Терморезистор

Задача 2. [ВсОШ 2022/23, заключительный этап, 9 класс, практический тур, задача 2] «Терморезистор».

Терморезистор (термистор, термосопротивление) — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого зависит от его температуры. Вам необходимо найти зависимость сопротивления данного терморезистора от его температуры. В процессе исследования терморезистор будет нагреваться, поэтому он закреплён внутри зажима для бумаги. Перед выполнением измерений убедитесь, что терморезистор не касается внутренних поверхностей зажима, а выводы зажаты через изоляцию. В оборудовании используются маркированные резисторы, на которых указана максимальная рассеиваемая мощность и их сопротивление. Например, надпись «5W30RJ» означает: 5 Ватт, 30 Ом. В качестве источника питания используется регулируемый адаптер; индикатор на адаптере не является измерительным прибором. В данной работе погрешности оценивать не нужно.

0. Запишите номер терморезистора, указанный на зажиме, и комнатную температуру, указанную организаторами в аудитории.

1. После изменения параметров цепи температура терморезистора стабилизируется примерно через 2 минуты. Используя выданное оборудование, исследуйте зависимость силы тока, протекающего через терморезистор, от напряжения на нём для стабилизированных состояний терморезистора. Предложите электрические схемы для исследования данной зависимости в диапазонах $(0;\ 0{,}10)$ А, $(0{,}10;\ 0{,}40)$ А и $(0{,}40;\ 1{,}0)$ А. Допустимая сила тока через данный терморезистор не должна превышать $I_{\max} = 1{,}0$ А. Мультиметр разрешается использовать только в режиме вольтметра. В процессе проведения эксперимента нельзя допускать, чтобы тепловая мощность тока в резисторе превышала 50 % его максимальной мощности.
2. Постройте график исследованной зависимости $I(U)$.
3. Известно, что при температуре 95 °C сопротивление выданного терморезистора 3,5 Ом. Найдите, при каких температурах термо-

резистора его сопротивление равно 2 Ом, 10 Ом и 15 Ом соответственно. Можно считать, что коэффициент теплоотдачи при проведении измерений постоянен.

Оборудование: зажим с терморезистором внутри, мультиметр в режиме вольтметра, спаянные сопротивления и разъём для источника, источник питания (регулируемый адаптер), два провода с крокодилами, миллиметровка для построения графиков.

▲ **Решение. Что происходит.** Ток нагревает терморезистор, и он греется до тех пор, пока выделяемая мощность $P = IU$ не сравняется с теплом, уходящим в воздух. Теплоотдача по закону Ньютона–Рихмана пропорциональна перегреву: $P = \alpha(t - t_0)$. Значит, каждая точка стационарной вольт-амперной характеристики — это одновременно сопротивление $R = U/I$ и температура $t = t_0 + IU/\alpha$. Одна известная пара «3,5 Ом — 95 °C» даёт α, а с ним вся ВАХ превращается в зависимость $R(t)$. Это задача класса «нелинейный элемент»: ВАХ снимается по точкам, а нужные режимы находятся пересечением ВАХ с прямыми $I = U/R$.

Обозначения. $U = U_{AC}$ — напряжение на терморезисторе, I — ток через него, R_{AB} — известный резистор последовательно с терморезистором, $t_0 = 22\,^\circ\text{C}$ — комнатная температура (по данным организаторов), $P = IU$ — мощность в терморезисторе.

Пункт 1. Схемы и измерения.

1. Как измерить ток одним вольтметром. Амперметра нет, поэтому ток находим по закону Ома для известного резистора R_{AB}, включённого последовательно с терморезистором: вольтметр подключаем то к точкам A и C (напряжение U_{AC} на терморезисторе), то к A и B:

$$I = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}, \qquad R = \frac{U_{AC}}{I}, \qquad P = IU_{AC}.$$

Цепь между двумя отсчётами не разрываем: иначе терморезистор остынет, и стационарный режим придётся ждать снова (около 2 минут).

2. Ограничение по мощности резисторов. Резисторы 10 Ом рассчитаны на 10 Вт; по условию в каждом можно выделять не больше поло-

вины, 5 Вт. Отсюда наибольший ток через один резистор

$$I_{\max}^{(10)} = \sqrt{\frac{0{,}5P_{\max}}{R}} = \sqrt{\frac{5\ \text{Вт}}{10\ \text{Ом}}} \approx 0{,}71\ \text{А}.$$

Этого мало для диапазона до 1,0 А, поэтому для больших токов берём два резистора по 10 Ом параллельно ($R_{AB} = 5$ Ом): ток 1 А делится пополам, в каждом $0{,}5^2 \cdot 10 = 2{,}5$ Вт.

3. Малые токи — делитель. Адаптер не опускается ниже 3,9 В, и с одним последовательным резистором ток через терморезистор не удаётся сделать меньше примерно 0,3 А. Поэтому для малых токов источник подключаем через 10 Ом к узлу B, а от B к C ставим шунт (10 Ом или 2,2 Ом): на шунте остаётся лишь часть напряжения адаптера, и ветвь «R_{AB} + терморезистор» получает малый ток. Ток по-прежнему находим по U_{AB}/R_{AB}. Итого четыре схемы:

- схема 1 ($R_{AB} = 5$ Ом) — $(0{,}5;\ 1{,}0)$ А;
- схема 2 ($R_{AB} = 10$ Ом) — $(0{,}2;\ 0{,}5)$ А;
- схема 3 (делитель, $R_{AB} = 2{,}2$ Ом, шунт 10 Ом) — $(0{,}1;\ 0{,}25)$ А;
- схема 4 (делитель, $R_{AB} = 10$ Ом, шунт 2,2 Ом) — $(0;\ 0{,}1)$ А.

Соседние схемы перекрываются, напряжение адаптера в каждой подбираем так, чтобы точки шли без пропусков. Источник подключается к двум правым выводам каждой схемы.

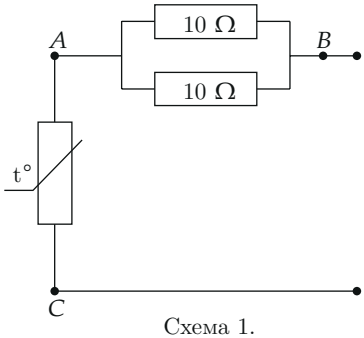


Схема 1.

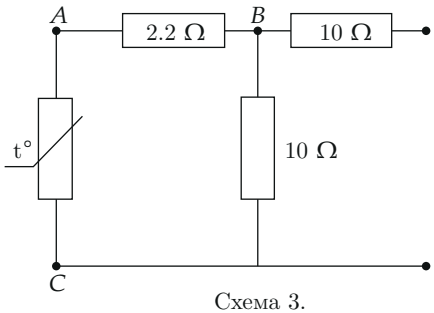


Схема 3.

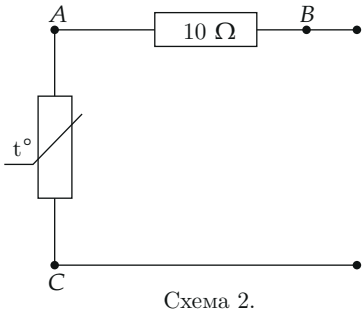


Схема 2.

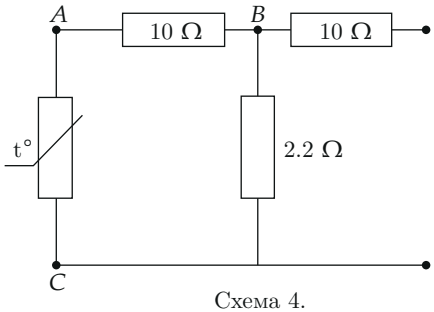


Схема 4.

Схемы измерений. Терморезистор — между A и C, вольтметр — к A, C или к A, B.

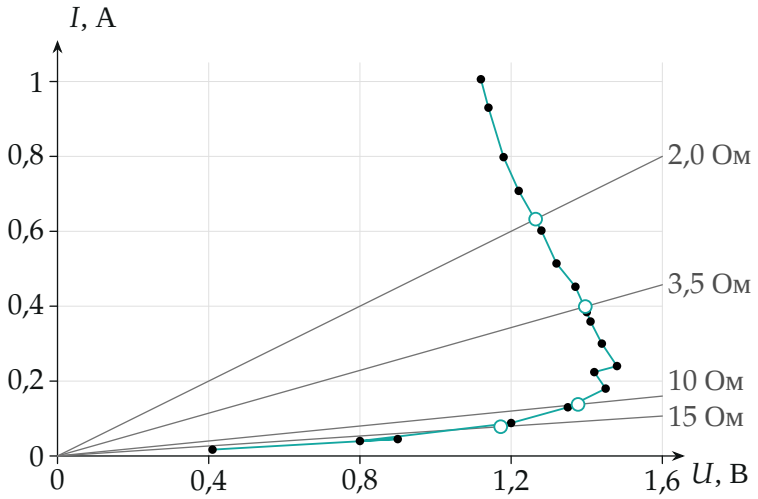
4. Результаты. Ток в схемах 1, 2 — U_{AB}/R_{AB} по таблице; в схемах 3,

4 столбец U_{AB} организаторы не привели, ток взят с их графика.

схема	U, В	I, А	R, Ом	P, Вт	t, °C
1	1,12	1,006	1,11	1,13	170
1	1,14	0,930	1,23	1,06	161
1	1,18	0,798	1,48	0,94	145
1	1,22	0,708	1,72	0,86	135
1	1,28	0,602	2,13	0,77	123
1	1,32	0,514	2,57	0,68	111
2	1,37	0,452	3,03	0,62	103
2	1,40	0,384	3,65	0,54	92
2	1,41	0,359	3,93	0,51	88
2	1,44	0,300	4,80	0,43	79
2	1,42	0,224	6,34	0,32	64
3	1,48	0,240	6,17	0,36	69
3	1,45	0,180	8,06	0,26	56
3	1,35	0,130	10,4	0,18	45
3	1,20	0,088	13,6	0,11	36
4	0,90	0,045	20,0	0,040	27
4	0,80	0,040	20,0	0,032	26
4	0,41	0,017	24,1	0,007	23

Столбец t заполнен после пункта 3.

Пункт 2. График $I(U)$. Наносим точки (рисунок ниже). Картина качественно понятна: при малом токе терморезистор почти холодный, $R \approx$ 20–24 Ом, и ВАХ идёт как у обычного резистора. С ростом тока он нагревается, сопротивление падает, и напряжение перестаёт расти: около 1,4–1,5 В кривая загибается вверх, а дальше напряжение даже уменьшается при росте тока — участок отрицательного дифференциального сопротивления.



Стационарная ВАХ терморезистора (точки) и прямые $I = U/R$ для $R = 2$; 3,5; 10; 15 Ом. Кружки — точки пересечения.

Пункт 3. Температура по сопротивлению.

1. Тепловой баланс. В стационарном режиме температура не меняется, значит, вся мощность тока уходит в воздух. Закон Ньютона–Рихмана с постоянным коэффициентом α:

$$IU = \alpha\,(t - t_0) \quad \Rightarrow \quad t = t_0 + \frac{IU}{\alpha}.$$

2. Состояние с данным сопротивлением. Сопротивление R терморезистор имеет в той точке ВАХ, где $U/I = R$, то есть на пересечении ВАХ с прямой $I = U/R$ через начало координат. Для $R = 3{,}5$ Ом пересечение даёт $U \approx 1{,}40$ В, $I \approx 0{,}40$ А, $P_{95} \approx 0{,}56$ Вт. Отсюда коэффициент теплоотдачи

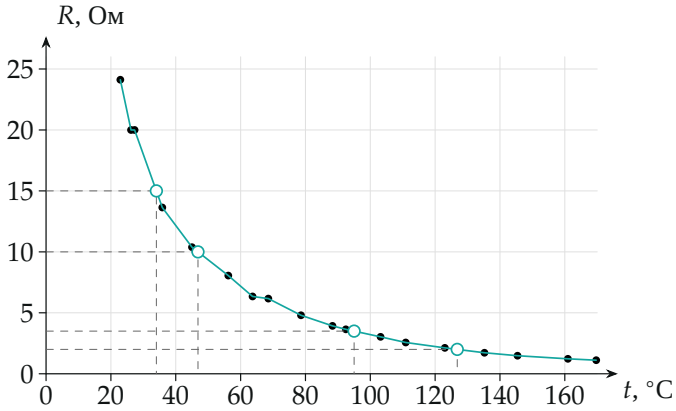
$$\alpha = \frac{P_{95}}{95\,^\circ\text{C} - t_0} = \frac{0{,}56\ \text{Вт}}{73\,^\circ\text{C}} \approx 7{,}6 \cdot 10^{-3}\ \text{Вт}/^\circ\text{C}.$$

3. Остальные сопротивления. Пересечения с прямыми 2, 10 и 15 Ом

(между соседними точками интерполируем линейно):

R, Ом	U, В	I, А	P, Вт	$t = t_0 + P/\alpha$, °C
2	1,26	0,63	0,80	127
10	1,38	0,138	0,19	47
15	1,17	0,078	0,092	34

Те же формулы, применённые ко всем точкам, дают зависимость $R(t)$, ради которой и ставился опыт (последний столбец таблицы пункта 1 и график ниже).



Сопротивление терморезистора от температуры; кружки — $R = 2; 3{,}5; 10; 15$ Ом.

Обратите внимание: у организаторов в ответе для 10 Ом стоит 54 °C. Но на их же графике прямая 10 Ом пересекает ВАХ около $U \approx 1{,}37$ В, $I \approx 0{,}14$ А, где $P \approx 0{,}19$ Вт и $t \approx 47$ °C; температуре 54 °C отвечала бы мощность 0,24 Вт, то есть уже $R \approx 8$ Ом (см. таблицу).

Проверка. Размерность: $[P/\alpha] = \text{Вт}/(\text{Вт}/°\text{C}) = °\text{C}$. Предел: при $I \to 0$ перегрев $IU/\alpha \to 0$, и последние точки дают $t \approx 23$–27 °C — почти комнатная, как и должно быть. Монотонность: чем меньше сопротивление, тем горячее терморезистор ($34 < 47 < 95 < 127$ °C) — это полупроводник с отрицательным температурным коэффициентом.

Физический смысл: терморезистор сам себе служит и нагревателем, и термометром — мощность в нём задаёт перегрев, а сопротивление его

показывает.

Ответ. 1) схемы 1–4 (ток — по напряжению на известном R_{AB}, для малых токов — делитель); 2) график $I(U)$ в решении; 3) $\alpha \approx 7{,}6 \cdot 10^{-3}$ Вт/°C; $R = 2$ Ом — $t \approx 127\,^\circ$C, $R = 10$ Ом — $t \approx 47\,^\circ$C, $R = 15$ Ом — $t \approx 34\,^\circ$C.