

## РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА МОЛОКА НА ПРИЁМНОМ ПУНКТЕ МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

**Чуйкова А. В., студ.; Корнев В. Д., доц., к.т.н., доц.**

*(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)*

Общая характеристика методов измерения температуры.

Температура не является непосредственно измеряемой физической величиной. Ее значение определяют косвенно с помощью чувствительных к температуре физических параметров, которые могут быть непосредственно измерены. Используемые для этой цели вещества называют термометрическими. Значение температуры определяют по изменению какого-либо физического свойства (механического, электрического, электромагнитного, оптического...) термометрического вещества.

Методы измерения температуры подразделяются на контактные и бесконтактные. Контактные методы основаны на введении в измеряемую среду измерительного зонда, содержащего соответствующий термометрический элемент. При этом за температуру среды принимают температуру измерительного зонда. Бесконтактные методы основаны на измерении термометрических свойств самой среды.

Наиболее распространенные контактные методы по видам их термометрических свойств можно разделить на следующие группы:

- механические;
- электрические;
- термодинамические;
- оптические.

Термометрическим свойством вещества, используемым в механических термометрах, является тепловое расширение газа, жидкости или твердого тела.

Электрические термометры — самые многочисленные средства измерения (образцовые и рабочие) температуры различного назначения.

Термометры сопротивления.

Для измерения температуры жидких и газообразных сред широко применяются термометры сопротивления, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента (ЧЭ) от температуры.

Важной характеристикой материала ЧЭ ТС является температурный коэффициент сопротивления:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT},$$

где  $R$  — сопротивление,  $T$  — температура материала.

Для некоторых металлов (платина, медь, никель - в узком диапазоне температур, ...) с достаточной степенью точности можно считать приведенную выше зависимость линейной, т.е.:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha T).$$

Лучшим материалом для ТС является платина высокой чистоты. Она имеет:

- высокую стабильность свойств;
- высокую воспроизводимость характеристик;
- хорошую линейность зависимости сопротивления от температуры;
- большое удельное сопротивление;
- высокую коррозионную стойкость.

Ее недостаток — высокая стоимость.

Термометры сопротивления на основе резистивных мостов.

В информационно-измерительных системах (ИИС) в качестве измерителей температуры часто применяются термометры сопротивления (ТС) на основе неравновесных мостовых схем. Принцип действия этих измерителей, как и всех ТС, основывается на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента, помещенного в исследуемую среду, от температуры среды.

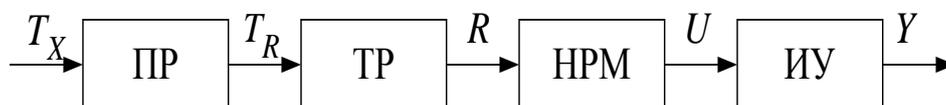


Рисунок 1 – Измерительная цепь термометра сопротивления

Первый измерительный преобразователь цепи «ПР» преобразует измеряемую температуру среды  $T_X$  в температуру терморезистора  $T_R$ ; второй (терморезистор «ТР») - температуру  $T_R$  в изменение электрического сопротивления  $R$ ; третий (неравновесный резистивный мост «НРМ») преобразует сопротивление  $R$  в напряжение  $U$ , функционально связанное с измеряемой температурой; четвертый (усилитель измерительный «ИУ») – выходное напряжение моста  $U$  в выходной сигнал (показания) прибора  $Y$ .

Терморезисторы из химически чистой платины, применяемые в эталонных и образцовых СИ, обеспечивают высокую точность измерения температуры – порядка  $\Delta T = \pm(1...3) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ . Точность платиновых терморезисторов, используемых в рабочих СИ, в (3...5) раз хуже из-за применения в них менее чистой платины.

Одним из источников погрешности термометра сопротивления, вносимой преобразователем «ТР», является отклонение фактического сопротивления терморезистора от номинального значения. Согласно ГОСТу допускаемое отклонение сопротивления платиновых и медных терморезисторов II класса не должно превышать  $\pm 0,1\%$  от номинального значения резистора при температуре  $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Так, для медного терморезистора, номинальное сопротивление которого при  $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$  равно  $R_0=50 \text{ Ом}$ , отклонение  $\Delta R_0$  от номинального значения не должно превышать  $\pm 0,05 \text{ Ом}$ . Обусловленная этим отклонением погрешность измерения температуры является систематической, неизменна в диапазоне измерения (аддитивная) и принимает значения, лежащие в интервале:

$$\Delta_{TP}^A = \frac{\Delta R_0}{\alpha \cdot R_0} = \frac{\pm 0,05 \text{ Ом}}{4,28 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C} \cdot 50 \text{ Ом}} = \pm 0,23 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (2)$$

где  $\alpha=4,28 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  – номинальное значение ТКС меди.

Еще одним источником погрешности, вносимой преобразователем «ТР», является отклонение фактического ТКС терморезистора от номинального значения. Предельное значение этой составляющей погрешности при температуре  $T=100 \text{ }^\circ\text{C}$  определяется по допускаемому отклонению от номинального значения относительного сопротивления терморезистора  $W_{100}$ :

$$W_{100} = \frac{R(T = 100^\circ\text{C})}{R_0(T = 0^\circ\text{C})}. \quad (3)$$

По ГОСТу для медного терморезистора номинальное значение  $W_{100} = 1,4280$ , а допускаемое отклонение относительного сопротивления  $W_{100}$  от номинального значения -  $\Delta W_{100}$  - для медного терморезистора II класса при температуре  $T=100 \text{ }^\circ\text{C}$  не должно превышать значения:

$$\Delta W_{100} = \frac{\Delta R(T = 100^\circ\text{C})}{R(T = 100^\circ\text{C})} = \pm 0,0010. \quad (4)$$

Максимально допустимое отклонение ТКС  $\alpha$  от номинального, которое соответствует значению  $\Delta W_{100} = \pm 0,0010$ , определяется следующим образом:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta W_{100}}{100^\circ\text{C}} = \frac{\pm 0,0010}{100^\circ\text{C}} = \pm 1 \cdot 10^{-5} \left( \frac{1}{\% \text{C}} \right), \quad (5)$$

а вносимая погрешность при  $T=100^\circ\text{C}$  принимает значения, лежащие в интервале

$$\Delta_{TP}^M = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot T = \frac{\pm 1 \cdot 10^{-5}}{4,28 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = \pm 0,23^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Из последнего выражения видно, что эта составляющая погрешности пропорциональна значению измеряемой температуры, т.е. является мультипликативной. При температуре выше (или ниже) значения  $T=100^\circ\text{C}$  она пропорционально увеличивается (или уменьшается) относительно ( $\pm 0,23^\circ\text{C}$ .)

Таким образом, составляющие погрешности  $\Delta_{TP}^A$  и  $\Delta_{TP}^M$ , вносимые терморезистором в инструментальную погрешность измерителя, существенны. В наиболее неблагоприятном (и маловероятном) случае суммарный вклад погрешности терморезистора в инструментальную погрешность измерителя равен сумме модулей аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности. Наиболее же вероятное значение суммарной погрешности, вносимой допусками на сопротивления терморезистора, равно геометрической сумме этих составляющих погрешности:  $\Delta_{TP} = \sqrt{(\Delta_{TP}^A)^2 + (\Delta_{TP}^M)^2}$ .

\*Неравновесный резистивный мост (рис. 2) образован резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R'_3$ ,  $R''_3$  и терморезистором  $R_T$ . Мост питается от источника постоянного тока стабильным напряжением  $U_n$ .

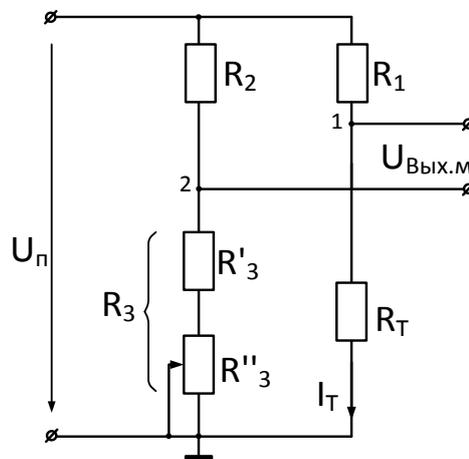


Рисунок 2 – Схема неравновесного резистивного моста ТС

Сопротивления резисторов плеч моста выбирают такими, чтобы при некоторой температуре  $T_0$  (обычно принимают  $T_0=0^\circ\text{C}$ ) мост был сбалансирован, т.е. его выходное напряжение было равно нулю. Недостаточно тщательный подбор сопротивлений плеч моста приводит к появлению на его выходе при температуре  $T_0$  напряжения  $U \neq 0$ , определяющего аддитивную погрешность моста. Эта погрешность устраняется в процессе градуировки измерителя в термостате при температуре  $T_0$  путем окончательной балансировки моста переменным резистором  $R''_3$  (при этом одновременно устраняется и аддитивная погрешность  $\Delta_{TP}^A$ , вносимая терморезистором).

Еще одна составляющая погрешности термометра сопротивления на основе неравновесного резистивного моста обусловлена нелинейностью его характеристики

преобразования по температуре чувствительного элемента (терморезистора). Действительно, даже если зависимость сопротивления терморезистора от температуры линейна, выходное напряжение ненагруженного моста связано с температурой терморезистора  $T$  следующей нелинейной зависимостью:

$$U_{\text{Вых.м}}(T) = U_{\text{П}} \cdot \left[ \frac{R_T}{R_1 + R_T} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right]. \quad (7)$$

Приведенная зависимость напряжения от температуры нелинейна, поскольку температура присутствует в неявном виде и в числителе, и в знаменателе первой дроби правой части выражения (7). Обычно в качестве номинальной характеристики преобразования моста (и измерителя температуры тоже) принимают линейную зависимость

$$U_{\text{вых.м}}(T) = k \cdot (T - T_0), \quad (8)$$

которая и используется для пересчета измеренного выходного напряжения (моста или измерителя) в значение температуры.

ТС на основе резистивного моста с линейной характеристикой преобразования.

Для выполнения точных измерений температуры нелинейность характеристики преобразования термометра сопротивления на основе резистивного моста нежелательна, поскольку она увеличивает инструментальную погрешность измерителя. Поэтому большой практический интерес представляют устройства, устраняющие нелинейность термометров сопротивления, выполненных на основе неравновесных мостовых схем. Одна из таких схем приведена на рис. 3.

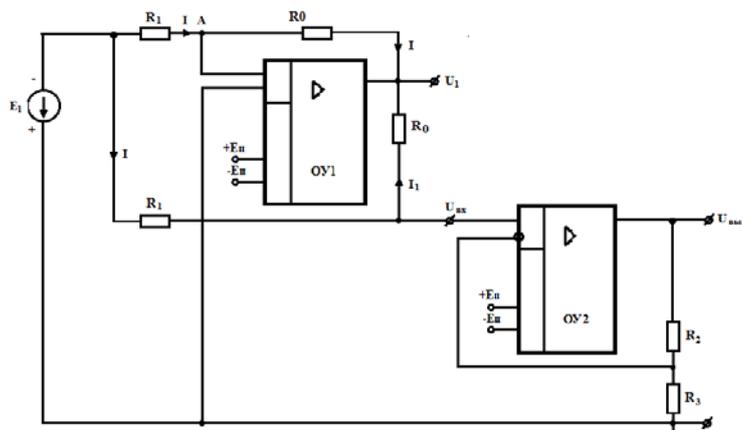


Рисунок 3 – Схема ТС на основе неравновесного резистивного моста с линейной характеристикой преобразования

В этой схеме в состав резистивного моста термометра сопротивления входят два резистора  $R_1$ , резистор  $R_0$  и терморезистор  $R_T = R_0 + \Delta R$ . Операционный усилитель ОУ1 выполняет функции линейризации характеристики преобразования моста, а операционный усилитель ОУ2 – функции усилителя согласования.

Покажем, что зависимость выходного напряжения данной схемы от приращения сопротивления терморезистора  $\Delta R$  линейна. Для этого запишем уравнение (на основании 2-го закона Кирхгофа) для напряжения, действующего на входе ОУ2:

$$U_{\text{вх}} = I_1 \cdot R_0 + U_1,$$

где  $I_1$  – ток в плече моста с резистором  $R_0$ ,  $U_1$  – выходное напряжение ОУ1.

Учитывая, что потенциалы входов ОУ1 равны, а неинвертирующий вход ОУ1 заземлен (его потенциал равен «0»), можно утверждать, что потенциал инвертирующего входа ОУ1 тоже равен нулю -  $\varphi_A = 0$ . Тогда согласно 2-му закону Кирхгофа можно записать, что:

$$I \cdot (R_0 + \Delta R) + U_1 = 0,$$

откуда следует:

$$I \cdot (R_0 + \Delta R) = -U_1,$$

где  $I$  – ток в плече моста с резистором  $R_T = R_0 + \Delta R$ .

Учитывая, что  $\varphi_A = 0$ , определяем ток  $I$  в плече моста с резистором  $R_T$ :

$$I = \frac{E_1}{R_1}.$$

Пренебрегая входными токами ОУ1 и ОУ2 и учитывая, что  $R_1 \gg \Delta R$ , можно утверждать, что  $I = I_1$ . В таком случае получаем:

$$U_{\text{ex}} = \frac{E_1}{R_1} \cdot R_0 - \frac{E_1}{R_1} \cdot (R_0 + \Delta R) = -\frac{E_1}{R_1} \cdot \Delta R.$$

Учитывая коэффициент усиления неинвертирующего усилителя на ОУ2, равный:

$$K_u^+ = \frac{R_2 + R_3}{R_3},$$

получаем выражение для выходного напряжения схемы:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ex}} \cdot K_u^+ = -\frac{E_1}{R_1} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_3} \cdot \Delta R. \quad (9)$$

Приведенное выражение (9) свидетельствует о линейном характере зависимости выходного напряжения термометра сопротивления от приращения сопротивления терморезистора  $\Delta R$ . Т.е., при линейной зависимости сопротивления терморезистора от температуры, характеристика преобразования по температуре данного термометра сопротивления оказывается линейной.

Таким образом, при изменении температуры от 0°C до 100°C сопротивление терморезистора увеличивается на 21,4 Ом и входное напряжение неинвертирующего усилителя на ОУ2 изменяется на 214 мВ. Значит, чувствительность схемы к температуре, приведенная ко входу усилителя на ОУ2 будет равна:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{U_{\text{ex}}(T = 100^\circ\text{C}) - U_{\text{ex}}(T = 0^\circ\text{C})}{100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}} = \frac{214 \text{ мВ}}{100^\circ} = 2,14 \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}}.$$

#### Перечень ссылок

1. Геращенко, О. А. Температурные измерения : справочник / О. А. Геращенко [и др.]. — Киев : Наукова думка, 1984. — 494 с.
2. Чистяков, В. С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям / В. С. Чистяков. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.
3. Селиванов, М. Н. Качество измерений : метрологическая справочная книга / М. Н. Селиванов, А. Э. Фридман, Ж. Ф. Кудряшова. — Ленинград : Лениздат, 1987. — 290 с.