

## Очень малые сопротивления

### Условие

#### Задание 1. «Очень малые сопротивления»

В данной задаче вам необходимо, используя простое школьное оборудование, измерить малые сопротивления стальной проволоки, соединительного провода, амперметра.

Если в качестве источника вам предоставлена батарейка, то подключайте ее к цепи только на время измерений. Отключайте ее от цепи с помощью ключа, когда измерения не проводятся. Иначе батарейка может быстро разрядиться!

#### Приборы и оборудование:

1. Вольтметр школьный 6 В. 2. Амперметр школьный 2 А. 3. Реостат. 4. Ключ. 5. Провода соединительные. 6. Линейка 40 см. 7. Источник питания ЛИП, или батарейка 4,5 В. 8. Скотч узкий (один на всех) 9. Проволока стальная без изоляции.

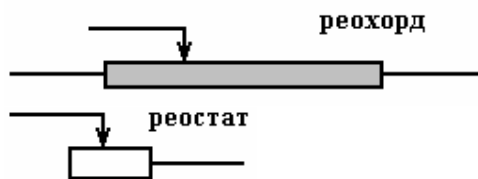
Выберите два одинаковых соединительных проводка (в наборе они должны быть отмечены). В дальнейшем амперметр и вольтметр подключайте к другим приборам только с помощью этих выделенных проводов – вам необходимо будет определить их сопротивление!

Изготовьте реохорд (если его не сделали для вас другие): натяните стальную проволоку без изоляции вдоль шкалы линейки и закрепите ее концы с помощью скотча. Вам придется «подключаться не только к концам проволоки, но и к ее центральной части – последнее проводите с помощью кусочка жесткой проволоочки – щупа. Для лучшего контакта хорошо прижимайте пальцами щуп к боковой поверхности проволоки при измерениях.

В дальнейшем на схемах данный реохорд обозначается как удлинненный переменный резистор: «традиционный» реостат обозначается «традиционно»:

#### Часть 1. Сопротивление проволоки.

Соберите электрическую схему, показанную на рисунке 1.



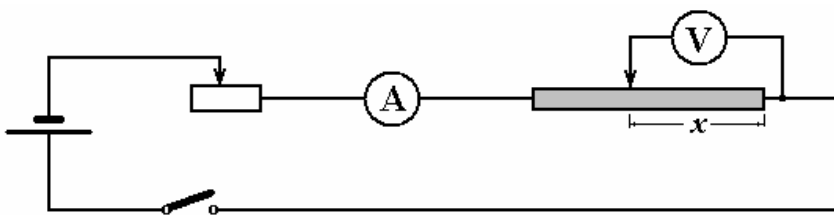


Рис. 1

**1.1** Измерьте зависимость напряжения на участке проволоки (длиной  $x$ ) и силы тока в цепи от длины участка  $x$  при двух положениях движка реостата.

Сила тока в цепи не должна превышать 1,3 А.

**1.2** Постройте графики полученных зависимостей. Кратко объясните вид полученных зависимостей.

**1.3** Используя полученные данные, определите  $r$  - сопротивление 1 мм стальной проволоки.

## Часть 2. Реостат.

**2.1.** Используя имеющиеся приборы, установите движок реостата так, чтобы его сопротивление между выводами равнялось  $R_0 = 1,3$  Ом. Нарисуйте схему, с помощью которой вам удалось выполнить данное задание. Приведите результаты необходимых измерений.

В дальнейшем сопротивление реостата не изменяйте!

## Часть 3. Амперметр и соединительные провода.

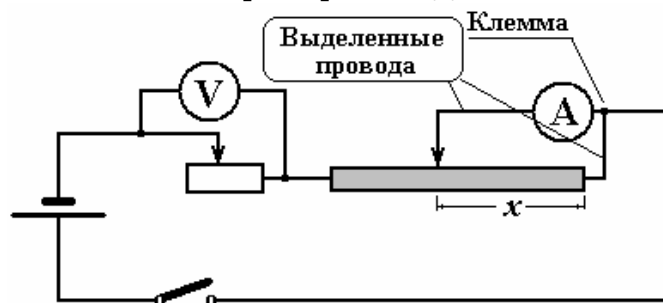


Рис. 2

**3.1.** Соберите схему, показанную на рис. 2.

Амперметр подключайте с помощью выделенных соединительных проводов. Один из этих проводов присоедините к концу проволоки реохорда, к концу второго подключите щуп. Провод от источника подключайте к клемме амперметра, а не к концу проволоки реохорда.

Будьте аккуратны при проведении этих измерений (как, впрочем, и остальных).

**3.2** Измерьте зависимости силы тока через амперметр и напряжения на реостате от длины участка проволоки  $x$ , к которой подключен амперметр. Постройте графики этих зависимостей.

**3.3** Получите теоретическую формулу, связывающую измеренные значения силы тока и напряжения с длиной участка  $x$ . В эту формулу должны входить и параметры вашей цепи: сопротивления реостата  $R_0$ , сопротивление амперметра  $R_A$ , сопротивление единицы длины проволоки реохорда  $r$ , сопротивление выделенных соединительных проводов  $R_{с.п.}$ .

**3.4** Используя полученные в п. 3.2 экспериментальные данные, проверьте справедливость полученной формулы. Определите сопротивление амперметра и выделенного соединительного провода.

*Погрешность результатов в данном пункте оценивать не следует, так как измерения носят оценочный характер.*

## Решение

### Задание 1. «Очень малые сопротивления»

Данное задание требует особой тщательности измерений, особенно важно следить за наличием контакта между проволокой реохорда и проводом, соединяющим его с измерительным прибором. Для проведения измерений в качестве «щупа» можно использовать небольшой кусочек жесткой проволоочки – нами использовалась медная проволочка от канцелярской скрепки. Обращаем внимание на необходимость использования двух одинаковых соединительных проводков (лучше чтобы они были стальными – у них сопротивление немного больше, чем у медных) при подключении амперметра в Части 3.

Во всех измерениях, связанных с изменением длины части реохорда, удобно перемещать контакт до тех пор, пока стрелка прибора не совпадет с одним из делений шкалы – в этом случае следует определять положение контакта  $x$ . Таким образом достигается большая точность измерений (нет необходимости «высматривать» доли делений шкалы амперметра и вольтметра).

#### Часть 1.

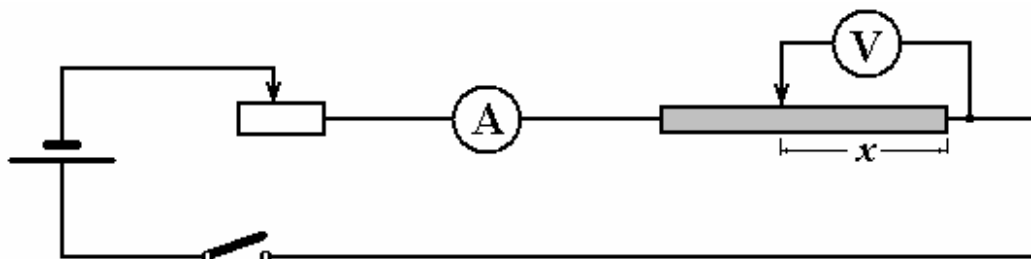
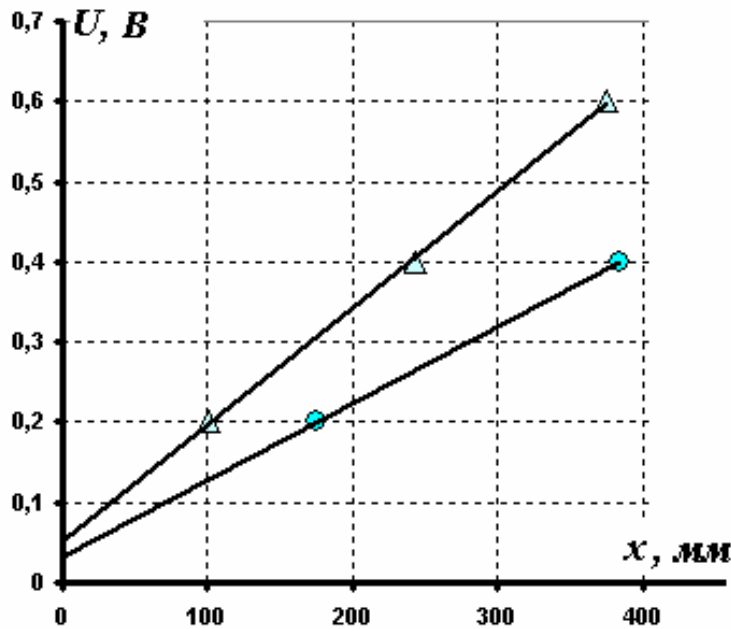


Рис. 1

При указанном соединении сила тока в цепи практически не зависит от величины  $x$ , что свидетельствует о крайней малости сопротивления проволоки реохорда по сравнению с сопротивлением вольтметра. Об этом же свидетельствуют и малые величины измеряемых напряжений. Поэтому измерения следует проводить при больших токах. Так как напряжения малы, то при токах порядка 1 А удастся получить значения всего в двух-трех точках.

Результаты измерений приведены в Таблице 1 и на графике 1.

| $U$ , В | $x$ , мм    |             |
|---------|-------------|-------------|
|         | $I = 1,1$ А | $I = 1,3$ А |
| 0,2     | 175         | 101         |
| 0,4     | 385         | 243         |
| 0,6     |             | 376         |



**Рис. 1** Зависимость напряжения от длины участка проволоки

Рис. 1 Зависимость напряжения от длины участка проволоки

График, построенный по трем точкам линейен, поэтому и вторая зависимость также построена как линейная. Важно отметить, что при  $x \rightarrow 0$  эти прямые не проходят через нуль, что является следствием заметного сопротивления контакта  $R_{\text{конт.}}$  между концом проволоки реохорда и соединительным проводом. Важно отметить, что при  $x \rightarrow 0$  прямые приходят практически в одну точку.

Легко показать, что данная зависимость определяется законом Ома для участка цепи

$$U = I(rx + R_{\text{конт.}}). \quad (1)$$

Для определения искомого сопротивления единицы длины проволоки реохорда следует воспользоваться выражением

$$r = \frac{1}{I} \frac{\Delta U}{\Delta x}. \quad (2)$$

Расчет по этой формуле приводит к следующим результатам (коэффициенты наклона  $\frac{\Delta U}{\Delta x}$  можно снять с графиков, можно воспользоваться таблицей):

Для тока  $I = 1,3\text{A}$ :

$$r = \frac{1}{1,3} \cdot \frac{0,6 - 0,2}{376 - 101} \approx 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ом}}{\text{мм}}$$

Для тока  $I = 1,1\text{A}$ :

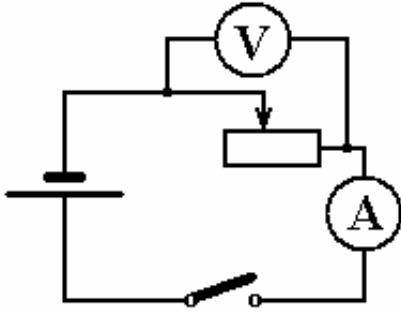
$$r = \frac{1}{1,1} \cdot \frac{0,4 - 0,2}{385 - 175} \approx 1,05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ом}}{\text{мм}}$$

Таким образом, сопротивление единицы длины проволоки реохорда равно

$$r \approx 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ом}}{\text{мм}}$$

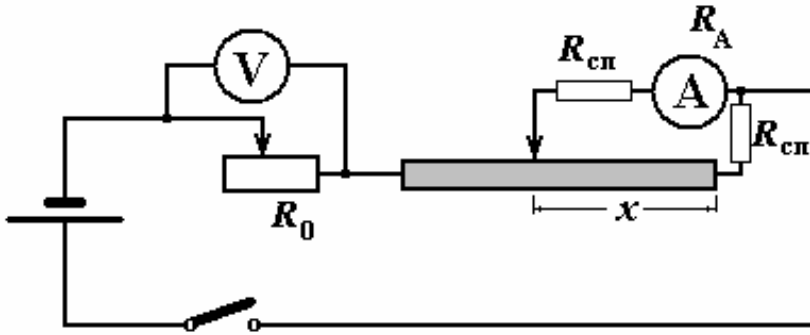
### Часть 2.

Для установки требуемого значения сопротивления реостата следует использовать очевидную схему. Двигая движок реостата следует добиться того, чтобы отношение  $\frac{U}{I}$  стало равным требуемому значению 1,3 Ом.



### Часть 3. Амперметр и соединительные провода.

Для описания исследуемой зависимости построим эквивалентную схему, в которой явно укажем сопротивления исследуемых соединительных проводов.



Понятно, что общий ток в цепи  $I_0 = \frac{U}{R_0}$  делится между амперметром и параллельной ветвью в отношении обратном к их сопротивлениям. Поэтому

$$\frac{U}{R_0} = I_A \left( \frac{R_{\text{сп}} + R_A}{R_{\text{сп}} + rx} + 1 \right). \quad (3)$$

Для экспериментальной проверки этой формулы ее удобно линеаризовать, к виду

$$\frac{I_A}{\frac{U}{R_0} - I_A} = \frac{R_{\text{сп}} + rx}{R_{\text{сп}} + R_A} = \frac{r}{R_{\text{сп}} + R_A} x + \frac{R_{\text{сп}}}{R_{\text{сп}} + R_A}. \quad (4)$$

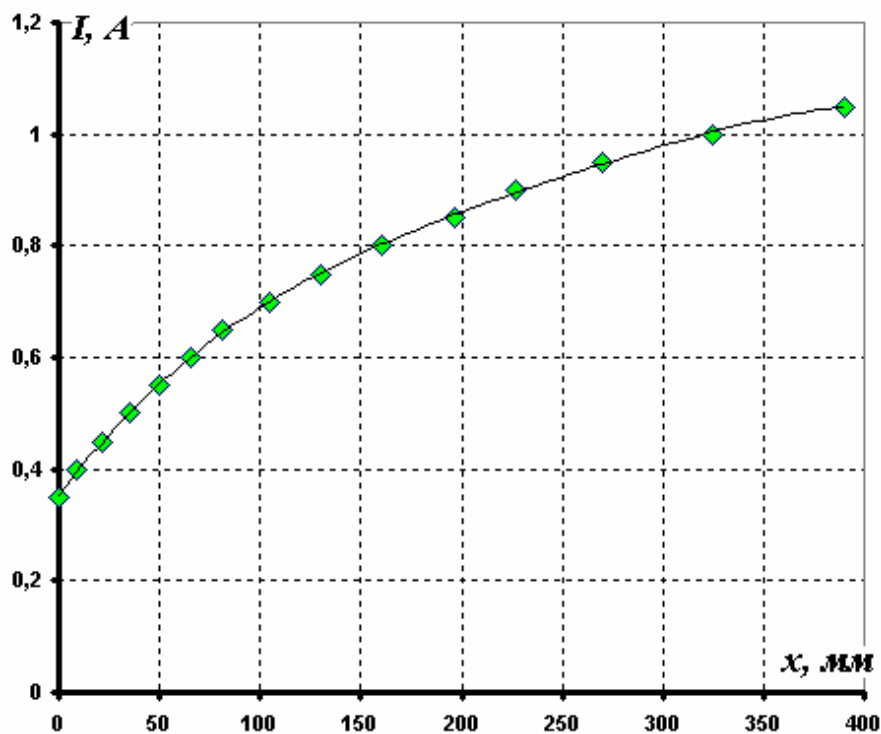
Заметим, что эту пропорцию можно записать сразу – как отношение токов. Формула (4) допускает прямую экспериментальную проверку.

При проведении измерений по указанной схеме оказалось, что напряжение на реостате изменяется незначительно (в пределах от 1,55 В до 1,75 В), провести точные измерения весьма затруднительно, поэтому можно приближенно считать, что эта зависимость линейна. Такое слабое изменение напряжения свидетельствует, что сумма сопротивлений реостата и источника заметно больше сопротивления проволоки реохорда. Результаты измерений приведены в

таблице 2 и на графике 2. . В последнее графе приведены рассчитанные значения отношений токов (взяты при среднем значении напряжения  $\tilde{U} = 1,65 \text{ В}$ ).

Таблица 2.

| $x, \text{ мм}$ | $I_A, \text{ А}$ | $\frac{I_A}{\frac{\tilde{U}}{R_0} - I_A}$ |
|-----------------|------------------|-------------------------------------------|
| 0               | 0,35             | 0,38                                      |
| 9               | 0,4              | 0,46                                      |
| 22              | 0,45             | 0,55                                      |
| 35              | 0,5              | 0,65                                      |
| 50              | 0,55             | 0,76                                      |
| 66              | 0,6              | 0,90                                      |
| 81              | 0,65             | 1,05                                      |
| 105             | 0,7              | 1,23                                      |
| 130             | 0,75             | 1,44                                      |
| 160             | 0,8              | 1,70                                      |
| 197             | 0,85             | 2,03                                      |
| 227             | 0,9              | 2,44                                      |
| 270             | 0,95             | 2,98                                      |
| 325             | 1                | 3,71                                      |
| 390             | 1,05             | 4,79                                      |



**Рис. 2 Зависимость силы тока от длины участка проволоки**

Хорошо видно, что зависимость не линейна и не проходит через начало координат. Последнее свидетельствует, что сопротивление соединительного провода сравнимо с сопротивлением вольтметра. На графике 3 приведена «линеаризованная» зависимость отношения токов от длины участка проволоки.

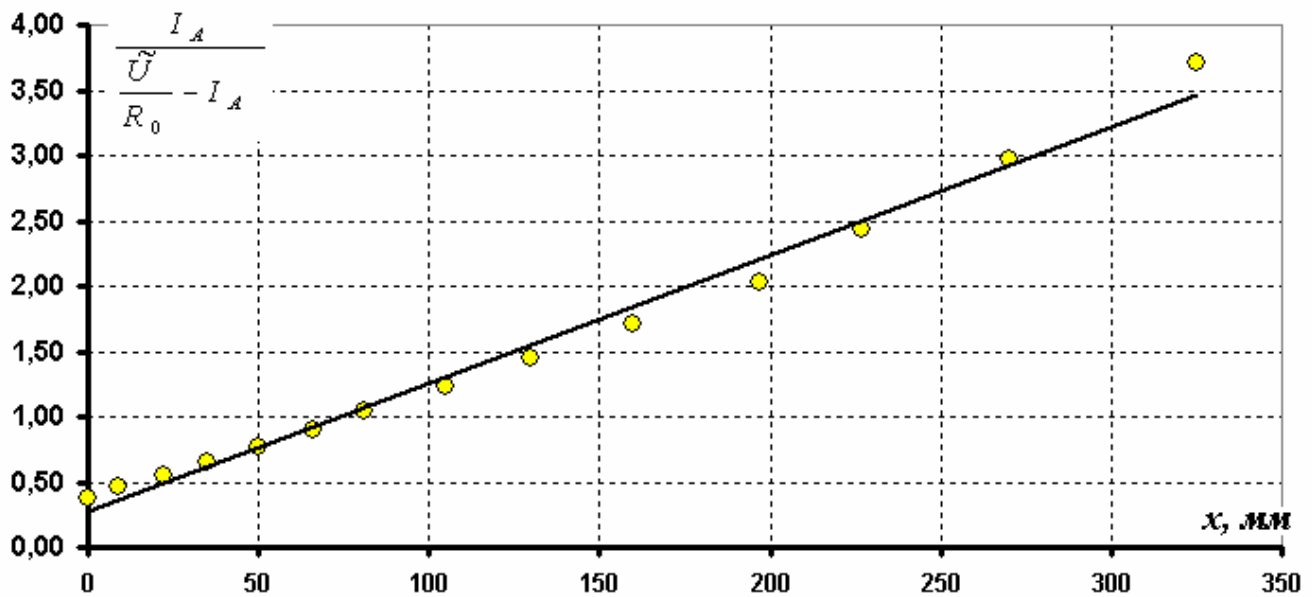


Рис. 3 Зависимость отношений сил токов о длины участка проволоки

Рис. 3 Зависимость отношений сил токов о длины участка проволоки

Видно, что данная зависимость близка к линейной (хотя отклонения от линейности хорошо заметны). Тем не менее, можно считать, что полученная формула (4) справедлива.

Чтобы доказать, что нелинейность связана с незначительным изменением суммарной силы тока в цепи, на рис. 4 построена аналогичная зависимость, рассчитанная по тем же экспериментальным данным, но с учетом незначительного изменения напряжения на реостате (для него использовалась линейная аппроксимация).

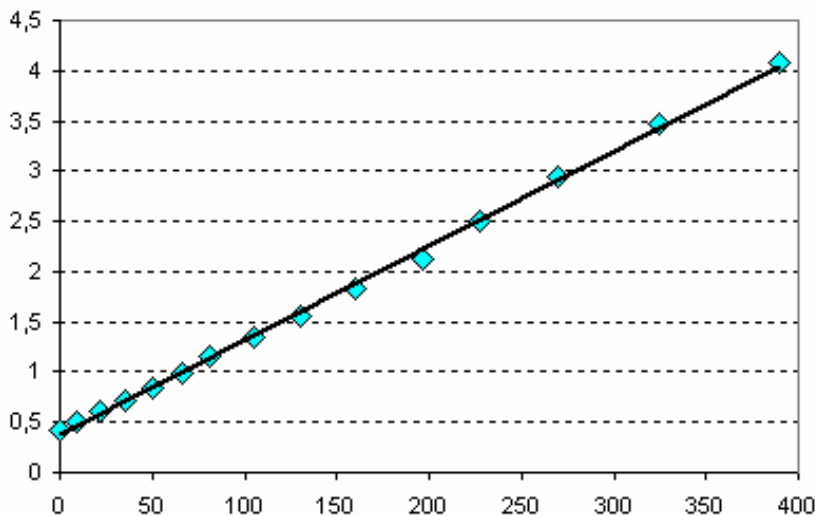


Рис. 4 Расчет с изменяющимся напряжением

Рис. 4 Расчет с изменяющимся напряжением

Запишем зависимость (4) в виде  $Y = ax + b$ , где  $a = \frac{r}{R_{сн} + R_A}$ ,  $b = \frac{R_{сн}}{R_{сн} + R_A}$  - параметры линейной зависимости. Из графика (или по МНК) можно найти численные значения этих параметров:  $a \approx 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ ,  $b \approx 0,27$ . Из выражений для этих коэффициентов находим, что

$$R_{\text{ch}} = \frac{b}{a} r \approx 0,03 \text{ O}_\text{M};$$

$$R_A = \frac{r}{a} - R_{\text{ch}} \approx 0,08 \text{ O}_\text{M}.$$