

Горячий резистор

Задача 1. [Республиканская олимпиада (Беларусь) 2025/26, 9 класс, экспериментальный тур, задача 2]

Горячий резистор

Приборы и материалы: исследуемый маломощный резистор (примерно 1,0 Ом); эталонный резистор 0,51 Ом (считайте, что это значение точное); проволочный реостат примерно 50,0 Ом; полосковый переменный резистор примерно 22,0 кОм; лампочка накаливания, цифровой мультиметр; источник постоянного напряжения примерно 4,5 В; соединительные провода, кусочек пластилина.

Внимание!

1. В данной работе используются токи, сила которых достигает 1 А. При таких значениях силы тока батарейки достаточно быстро разряжаются. Поэтому тщательно продумывайте методику проведения всех необходимых измерений: подключайте источник к цепи только во время проведения измерений. При проведении измерений одной зависимости (п. 1.6 и п. 2.2) отключать источник не следует.

На корпусе блока питания имеется выключатель. Используйте его в своей работе.

Повторно источники тока выдаваться не будут!

2. С другой стороны, при изменении силы тока при протекании его через лампочку накаливания и через маломощный резистор требуется некоторое время (порядка 20–30 секунд) для установления теплового равновесия. Учитывайте это обстоятельство при проведении измерений. При большем времени ожидания изменения показаний могут быть связаны с разрядкой батарейки.

3. Убедитесь, что ЭДС выданного источника (до начала работы) превышает 4,0 В, в противном случае требуйте его замены.

4. Для изменения точек подключения мультиметра в ходе измерений используйте зажимы «крокодил».

5. Концы соединительных проводов зачищены — используйте их для соединения методом скручивания. Старайтесь использовать минимальное количество проводов, так как они вносят небольшие дополнительные сопротивления, что в данной работе может повлиять

на результаты измерений.

6. Скользящие контакты проволочного резистора могут немного отходить от проволочной обмотки — в этом случае прижмите их рукой.

7. Ползунковый реостат имеет три вывода. Самостоятельно разберитесь со схемой их подключения, используя для этого мультиметр в режиме измерения сопротивления.

8. Оценка погрешностей в данной работе не требуется.

Каждый резистор промышленного производства рассчитан на определённую мощность протекающего тока. При превышении этой номинальной мощности резистор начинает разогреваться, при этом его сопротивление изменяется. В данном задании Вам необходимо исследовать характеристики маломощного резистора при превышении допустимой мощности протекающего тока. Для того чтобы освоить методику проведения эксперимента, в первой части работы исследуется изменение сопротивления лампочки накаливания, для которой этот эффект более заметен.

Часть 1. Изучение лампочки накаливания

Сначала, используя предоставленное оборудование, измерьте с максимальной точностью сопротивление маломощного резистора R_1 (примерно 1 Ом) при минимальной силе тока через него. Отметим, что точности мультиметра в данном случае недостаточно.

- 1.1. Нарисуйте схему, использованную Вами для проведения измерений.
- 1.2. Укажите, какие величины Вы измеряли, приведите формулу для расчёта сопротивления.
- 1.3. Приведите результаты измерений и значение сопротивления маломощного резистора R_1 .
- 1.4. Используя мультиметр в режиме омметра, измерьте сопротивление «холодной» лампочки R_{x0} .

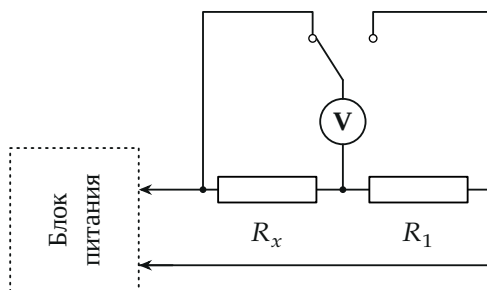


Рис. 1

Соберите схему, показанную на рисунке. Здесь R_x — лампочка накаливания, R_1 — постоянный «эталонный» резистор. В этой части в качестве «эталонного» резистора используйте маломощный резистор R_1 . В этой цепи его сопротивление можно считать постоянным и равным измеренному Вами в пп. 1.1–1.3 значению. Эта схема позволяет измерять с помощью переключателя напряжения на исследуемом резисторе U_x и эталонном резисторе U_1 . Предложите схему блока питания, содержащую источник тока и переменный резистор 50 Ом, позволяющую регулировать силу тока в исследуемой цепи в максимальных пределах.

- 1.5. Нарисуйте схему блока питания.
- 1.6. Измерьте значения напряжений на эталонном резисторе U_1 и лампочке накаливания U_x при различных значениях силы тока в цепи.
- 1.7. Рассчитайте и постройте график зависимости силы тока I через исследуемую лампочку накаливания от напряжения на ней U_x (ВАХ). Приведите формулы, по которым был проведён расчёт.
- 1.8. Рассчитайте и постройте график зависимости изменения сопротивления исследуемой лампочки накаливания $\Delta R_x = R_x - R_{x0}$ от мощности тока P , протекающего через неё.
- 1.9. Используя полученный график, обоснованно ответьте на вопрос: «Можно ли считать, что сопротивление лампочки линейно зависит от её температуры, а мощность теплоты, уходящей от лампочки в окружающую среду, пропорциональна разности температур лампочки и окружающей среды?»

Часть 2. Изучение маломощного резистора

В данной части работы Вам необходимо исследовать изменение сопротивления маломощного резистора R_1 при протекании электрического тока.

В этой части работы исследуемый резистор сильно разогревается — будьте аккуратны, не обожгитесь. При проведении измерений резистор не должен касаться стола, закрепите его над столом, используя кусочек пластина так, чтобы резистор не касался пластина.

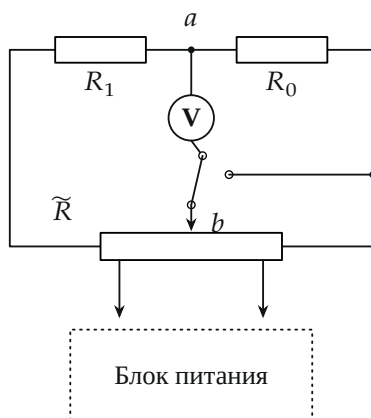


Рис. 2

Для точного измерения малых изменений сопротивления этого резистора используется мостиковая схема, показанная на этом рисунке. В качестве реостата $\tilde{R}$ используется полосковый резистор 22 кОм. Используйте схему блока питания, предложенную Вами в п. 1.5. В качестве эталонного резистора используйте резистор $R_0 = 0,51$ Ом, сопротивление которого можно считать постоянным, не зависящим от силы протекающего тока.

Данная схема позволяет измерять напряжение U_0 на эталонном резисторе R_0 и малое напряжение между средними точками моста a и b , которое далее обозначается ΔU . Для измерения этих напряжений можно использовать диапазон мультиметра 200 мВ.

Для измерения с помощью этой схемы необходимо сначала добиться так называемой балансировки моста. Для этого:

- задайте с помощью регулировки блока питания минимальный ток;
- изменяя положение движка реостата, добейтесь, чтобы напряжение между точками a и b равнялось нулю, $\Delta U = 0$. Далее это положение движка не изменяйте.

После этого можно проводить измерения изменения сопротивления маломощного резистора ΔR_1 .

- 2.1. Покажите, что напряжение между точками a и b , ΔU , связано с изменением сопротивления резистора ΔR_1 простым соотношением

$$\Delta U = \frac{U_0}{R_0} \Delta R_1. \quad (1)$$

*Формула (1) является приближённой, её можно использовать, если относительное изменение сопротивления не превышает 20 %.
Добрый совет: не тратьте слишком много времени на вывод этой формулы. Если Вам не удаётся её получить быстро, лучше приступайте к измерениям и пользуйтесь этой формулой для обработки результатов.*

- 2.2. Проведите измерения значений напряжений U_0 и ΔU при различных значениях силы тока в цепи блока питания (измерять значение силы этого тока не требуется).
- 2.3. Рассчитайте по полученным данным и постройте график зависимости изменения сопротивления резистора ΔR_1 от мощности P , выделяющейся на нём.
- 2.4. Используя полученный график, обоснованно ответьте на вопрос: «Можно ли считать, что сопротивление маломощного резистора линейно зависит от его температуры, а мощность теплоты, уходящей от резистора в окружающую среду, пропорциональна разности температур резистора и окружающей среды?»

▲ **Решение. Что происходит.** Мощность $P = I^2 R$ идёт на нагрев, а нагретое тело отдаёт тепло в воздух тем быстрее, чем горячее. Установившаяся температура T определяется равенством выделяемой и отдаваемой мощностей, а сопротивление металла растёт с температурой.

Значит, график «изменение сопротивления — мощность» показывает, как греется тело. Если сопротивление линейно зависит от температуры, $R = R_x(1 + \alpha \Delta T)$, а отдаваемая мощность пропорциональна перегреву, $P = \beta \Delta T$, то

$$\Delta R = R_x \alpha \Delta T = \frac{R_x \alpha}{\beta} P,$$

то есть ΔR линейно зависит от P . Проверять оба предположения сразу и нужно по этой прямой.

Обозначения. $R_0 = 0,51$ Ом — эталон; U_0, U_1, U_x — напряжения на R_0, R_1 и лампочке; R_{x0} — сопротивление холодной лампочки. Приведённые числа — результаты образцового выполнения работы.

Часть 1. Лампочка накаливания.

Пункты 1.1–1.3. Точное измерение R_1 . Сопротивление около 0,7 Ом мультиметром в режиме омметра не измерить: сопротивление щупов и контактов сравнимо с самим измеряемым. Поэтому сравниваем R_1 с эталонным R_0 при одном и том же токе: последовательно соединяем R_0 и R_1 с источником и реостатом, реостат выводим на максимальное сопротивление (минимальный нагрев), а мультиметром на пределе 200 мВ поочерёдно, через переключатель, измеряем напряжения U_0 на R_0 и U_1 на R_1 (рис. 3).

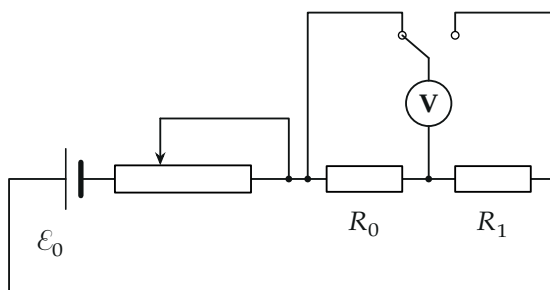


Рис. 3. Схема измерения R_1 . Переключатель присоединяет вольтметр то к R_0 , то к R_1

Ток в последовательной цепи один: $I = U_0/R_0 = U_1/R_1$. Отсюда

$$R_1 = R_0 \frac{U_1}{U_0}.$$

Измерено $U_1 = 349$ мВ, $U_0 = 257$ мВ:

$$R_1 = 0,51 \cdot \frac{349}{257} \approx 0,69 \text{ Ом.}$$

Пункт 1.4. Мультиметр в режиме омметра показывает сопротивление холодной лампочки $R_{x0} = 4,30$ Ом.

Пункт 1.5. Блок питания. Нужен источник с последовательно включённым реостатом: движок соединён с одним из концов обмотки, на рабочую схему идут свободный вывод источника и вывод реостата (рис. 4). Перемещая движок, меняем сопротивление всей цепи от максимального (минимальный ток) до нуля (максимальный ток, ограниченный лишь сопротивлениями R_x , R_1 и источника).

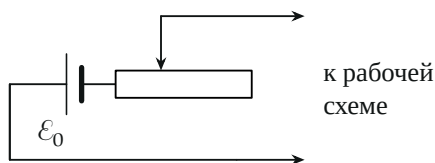


Рис. 4. Блок питания: источник и реостат, включённый как переменный резистор

Пункты 1.6 и 1.7. Измерения и ВАХ. Для каждого положения движка переключателем измеряем U_1 и U_x (источник не отключаем, подождав 20–30 с). Ток в цепи и все остальные величины считаем так:

$$I_x = \frac{U_1}{R_1}, \quad R_x = \frac{U_x}{I_x}, \quad \Delta R_x = R_x - R_{x0}, \quad P_x = U_x I_x.$$

U_1 , мВ	U_x , В	I_x , мА	R_x , Ом	ΔR_x , Ом	P_x , мВт
45,8	0,59	66,13	8,92	4,62	39,0
51,6	0,74	74,51	9,93	5,63	55,1
58,0	0,93	83,75	11,10	6,80	77,9
64,0	1,11	92,41	12,01	7,71	102,6
68,0	1,22	98,19	12,43	8,13	119,8
75,0	1,45	108,29	13,39	9,09	157,0
86,0	1,81	124,18	14,58	10,28	224,8
94,8	2,26	136,88	16,51	12,21	309,4
100,0	2,49	144,39	17,24	12,94	359,5
111,0	2,94	160,27	18,34	14,04	471,2
125,0	3,59	180,49	19,89	15,59	648,0

Таблица 1. Измерения и расчёт для лампочки

ВАХ $I(U_x)$ (рис. 5) — кривая, загибающаяся к оси напряжений: с ростом напряжения ток растёт всё медленнее. Для постоянного сопротивления график был бы прямой (штрих).

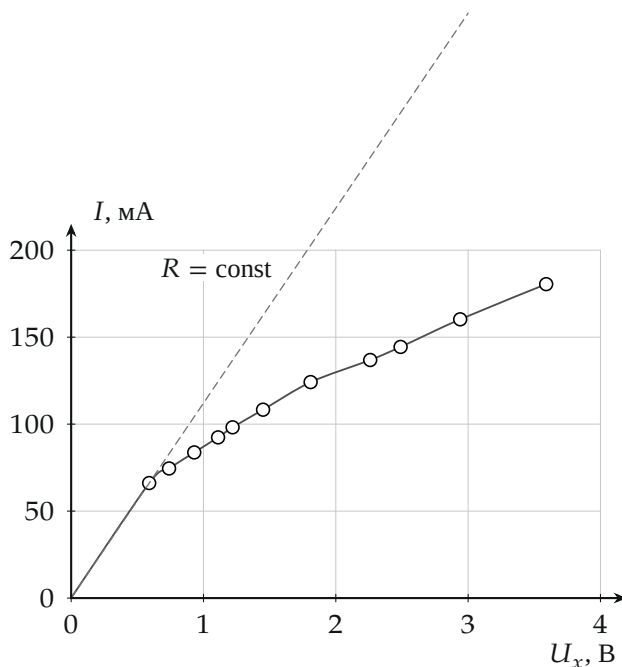


Рис. 5. ВАХ лампочки; штрих — прямая для постоянного сопротивления (по первой точке)

Пункт 1.8. Зависимость $\Delta R_x(P)$.

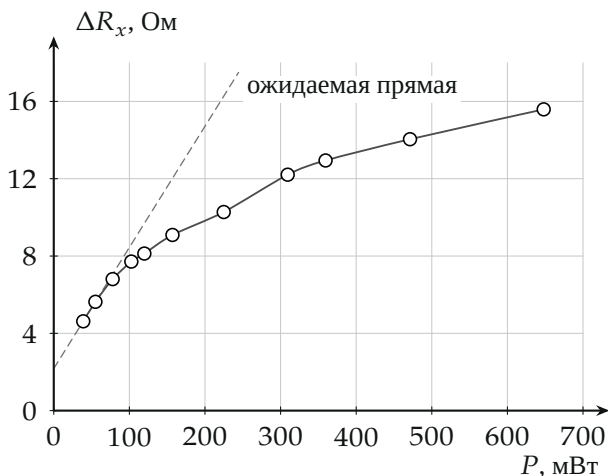


Рис. 6. Изменение сопротивления лампочки от мощности

Пункт 1.9. Вывод. Если бы оба предположения выполнялись, по формуле из начала решения график был бы прямой. Получена кривая, загнбающаяся вниз: наклон $\Delta R_x/P$ падает от 0,06 Ом/мВт в начале до 0,009 Ом/мВт в конце, то есть почти в семь раз. Предположения не подтверждаются: хотя бы одно из них неверно. У раскалённой нити потери тепла растут быстрее, чем линейно по перегреву (излучение $\propto T^4$, добавляется конвекция), поэтому для одной и той же прибавки температуры нужна всё большая мощность.

Часть 2. Маломощный резистор.

Пункт 2.1. Вывод формулы для моста. Сопротивление $R'_1 = R_1 + \Delta R_1$ и R_0 составляют одну ветвь, две части реостата R_L и R_Π — вторую (рис. 7). Сопротивление реостата (22 кОм) на три-четыре порядка больше сопротивлений резисторов, поэтому он почти не влияет на ток в первой ветви. Обе ветви подключены к одному напряжению U .

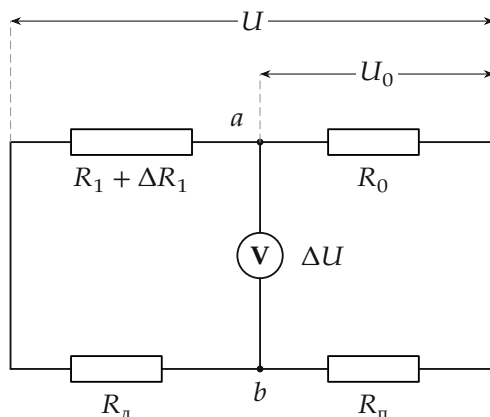


Рис. 7. Эквивалентная схема моста

Потенциалы точек a и b отсчитаем от левого узла. Делитель из R'_1 и R_0 даёт $\varphi_a = U \frac{R'_1}{R'_1 + R_0}$, делитель из частей реостата — $\varphi_b = U \frac{R_л}{R_л + R_п}$. При балансировке ($\Delta U = 0, \Delta R_1 = 0$) $\frac{R_л}{R_л + R_п} = \frac{R_1}{R_1 + R_0}$, и положение движка больше не меняют. Тогда

$$\begin{aligned} \Delta U &= \varphi_a - \varphi_b = U \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_0} - \frac{R_1}{R_1 + R_0} \right) \\ &= \frac{U R_0 \Delta R_1}{(R_1 + R_0)(R_1 + \Delta R_1 + R_0)}. \end{aligned}$$

Напряжение на эталоне $U_0 = \frac{U R_0}{R_1 + \Delta R_1 + R_0}$, и U сокращается:

$$\Delta U = \frac{U_0}{R_1 + R_0} \Delta R_1.$$

Это точное соотношение, не требующее малости ΔR_1 . Формула (1) условия отличается от него заменой $R_1 + R_0$ на R_0 , то есть постоянным множителем $\frac{R_1 + R_0}{R_0} \approx 2,4$. В условии сказано обрабатывать результаты по (1), так и поступаем; множитель общий для всех точек и лишь рас-

тягивает ось ΔR_1 — на форму графика и вывод он не влияет (в таблице оба варианта).

Обратите внимание. Если $R_1 = R_0$ и $\Delta R_1 \ll R_1$, точное соотношение даёт $\Delta U = U \Delta R_1 / (4R_1)$ — привычное выходное напряжение моста при изменении одного плеча.

Пункты 2.2 и 2.3. Измерения и обработка. Устанавливаем разные токи блока питания и каждый раз измеряем U_0 и ΔU . Ток через R_1 равен току через R_0 : $I = U_0 / R_0$. По (1)

$$\Delta R_1 = \frac{R_0 \Delta U}{U_0}, \quad P = I^2 (R_1 + \Delta R_1) = \left(\frac{U_0}{R_0} \right)^2 (R_1 + \Delta R_1).$$

U_0 , мВ	ΔU , мВ	ΔR_1 по (1), мОм	ΔR_1 точно, мОм	P , мВт
49	1,0	10,4	24,5	6,5
129	3,2	12,7	29,8	45,1
170	4,8	14,4	34,0	78,6
236	7,8	16,9	39,7	151,9
316	12,8	20,7	48,7	273,8
382	20,0	26,7	63,0	403,5
429	25,2	30,0	70,6	511,2
558	48,7	44,5	105,0	882,4
675	78,0	58,9	139,0	1316,4

Таблица 2. Измерения и расчёт для резистора

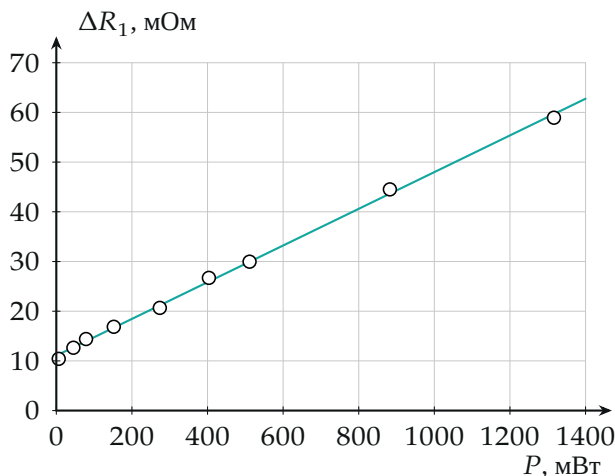


Рис. 8. Изменение сопротивления резистора от мощности (по формуле (1));
 прямая — $\Delta R_1 = 11 + 0,037 P$

Пункт 2.4. Вывод. Точки отклоняются от прямой не более чем на 1 мОм при изменении мощности от 6 до 1300 мВт (в 200 раз). Зависимость $\Delta R_1(P)$ линейна, значит, оба предположения согласуются с опытом: сопротивление резистора линейно растёт с температурой, а мощность потерь пропорциональна перегреву — в отличие от лампочки, у которой нить раскаляется намного сильнее. Прямая отсекает на оси около 11 мОм: возможная причина — неточная балансировка моста; на вывод это не влияет.

Проверка. Размерности: $\frac{U_0}{R_0} \Delta R_1$ — вольты, $\left(\frac{U_0}{R_0}\right)^2 R$ — ватты. Предел: при $\Delta R_1 \rightarrow 0$ получаем $\Delta U \rightarrow 0$, как при балансировке. Сравнение частей: у резистора $\Delta R_1/R_1$ достигает 8,5 % (по (1)) или 20 % (точно), у лампочки R_x/R_{x0} вырастает в 4,6 раза; резистор греется заметно слабее, и в этих пределах его потери ещё пропорциональны перегреву.

Ответ. 1.2) $R_1 = R_0 \frac{U_1}{U_0}$; 1.3) $R_1 \approx 0,69 \text{ Ом}$; 1.4) $R_{x0} = 4,30 \text{ Ом}$; 1.9) нет:

$\Delta R_x(P)$ нелинейна; 2.1) $\Delta U = \frac{U_0}{R_1 + R_0} \Delta R_1$ (в условии — (1) с R_0 вместо $R_1 + R_0$); 2.4) да: $\Delta R_1(P)$ линейна.