейкой. Вдоль струны реохорда может перемещаться подвижной контакт D , который делит сопротивление струны реохорда на части R_{AD} и R_{DB} , величины которых однозначно определяются длиной соответствующих участков струны ℓ_{AD} и ℓ_{DB} :

$$R_{AD} = \rho \frac{\ell_{AD}}{S} \quad (3.1)$$

и

$$R_{DB} = \rho \frac{\ell_{DB}}{S}. \quad (3.2)$$

ρ — удельное сопротивление струны реохорда.

S — площадь поперечного сечения струны реохорда.

Гальванометром называется электроизмерительный прибор с неградуированной шкалой, имеющий высокую чувствительность к току или напряжению. В схеме моста используется гальванометр магнитоэлектрической системы с нулём на середине шкалы, что позволяет фиксировать токи противоположных направлений. Он используется в качестве нулевого прибора, предназначенного для установления отсутствия тока в ветви CD схемы моста.

В случае произвольного положения движка D ток гальванометра $I_G \neq 0$. При этом токи $I_x \neq I_y$, а $I_{AD} \neq I_{DB}$; потенциалы точек C и D отличаются друг от друга в ту или иную сторону: $\varphi_c > \varphi_d$ или $\varphi_c < \varphi_d$. Соотношение потенциалов φ_c и φ_d определяет направление тока гальванометра I_G .

Очевидно, что $\varphi_A > \varphi_c > \varphi_d$ и $\varphi_A > \varphi_d > \varphi_B$, то есть потенциалы точек C и D имеют промежуточное значение между потенциалами точек A и B . Поэтому, перемещая контакт D , можно обеспечить равенство потенциалов точек C и D , то есть $\varphi_c = \varphi_d$. В этом случае ток, протекающий через гальванометр, будет равен нулю ($I_G = 0$), а мост окажется балансированным или уравновешенным. В состоянии равновесия очевидны равенства:

$$I_x = I_y; \quad I_{AD} = I_{DB}$$

$$\varphi_A - \varphi_c = \varphi_A - \varphi_d; \quad \varphi_c - \varphi_B = \varphi_d - \varphi_B.$$

При этом пусть $\ell_{AD} = \ell_1$, а $\ell_{DB} = \ell_2$. На основании закона Ома для участка цепи без ЭДС, можно записать, что

$$\varphi_A - \varphi_c = I_x R_x; \quad \varphi_A - \varphi_d = I_{AD} R_{AD}$$

$$\varphi_c - \varphi_B = I_x R_{\text{э}}; \quad \varphi_{\text{Д}} - \varphi_B = I_{\text{АД}} R_{\text{ДВ}}.$$

Следовательно,

$$I_x R_x = I_{\text{АД}} \cdot R_{\text{АД}}, \quad (3.3)$$

$$I_x R_{\text{э}} = I_{\text{АД}} \cdot R_{\text{ДВ}}. \quad (3.4)$$

Деля почленно уравнения (3.3) на уравнение (3.4), получим:

$$\frac{R_x}{R_{\text{э}}} = \frac{R_{\text{АД}}}{R_{\text{ДВ}}}. \quad (3.5)$$

Решая (3.5) относительно R_x с учётом соотношений (3.1) и (3.2), будем иметь

$$R_x = R_{\text{э}} \frac{R_{\text{АД}}}{R_{\text{ДВ}}} = R_{\text{э}} \frac{\rho l_1}{S \rho l_2} \cdot S = R_{\text{э}} \frac{l_1}{l_2}.$$

Следовательно,

$$R_x = R_{\text{э}} \frac{l_1}{l_2},$$

где l_1 и l_2 — длины участков реохорда AD и DB , соответствующие условию баланса моста.

Эти длины связаны соотношением: $l_1 + l_2 = l$, где l — полная длина струны реохорда.

Тогда

$$R_x = R_{\text{э}} \frac{l_1}{l - l_1}. \quad (3.6)$$

Относительная погрешность измерения сопротивления методом моста Уитстона определяется выражением:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l}{l - l_1} + \frac{\Delta l_1}{l - l_1}. \quad (3.7)$$

Величина $\frac{\Delta R_{\text{э}}}{R_{\text{э}}}$ задаётся классом точности магазина эталонных сопротивлений.

Найдем условия минимума погрешности (3.7):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)'_{l_1} &= -\frac{\Delta l_1}{l_1^2} + \frac{\Delta l}{(l - l_1)^2} + \frac{\Delta l_1}{(l - l_1)^2} = \\ &= \frac{\Delta l_1 (l_1^2 + 2ll_1 - l^2) + \Delta l l_1^2 - \Delta l_1 l_1^2}{l_1^2 (l - l_1)^2}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

4. Описание экспериментальной установки

Приравнивая к нулю числитель равенства (3.8) и полагая $\Delta l_1 = \Delta l \neq 0$, приходим к уравнению:

$$l_1^2 + 2ll_1 - l^2 = 0 \quad (3.9)$$

Решение квадратного уравнения (3.9) имеет вид:

$$l_1 = -l \pm \sqrt{2} \cdot l. \quad (3.10)$$

Физический смысл имеет лишь один из корней уравнения (3.9):

$$l_1 = -l + l\sqrt{2} = l(\sqrt{2} - 1) = 0.41l,$$

то есть

$$l_1 = 0.41l. \quad (3.11)$$

Таким образом, погрешность измерений минимальная, когда подвижной контакт D реохорда расположен примерно на середине его шкалы.

Следовательно, измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона сводится к определению длины плеча реохорда, соответствующей условию баланса моста с последующим расчётом величины неизвестного сопротивления по формуле (3.6).

При этом следует помнить, что минимальная погрешность измерений имеет место при выполнении условия (3.11), что требует соответствующего подбора величины эталонного сопротивления R_3 в процессе проведения измерений.

4. Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема установки для измерения сопротивлений с помощью моста Уитстона представлена на рисунке 4.1.

В состав установки входят:

- источник постоянного тока с ЭДС порядка 1.3-1.5 В;
- реохорд с длиной струны = 505 мм;
- высокочувствительный гальванометр G с нулём на середине шкалы;
- кнопка Kn с самовозвращающимся замыкающим контактом;
- выключатель двухполюсный B , в качестве которого используется двух полюсный переключатель;

- магазин сопротивлений R_3 типа Р32 с классом точности 0.2;
- резистор балластный R_6 с сопротивлением порядка 10 Ом, размещённый на корпусе кнопки $КН$;
- резистор R_x , сопротивление которого, подлежит измерению (два резистора с сопротивлениями (390 ± 20) Ом; $\frac{\Delta R}{R} = 5\%$ и (1200 ± 60) Ом; $\frac{\Delta R}{R} = 5\%$).

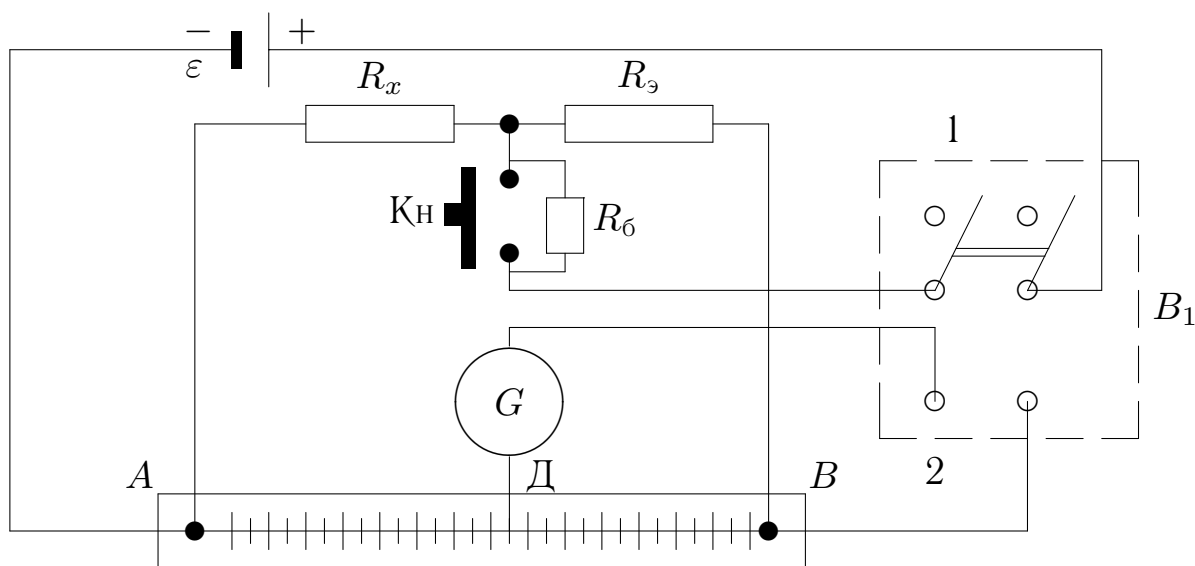


Рис. 4.1

При проведении измерений гальванический элемент G подключается к реохорду выключателем B **только на короткое время установления нулевого тока** гальванометра. Это делается для того, чтобы не нагревалась струна реохорда и не разряжался источник тока E . Выключатель B устроен так, что первоначально подключается источник постоянного тока E , а вслед за ним замыкается цепь гальванометра G , через балластный резистор R_6 . Выключение проходит в обратном порядке. Это необходимо для предотвращения протекания через гальванометр экстратоков замыкания и размыкания. Исходное положение выключателя B — 1. И только на время измерения он переводится в положение 2, после чего вновь выключается, то есть переводится в положение 1.

Балластный резистор R_6 служит для ограничения силы тока, протекающего через гальванометр, что предотвращает выход его из строя при большой разбалансировке моста. Однако, при этом понижается чувствительность измерительной цепи. Для повышения чувствительности моста к установке нулевого значения тока гальванометра и, следовательно, уточнения измерения длины участка реохорда, соответствующего условию ба-

5. Задание и порядок его выполнения

ланса моста, используются нормально разомкнутые контакты кнопки K_n . При нажатии на кнопку указанные контакты замыкаются накоротко, шунтируя балластный резистор R_6 , сопротивление которого становится равным нулю, что и приводит к увеличению силы тока в цепи гальванометра. Чувствительность моста возрастает.

!!!ВНИМАНИЕ!!!

Включение кнопки K_n допускается только после установления нулевого тока гальванометра при заниженной чувствительности моста. ($R_6 = 0$)!

Магазин сопротивления позволяет подбирать такое значение эталонного сопротивления R_9 , при котором балансировка моста достигается при мини мальной погрешности измерений.

Измерение длин участков реохорда, соответствующих условиям баланса моста, производится с помощью визирных линий ползунка реохорда и миллиметровой линейки, укрепленной на шасси последнего.

Абсолютная погрешность измерения длин порядка одного миллиметра.

5. Задание и порядок его выполнения

Измерение сопротивлений на постоянном токе мостом Уинстона.

1. Собрать схему моста (рис. 4.1) и получить разрешение на проведение измерений.
2. Измерить поочередно сопротивления приданных резисторов и результирующие сопротивления при их последовательном и параллельном соединении, придерживаясь следующей методики. Установить движок реохорда на отметке 0.21 (210 мм) и, кратковременно переводя выключатель B в положение 2, добиться грубой балансировки моста путём подбора величины эталонного сопротивления R_9 . При этом получить точный баланс, как правило, не представляется возможным вследствие дискретного изменения сопротивления магазина R_{32} . Можно удовлетвориться положением стрелки гальванометра вблизи нулевого значения. Полученное значение эталонного сопротивления R_9 записать для каждого случая в отдельную таблицу, форма которой соответствует таблице 1. Затем перевести

выключатель B в положение 2, и перемещая движок реохорда, получить нулевое значение тока гальванометра. С помощью кнопки накоротко замкнуть балластный резистор R_6 и уточнить балансировку моста. Отпустить кнопку Kn , перевести выключатель B в положение 1 и записать значение в соответствующие таблицы.

Для каждого резистора и для каждого вида их соединения измерение длины участка реохорда ℓ_1 , соответствующего балансу моста, производить указанным методом не менее 7 раз, смещая движок реохорда от установленного ранее значения в ту или иную сторону.

3. Произвести статистическую обработку результатов измерений.
4. Сопоставить измеренные значения сопротивления резисторов R_1 и R_2 с их номинальными значениями и дать аргументированное заключение о состоятельности метода измерений.
5. Рассчитать теоретические значения результирующих сопротивлений при последовательном ($x = 3$) и параллельном ($x = 4$) соединении резисторов R_3 и R_4 по формулам:

$$R_{3T} = R_1 + R_2 \quad (5.12)$$

$$R_{4T} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.13)$$

Определить погрешности теоретических значений сопротивлений резисторов R_{3T} и R_{4T} дифференциальным методом. Результаты расчётов записать в соответствующие таблицы.

6. Сопоставить теоретическое значение сопротивлений R_{3T} и R_{4T} с их значениями, полученными в результате измерений (см. пункт 2). Дать аргументированное заключение о справедливости формул (5.12) и (5.13).
7. Представить преподавателю или лаборанту для проверки результаты измерений и расчётов.
8. С разрешения преподавателя разобрать экспериментальную установку.

6. Содержание отчета

Таблица 1

$R_9 =$ [Ом]; $x =$; $R_{xH}(R_{xT}) =$ () [Ом]					
i	l_i [мм]	$R_{xi} = R_9 \frac{l_i}{l-l_i}$ [мм]	$\Delta R_{xi} = \bar{R}_x - R_{xi}$ [Ом]		ΔR_{xi}^2 [Ом]
			+	-	
1					
2					
3					
⋮					
7					
$k =$	$\bar{R}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{xi} =$	$\sum \Delta R_{xi} = +$	$\sum \Delta R_{xi} = -$	$\sum_{i=1}^n \Delta R_{xi}^2 =$	
$j =$		$\sum_{i=1}^n \Delta R_{xi} =$			

где k — номера измерений, оказавшихся промахами;
 j — число промахов;
 x — номер резистора;
 R_{xH} — номинальное значение для $x = 1$ и 2;
 R_{xT} — теоретическое значение для $x = 3$ и 4.

6. Содержание отчета

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Принципиальная схема экспериментальной установки (рис. 4.1).
3. Таблицы экспериментальных данных (табл. 1) и содержание расчетов со противлений и соответствующих погрешностей.
4. Краткие выводы с анализом полученных результатов.
5. Дата выполнения работы и подпись преподавателя.