



Введение

Терморезисторы – это резисторы, способные заметно менять своё сопротивление с температурой. Поскольку таким свойством обладают практически все резистивные материалы, терморезисторами обычно называют элементы, которые испытывают значительное или нетипичное изменение сопротивления в конкретном узком диапазоне температур. Два основных типа терморезисторов – это:

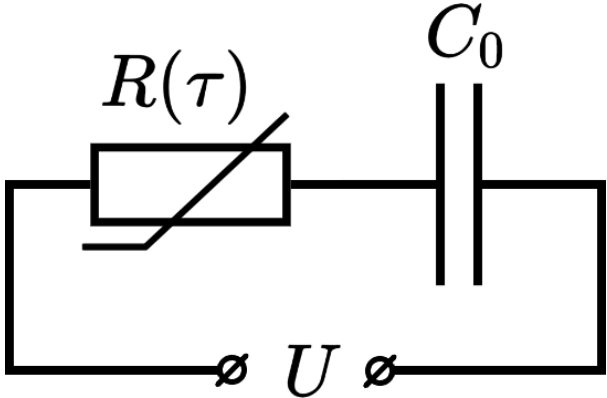
- Терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) – т.н. *позисторы*. Они обычно используются в электрических цепях в качестве предохранителей, т.е. ограничивают полный ток. К примеру, как позистор ведёт себя обычная лампа накаливания.
- Терморезисторы с отрицательным ТКС – т.н. *NTC-термисторы*. Они также используются как ограничители, но уже *пусковых токов*, т.е. там, где большие токи на старте могут привести к перегоранию элементов цепи. Такое может происходить в мощных системах освещения или при зарядке мощных конденсаторов, что мы и рассмотрим в первой части задачи.

Часть А. Зарядка конденсатора (4.2 балла)

Для корректной работы большинства блоков питания необходим механизм, позволяющий регулярно заряжать конденсатор большой ёмкости без вреда для контактов и дорожек платы, поскольку в начальный момент времени ток через практически разряженный конденсатор настолько высок, что способен их расплавить. Для этого обычно применяют NTC-термисторы: в начале они имеют комнатную температуру и довольно большое сопротивление, тем самым ограничивая ток. При этом за характерное время зарядки конденсатора термистор нагревается, и поэтому к моменту, когда необходимость ограничения тока отпадает, его сопротивление падает в несколько раз, обеспечивая быструю дозарядку.

Термистор подключают последовательно с конденсатором некоторой ёмкости C к источнику постоянного напряжения с некоторой ЭДС U . Предварительно сопротивление термистора было измерено при комнатной температуре $T_0 = 298$ К. Оно оказалось равно $R_0 = 37.3$ Ом. Для контроля работы схемы при тестовой зарядке конденсатора была снята зависимость от времени t отклонения τ температуры термистора от комнатной. График $\tau(t)$ приведён в хорошем качестве на отдельной странице.

Для описания температурной эволюции термистора введём его теплоёмкость c и контактную теплопроводность κ .



- A1** ^{0.20} Запишите уравнение на временную производную $\dot{\tau}$ температуры термистора. Выразите ваш ответ через напряжение U_R на термисторе, ёмкость конденсатора C и введённые выше коэффициенты c и κ . Перепишите это же уравнение в терминах U_R , c , κ и сопротивления термистора $R(\tau)$.
- A2** ^{0.60} Пусть $c = a_1 U^2$, а $\kappa = a_2 U^2$. По асимптотикам кривой $\tau(t)$ при малых и больших t найдите значения коэффициентов a_1 и a_2 .
- A3** ^{0.60} Выразите через κ и τ количество теплоты, которое выделится на термисторе за всё время, и свяжите его с изменением энергии конденсатора W_C . Найдите отсюда ёмкость конденсатора C и её численное значение.
- A4** ^{0.20} Запишите выражение для мощности P , выделяющейся на термисторе. Выразите ответ через U , R_0 , τ и введённые в **A2** численные коэффициенты.
- A5** ^{0.20} Найдите отсюда выражение для напряжения U_R на резисторе. Выразите ответ через U , τ и введённые в **A2** численные коэффициенты.
- A6** ^{0.20} Получите выражение для сопротивления термистора R . Выразите ответ через R_0 , τ и введённые в **A2** численные коэффициенты.
- A7** ^{2.00} Как можно точнее найдите по графику зависимость $R(\tau)$.
- A8** ^{0.20} Найдите c и κ , если полное приложенное напряжение равно $U = 220$ В.

Часть В. Коэффициенты Стейнхарта–Харта (2.0 балла)

Поскольку в NTC-термисторах реализуется полупроводниковый механизм проводимости, зависимость сопротивления NTC-термистора R от абсолютной температуры T можно описать неявно с помощью *уравнения Стейнхарта–Харта*:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C [\ln R]^3 \quad (\text{СИ}),$$

где A , B и C – т.н. коэффициенты Стейнхарта–Харта. Эти коэффициенты зависят от материала термистора. Определение этих коэффициентов для используемого термистора и является целью данной части задачи.

- B1** ^{0.60} Рассматривая значения $\frac{1}{T_0 + \tau_i}$ как экспериментальные точки, а правую часть уравнения Стейнхарта–Харта как уравнение модельной кривой, запишите систему уравнений, позволяющую найти коэффициенты A , B и C .
- B2** ^{1.40} Решите эту систему **численно** и получите коэффициенты Стейнхарта–Харта.

Часть С. ВАХ NTC-термистора (3.8 балла)

В части **A** мы рассмотрели, для чего могут применяться термисторы с отрицательным ТКС, а в части **B** нашли коэффициенты уравнения Стейнхарта–Харта. В этой части мы попробуем, основываясь на этих данных, исследовать работу термистора в стационарном режиме и построить его вольт-амперную характеристику.

C0 **Внимание!** Если вы не решали части **A** и **B** или не хотите использовать полученные значения коэффициентов уравнения Стейнхарта–Харта и контактную теплопроводность терморезистора, можете воспользоваться следующими значениями:

$$A = 7.3 \cdot 10^{-4} \quad B = 1.30 \cdot 10^{-4} \quad C = 5.7 \cdot 10^{-6} \quad \kappa = 0.37 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

В случае выбора приведённых значений явно напишите об этом в листе ответов для этого пункта. В этом случае ваш максимальный балл за пункты **C2** и **C4** будет на 10% меньше.

C1 ^{0.20} Запишите уравнение для нахождения стационарного значения сопротивления NTC-термистора, к которому приложено постоянное напряжение U .

C2 ^{1.50} Решая это уравнение, получите как можно точнее зависимость $R(U)$. Постройте на основе полученных точек ВАХ терморезистора при небольших токах и напряжениях.

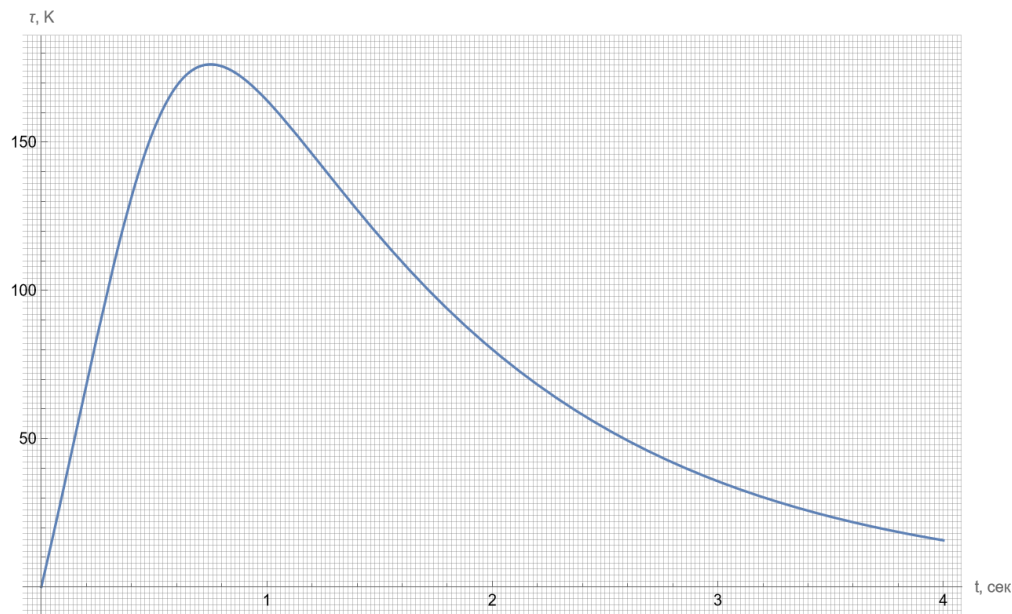
C3 ^{0.30} Найдите, при каком критическом напряжении $U_{\text{кр}}$ и токе $I_{\text{кр}}$ режим работы терморезистора меняется.

Как вы уже могли догадаться, за этой предельной точкой лежит неустойчивый участок ВАХ, который продолжается до точки плавления терморезистора, которая равняется $T_{\text{max}} = 1380\text{ }^{\circ}\text{C}$.

C4 ^{1.50} Как можно точнее найдите зависимость $R(U)$ на участке ВАХ от найденной в предыдущем пункте критической точки до точки плавления терморезистора и постройте её на графике.

C5 ^{0.30} Найдите координаты $(U_{\text{м}}, I_{\text{м}})$ точки плавления терморезистора на ВАХ.

Приложение



Оригинальный график в максимальном разрешении приведён в материалах к задаче