

**Применение резисторных мостовых схем для измерения
температуры окружающей среды**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы № 2 по курсу
“Проектирование средств измерений и контроля”

Цель работы

Получить навыки компьютерного моделирования измерительных схем и оценки погрешностей приборов контактного измерения температуры с использованием программы компьютерного моделирования Multisim.

1. Терморезисторы

Зависимость сопротивления резистора электрическому току от температуры увеличивает погрешность работы узлов измерительных систем. Однако, эта зависимость может быть полезной, например, при создании систем измерения температуры окружающей среды. В этом случае необходим резистор с увеличенным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Он будет датчиком измерительного прибора. Такой элемент называют терморезистором.

Терморезисторы – электронные компоненты на основе полупроводников, сопротивление которых существенно изменяется в зависимости от их температуры.

На принципиальных схемах терморезистор обозначается:



Рис. 1. Условное обозначение терморезистора в России (А) и США (Б).

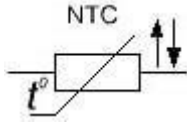
По способу нагрева терморезисторы делят на две группы:

- Прямой нагрев терморезистора внешним окружающим воздухом или током, который протекает непосредственно через сам терморезистор. Терморезисторы с прямым нагревом, как правило, используются либо для измерения температуры, либо температурной компенсации. Такие терморезисторы можно встретить в термометрах, термостатах, зарядных устройствах (например, для Li-ion батарей шуруповёртов).

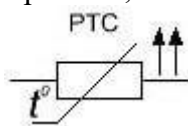
- Косвенный нагрев терморезистора рядом расположенным нагревательным элементом. При этом он сам и нагревательный элемент электрически не связаны друг с другом. В таком случае, сопротивление терморезистора определяется функцией тока, протекающего через нагревательный элемент, а не через терморезистор. Терморезисторы с косвенным нагревом являются комбинированными приборами.

По зависимости изменения сопротивления от температуры терморезисторы делят на два типа:

- NTC-термисторы (NTC – Negative Temperature Coefficient, или "Отрицательный Коэффициент Сопротивления"). Особенность данных термисторов в том, что **при нагреве**

их сопротивление уменьшается. Обозначение термистора на схеме  Стрелки на обозначении разнонаправлены, что указывает на основное свойство NTC-термистора: температура увеличивается (стрелка вверх), сопротивление падает (стрелка вниз). И наоборот.

- PTC-термисторы (они же **позисторы**) – сопротивление которых при нагреве растёт. (PTC - Positive Temperature Coefficient, "Положительный Коэффициент Сопротивления"). Позисторы менее распространены, чем NTC-термисторы. Условное обозначение



позистора на схеме.

Основные параметры и характеристики терморезисторов

- R_n – номинальное сопротивление - сопротивление терморезисторов при определенной температуре окружающей среды, обычно – это 25°C или 20°C.
- α – температурный коэффициент сопротивления – характеризует изменение сопротивления терморезистора в % при изменении температуры на 1 градус, обычно указывается для той же температуры, что и номинальное сопротивление.
- Постоянная B - величина, характеризующая температурную чувствительность терморезисторов в определенном диапазоне температур. Определяется физическими свойствами полупроводникового материала, вычисляются по формуле:

$$B = 2.303 \frac{\lg R_1 - \lg R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (1)$$

где R_1 - сопротивление терморезистора, измеренное при температуре T_1 , Ом;
 R_2 - сопротивление терморезистора, измеренное при температуре T_2 , Ом.

- P_{max} - максимальная мощность рассеяния - это допустимая мощность при температуре 25°C (или другой указанной в ТУ), при которой в течение заданного времени (минимальной наработки) параметры терморезисторов остаются в пределах норм, установленных в ТУ.

Конструкции корпусов терморезисторов разнообразны. Некоторые примеры даны на рис. 2.

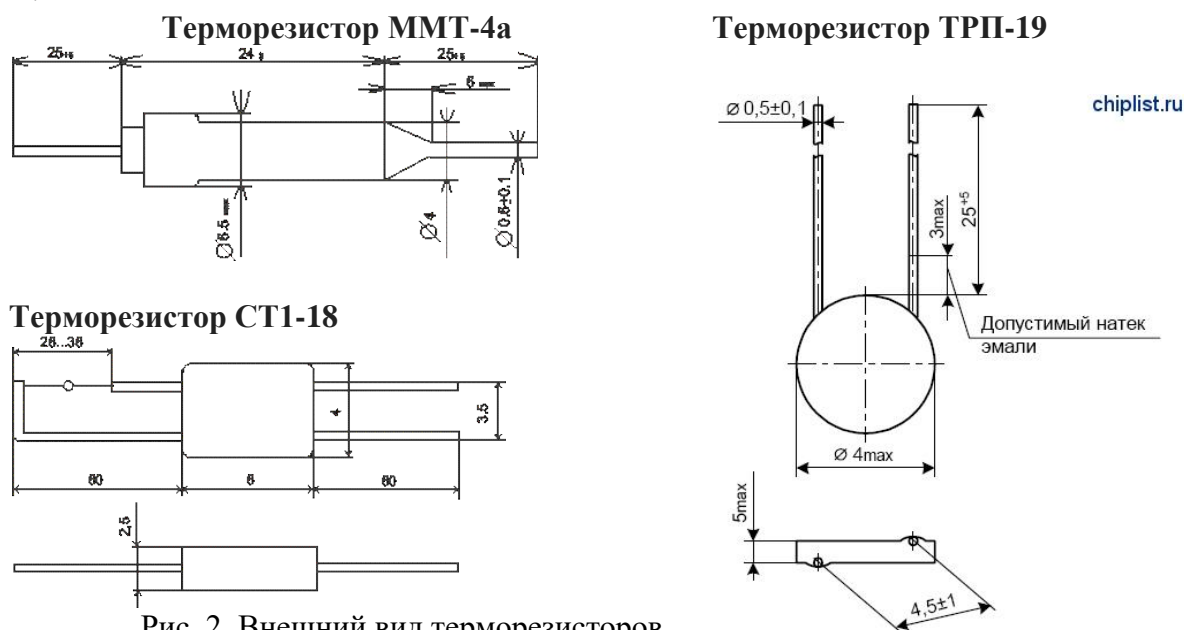


Рис. 2. Внешний вид терморезисторов.

На рис.2 приведены примеры цилиндрического металлического корпуса (ММТ-4а), дискового (ТРП-19) и бусинкового (СТ1-18).

При использовании терморезисторов в качестве датчиков необходимо учитывать скорость их реагирования на изменение измеряемой температуры, которая называется инерционностью и характеризуется постоянной времени τ , измеряемой в секундах (это время, за которое при ступенчатом изменении температуры среды изменение сопротивления датчика достигнет $\approx 0,7$ установившегося значения). Инерционность находится в прямой зависимости от конструкции, размеров резистора и теплопроводности окружающей среды. Приведенный на рис. 2 терморезистор ММТ-4А имеет $\tau = 115$ с., а СТ1-18 – $\tau = 1$ с.

Для измерения температуры воздуха чаще применяют терморезисторы исполнения аналогичного СТ1-18. Основные технические характеристики этих терморезисторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики терморезисторов..

Тип терморезистора	Пределы номинального сопротивления при 20 °С, кОм	Допуск, %, не более	Интервал рабочих температур, °С		ТКС, %/°С, при 20°С
			от	до	
СТ1-18	1,5; 2,2; 22;33; 1500; 2200 при 150 С	20	-60	+300	2,2...5,0 (при 150 С)
СТ3-18	0,68; 1,0; 1,5; 2,2; 3,3	20	-90	+125	2,6...4,1
СТ1-19	3,3; 4,7; 6,8; 10; 100; 150; 1500; 2200 при 150 С	20	-60	+300	2,35...4,0 (при 150 С)
СТ3-19	2,2; 10; 15	20	-20	+125	3,4...4,5
СТ3-23	0,022; 0,0027; 0,0033; 0,0039; 0,0047	10; 20	0	+125	3,05...3,75

2. Разработка и исследование схемы электронного термометра

В первой лабораторной работе была изучена схема резистивного делителя напряжения. Его выходной сигнал $U_{вых}$ описывается выражением

$$U_{вых} = U_{вх} \times \beta = R_2 \times I_2 = R_2 \times U_{вх} / (R_1 + R_2) = U_{вх} \times R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2)$$

Из этого выражения видно, что $U_{вых}$ зависит от величины сопротивления R_1 . Причем при значениях β близких к 0,5 эта зависимость линейная. Простейшая схема с зависящим от температуры воздуха t° выходным сигналом представлена на рис. 3.

Необходимо разработать прибор, обеспечивающий измерение температуры в диапазоне от 0°С до + 40°С. Напряжение электропитания 9 В. Терморезистор СТ1-18-33К±20% имеет ТКС = 2,5 %/С и сопротивление 33 кОм при 20°С.

Проведем расчет данной схемы.

1. При вычислениях пренебрежем погрешностью допуска номинала и нагревом терморезистора протекающим через него током.

2. Используя выражение $R(t) = R_{20} (1 + ТКС \times (t - 20))$, (3) вычислим диапазон изменения сопротивления резистора R_1 . Он составит от 16,5 до 49,5 кОм. Среднему значению диапазона измеряемых величин соответствует температура 20°С и сопротивления резистора $R_1 = 33$ кОм. Выходное напряжение при любых изменениях R_1 может меняться в диапазоне от 0 до 9В. Середине диапазона соответствует $U_{вых} = 4,5$ В, что соответствует $R_2 = 33$ кОм.

3. При изменении температуры R_2 в диапазоне от 0°С до + 40°С его сопротивление меняется от 16,5 до 49,5 кОм, а величина выходного сигнала $U_{вых}$ – в диапазоне от 3 до 6 В.

Недостатком схемы рис.3 является ненулевое значение выходного сигнала $U_{вых}$ при нулевой температуре t° воздуха. Для устранения этого недостатка составим схему из двух делителей напряжения. Она представлена на рис. 4 и называется мостовой измерительной схемой.

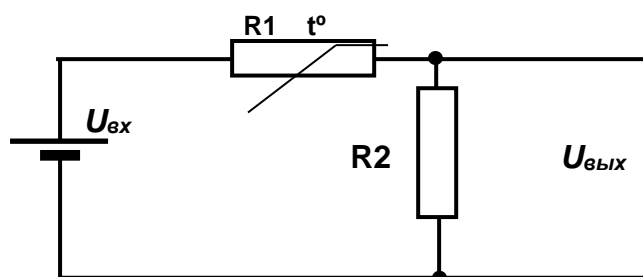


Рис. 3. Датчик температуры.

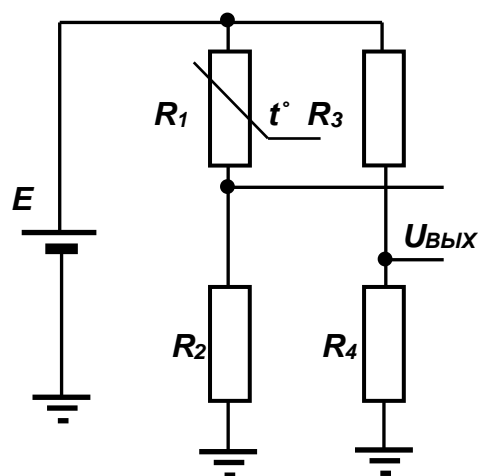


Рис. 4. Схема измерения температуры воздуха.

Выходной сигнал схемы описывается выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = E \left(\frac{R_2}{R_2+R_1} - \frac{R_4}{R_4+R_3} \right) \quad (4)$$

Из соображений предпочтения работы схемы с выходными сигналами в середине возможного диапазона ($E/2$) и для упрощения расчетов примем

$$R_1=R_3=R_4=R_2, \quad (5)$$

где сопротивление резистора R_1 определяется при температуре $t^\circ = 0^\circ\text{C}$. В этом случае выражение (4) примет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = E \left(\frac{R_2}{R_2+R_1} - 0.5 \right) \quad (6)$$

На рис. 5 сплошной линией представлен график функции выражения (6).

Зависимость величины R_1/R_2 от измеряемой температуры не линейна. Поэтому из графика видно, что зависимость выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ от температуры будет существенно нелинейной.

При измерении температуры градуированным в градусах вольтметром желаемый вид функции зависимости $U_{\text{ЛВЫХ}}$ от R_1/R_2 изображен пунктирной линией. Эта желаемая функция преобразования температуры в напряжение имеет вид:

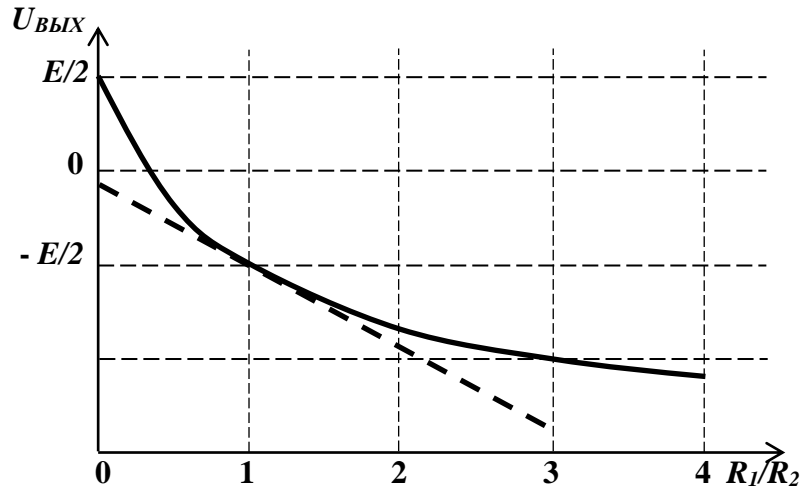


Рис.5. Зависимость выходного сигнала от величины сопротивления R_1 .

$$U_{\text{ЛВЫХ}} = R_1 \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dR_1} = \frac{-ER_1R_2}{(R_1+R_2)^2} \quad (7)$$

Систематическая абсолютная погрешность ΔU , вызываемая нелинейностью функции преобразования, определяется выражением:

$$\Delta U = U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ЛВЫХ}} = E \left[\frac{R_2}{R_2+R_1} - 0.5 - \frac{R_1R_2}{(R_2+R_1)^2} \right] = E \frac{(R_1-R_2)^2}{2(R_1+R_2)^2}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) определим вызываемую нелинейностью функции преобразования относительную систематическую погрешность φ проектируемого электронного термометра:

$$\varphi = 100 \frac{\Delta U}{U_{\text{ЛВЫХ}}} = 50 \frac{(R_1-R_2)^2}{1} \frac{-1}{R_1R_2} = 50 \frac{-R_1^2+2R_1R_2-R_2^2}{R_1R_2} = 50 \frac{-(\frac{R_1}{R_2})^2+2\frac{R_1}{R_2}-1}{\frac{R_1}{R_2}}, \% \quad (9)$$

В задании на проектирование обычно указывают требуемую погрешность средств измерения. Связь этой погрешности с параметрами элементов схемы рис.4 установлена выражением (9), которое является квадратным уравнением. Решив его, получим допустимый диапазон соотношений R_1/R_2 , обеспечивающий погрешность, не превышающую величины φ .

$$\left(\frac{R_1}{R_2}\right)_{1,2} = \frac{(100+\varphi) \pm \sqrt{(100+\varphi)^2 - 10000}}{100} = \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right) \pm \sqrt{\frac{(100+\varphi)^2}{100^2} - 1};$$

$$\left(1 + \frac{\varphi}{100}\right) - \sqrt{\frac{(100+\varphi)^2}{100^2} - 1} \leq \frac{R_1}{R_2} \leq \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right) + \sqrt{\frac{(100+\varphi)^2}{100^2} - 1}; \quad (10)$$

В реальной схеме резисторы имеют допуски номиналов. Поэтому для регулировки соответствия нулевых показаний нулевой температуре в схему необходимо добавить подстроечный потенциометр (R5 на рис. 6).

При измерении $U_{вых}$ вольтметром попытаемся добиться соответствия $1\text{мВ} = 1^\circ\text{C}$. Максимальная измеряемая температура равна $+40^\circ\text{C}$, а максимальное значение $U_{вых} = 3\text{В} = 3000\text{мВ}$. То есть выходной сигнал надо уменьшить в $3000 / 40 = 75$ раз. Для обеспечения уменьшения $U_{вых}$ выходной сигнал подключим ко входу

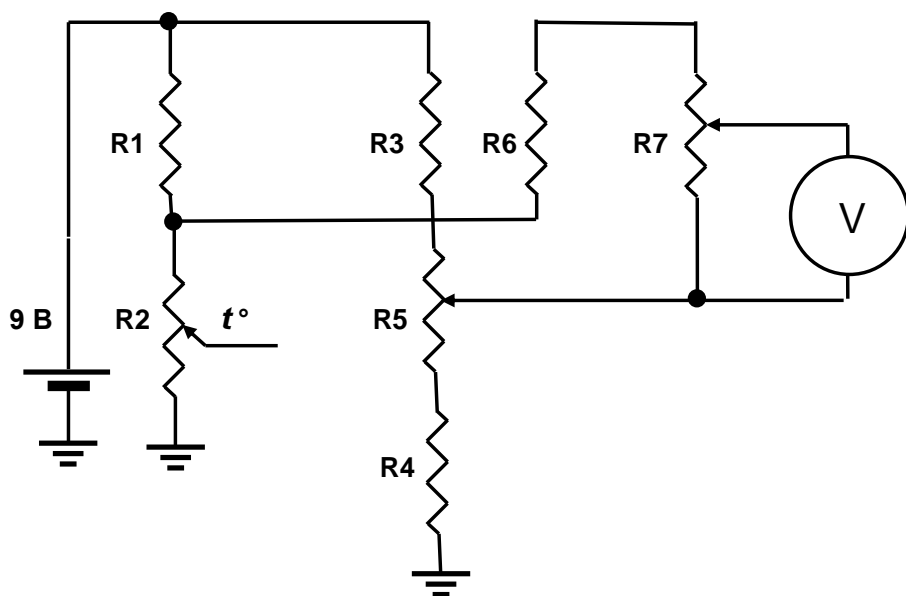


Рис. 6. Схема прибора для измерения температуры воздуха.

делителя напряжения, собранного на резисторах R6 и R7, как это показано на рис. 6. R7 выполнен регулируемым для точной настройки соответствия величины выходного напряжения максимальной температуре 40°C . При подборе подстроечных резисторов сохранено соотношение $R1 + R2 = R3 + R4 + R5$. Коэффициент β делителя R6 и R7 составляет $1/20 \dots 1/\infty$. Ориентировочные значения номиналов резисторов следующие:

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
33 кОм	33 кОм	24 кОм	24 кОм	18 кОм	330кОм	18кОм

3. Пример использования мостовой измерительной схемы для измерения скорости движения воздуха

В выполненной работе мостовая схема использовалась для настройки соответствия выходного напряжения (мВ) измеряемой температуре ($t^\circ\text{C}$). В измерительной технике использование мостовой измерительной схемы более широко. Рассмотрим ее использование в приборе для измерения скорости движения воздуха. Схема электрическая

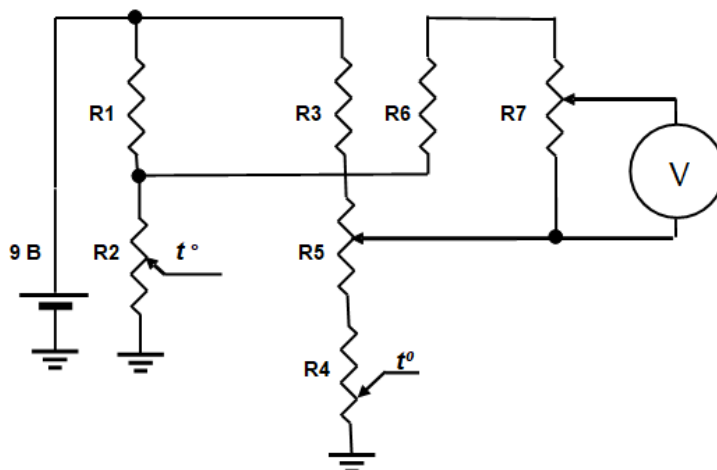


Рис. 7. Схема прибора для измерения скорости движения воздуха.

принципиальная такого прибора дана на рис. 7. Она работает следующим образом: Величины напряжений в точке соединения R1 и R2 и на подвижном контакте регулировочного резистора R5 зависят от температуры окружающей их среды. Причем при идентичности находящихся в одинаковой среде терморезисторов

R2 и R4 при любой температуре этой среды напряжения на этих рассматриваемых точках будет одинаково. Разность этих двух напряжений будет нулевой. Если один из терморезисторов обдувать воздухом, то его температура снизится и разность напряжений на терморезисторах будет не нулевой, а пропорциональной скорости движения воздуха вокруг этого терморезистора. То есть прибор, собранный по схеме рис. 7, позволяет измерять скорость движения воздуха.

4. ЗАДАНИЕ

1. Выполнить расчет схемы рис. 6 в соответствии со своим номером варианта. Тип терморезистора – 1СТ18. Он имеет ТКС = 2,5 %/С и при 20°С сопротивление $R_{2\pm 20\%}$, указанное в таблице 9. Также в таблице 2 указан диапазон подлежащих измерению температур. При вычислениях пренебречь погрешностью допуска номинала всех используемых резисторов, ТКС всех резисторов (кроме R2) и нагревом терморезистора R2 протекающим через него током. Вызываемая нелинейностью функции преобразования относительная систематическая погрешность ϕ проектируемого электронного термометра не должна превышать 5%.

Таблица 2. Данные для выполнения задания

№ вар.	R2, кОм	Диапазон измеряемых температур, °С
1	1,5	0 – 30
2	2,2	10 – 40
3	22	0 – 50
4	33	0 – 60
5	1,5	0 – 70
6	2,2	0 – 80
7	22	0 – 90
8	33	0 – 100
9	1,5	0 – 110
10	2,2	0 – 120
11	22	0 – 30
12	33	10 – 40
13	1,5	0 – 50
14	2,2	0 – 60
15	22	0 – 70
16	33	0 – 80
17	1,5	0 – 90
18	2,2	0 – 100
19	22	0 – 110
20	33	0 – 120
21	1,5	0 – 30
22	2,2	10 – 40
23	22	0 – 50
24	33	0 – 60
25	1,5	0 – 70
26	2,2	0 – 80
27	22	0 – 90
28	33	0 – 100
29	1,5	0 – 110
30	2,2	0 – 120

2. Произвести моделирование рассчитанной схемы в программной среде Multisim. Терморезистор R2 моделировать как обычный резистор с установкой требуемой величины ТКС.

3. Установить начальную температуру резистора R2 и потенциометром R5 настроить минимальные показания прибора.

4. Установить максимальную температуру резистора R2 и потенциометром R5 настроить максимальные показания прибора.

5. Выполнить экспериментальное исследование модели схемы для значений измеряемой температуры (включая минимальное и максимальное значения).

6. Вычислить погрешности измерений температур в диапазоне от минимального до максимального измеряемых значений. Объяснить причину возникновения этих погрешностей.

Оформить все полученные результаты в виде отчета. Образец оформления отчета приведен в ПРИЛОЖЕНИИ 1 описания первой лабораторной работы. Отчет сформировать в виде файла Word (.doc или .docx). К отчету приложить модель исследуемой схемы в виде файла Multisim (.ms13 или .ms14). Эти два файла необходимо передать преподавателю, прикрепляя их на странице задания по кнопке «Загрузить файл».