Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. ХХУП, 1978 г.

КОРРЕКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРА В МОСТОВОЙ СХЕМЕ

А.А.СЕЛИВЕРСТОВ

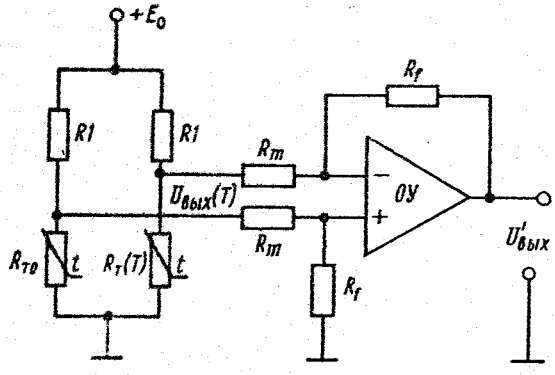


Рис.1. Принципиальная схема равновесного моста с дифференциальным включением терморезисторов и с операционным усилителем на выходе

Благодаря ряду преимуществ перед другими видами температурных преобразователей терморезисторы широко используются в различных устройствах теплового контроля – влагомерах, расходомерах, уровнемерах и т.д. В этих приборах для исключения влияния начальной температуры материала обычно используется дифференциальное включение двух терморезисторов, обладающих идентичными температурными зависимостями, в области возможного изменения начальной температуры материала. В ряде случаев, например, при создании теплоимпульсных влагомеров [3] , необходимо, чтобы зависимость между температурой измеряемого объекта и параметром преобразования (например, напряжением) была линейной в определенном интервале температур $T1-T2$. Поэтому существенным недостатком термисторов является нелинейность зависимости их сопротивления R_T от температуры T :

$$R_T = R_{T0} \exp B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right), \qquad (1)$$

где R_{T0} – номинальное сопротивление терморезистора при $T_0 = 293$ К; B – температурный коэффициент терморезистора.

Задача линеаризации температурной зависимости сопротивления терморезистора может быть решена с помощью мостовой схемы, представленной на рис.1. Это объясняется тем, что выходное напряжение $U_{вых}(R_T)$ является нелинейной функцией от R_T , поскольку выражение для него может быть записано в виде

$$U_{вых}(R_T) = E_0 \frac{R1}{R_{T0} + R1} \cdot \frac{R_{T0} - R_T(T)}{R1 + R_T(T)} . \qquad (2)$$

Так как входное сопротивление операционного усилителя $R_{вх\ ОУ} \gg R1, R_{T0}$, то достаточно провести анализ температурной зависимости напряжения на выходе мостовой схемы $U_{вых}(T)$, считая при этом, что вид зависимости напряжения на выходе операционного усилителя $U'_{вых}(T)$ полностью совпадает с видом зависимости $U_{вых}(T)$.

Наиболее полный анализ и методика расчета линейных терморезистивных мостов приведены в работах М.А.Каганова и А.З.Винарова [1, 2]. Однако воспользоваться соотношениями для расчета, приведенными в этих работах, невозможно, поскольку расчет оптимального значения сопротивления $R1$ дает отрицательные или комплексные величины, которые не реализуются в цепях постоянного тока. Это объясняется тем, что в упомянутой методике для линеаризации характеристик терморезистора, включенного в одно из плеч неравновесной мостовой схемы, используется метод вариации величин остальных трех сопротивлений мостовой схемы. Такой возможности в схеме, представленной на рис.1, нет, так как в ней возможна вариация только величины сопротивления $R1$.

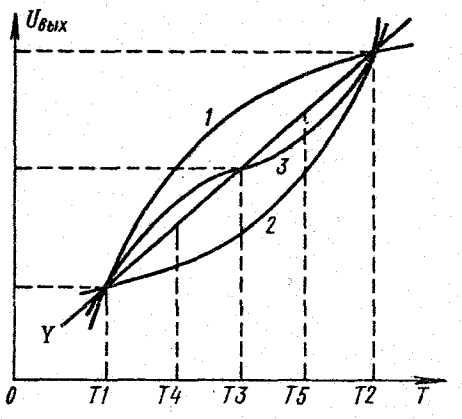


Рис.2. Зависимости напряжения на выходе моста от температуры:
1 – выпуклая; 2 – вогнутая; 3 – с тремя точками пересечения прямой $Y(T)$

Попытаемся определить оптимальную величину сопротивления $R1_{опт}$, при которой напряжение на выходе мостовой схемы максимально приближается к линейной зависимости $Y(T)$ в интервале температур $T1$–$T2$.

В зависимости от значений R_{T0}, B, $R1$, $T1$, $T2$ вид зависимости $U_{вых}(T)$ может быть существенно различным (рис.2). Очевидно, что наилучшим образом к линейной зависимости $Y(T)$ приближается кривая 3 (рис.2), имеющая три точки пересечения с прямой Y в интервале $T1$–$T2$.

Мерой наилучшего приближения зависимости $U_{вых}(T)$ к прямой $Y(T)$ может служить величина отклонения кривой $U_{вых}(T)$ от прямой $Y(T)$:

$$\delta(T) = Y(T) - U_{вых}(T) . \qquad (3)$$

Оптимальным значением $R1$ будем считать такое его значение, при котором $\delta(T)$ обращается в нуль в средней точке $T3$ интервала температур $T1$–$T2$:

$$\delta(T3) = 0 , \qquad (4)$$

$$T3 = 0{,}5(T2 - T1) .$$

Такое допущение значительно упрощает расчет величины $R1_{опт}$ и в то же время дает результаты, незначительно отличающиеся от результатов расчета с помощью математического аппарата функций наилучшего приближения Чебышева [2].

Выражение (3) можно записать в виде:

$$\delta(T) = \frac{U_{вых}(T2) - U_{вых}(T1)}{T2 - T1}(T - T1) + U_{вых}(T1) - U_{вых}(T) . \qquad (5)$$

Для уменьшения общего числа параметров и упрощения промежуточных выкладок вводим безразмерные величины $r_T(T) = \frac{R_T(T)}{R_{T0}}$ и $r1 = \frac{R1}{R_{T0}}$.

Подставляя (2) в (5), получаем

$$\delta(T) = E_0 \frac{r1}{1 + r1} \cdot \frac{\alpha_T(1 - r1)\left(\frac{\rho_T}{\alpha_T} - r1\right)}{\Delta T(r1 + r_{T1})(r_{T1} + r_{T2})[r1 + r_T(T)]} , \qquad (6)$$

где $r_{T1} = r_T(T1)$; $r_{T2} = r_T(T2)$; $\Delta T = T2 - T1$;

$$\alpha_T = r_{T1}(T2 - T) + r_{T2}(T - T1) - r_T(T)\Delta T ;$$

$$\rho_T = r_{T1}\, r_T(T)\,[T - T1] + r_{T2}\, r_T(T)[T2 - T] - r_{T1} r_{T2}\, \Delta T .$$

Из выражения (6) с учетом условия (4) получаем следующие выражения для нахождения оптимальной величины параметра $r1_{опт}$ и сопротивления $R1_{опт}$:

$$r1_{опт} = \frac{\rho_3}{\alpha_3} ;$$

$$R1_{опт} = R_{T0}\frac{\rho_3}{\alpha_3} , \qquad (7)$$

где $\alpha_3 = \alpha_T(T3) = \Delta T(0{,}5 r_{T1} + 0{,}5 r_{T2} - r_{T3})$;

$$\rho_3 = \rho_T(T3) = \Delta T(0{,}5 r_{T1}\, r_{T3} + 0{,}5 r_{T2}\, r_{T3} - r_{T1}\, r_{T2}) ;$$

$$r_{T3} = r_T(T3) .$$

Линейность зависимости $U_{вых}(T)$ оценивается величиной максимального в диапазоне $T1 - T2$ относительного отклонения

$$\Delta_{макс}(T) = \frac{\delta_{макс}(T)}{U_{вых}(T2)} \cdot 100\% . \qquad (8)$$

С достаточной для практики точностью будем считать, что своего максимального значения $\Delta_{макс}(T)$ достигает в точках $T4 = T1 + 0{,}25\Delta T$ и $T5 = T2 - 0{,}25\Delta T$, причем значения Δ_4 и Δ_5 должны иметь разные знаки (рис.2).

Чувствительность мостовой линеаризующей схемы характеризуется величиной относительной крутизны выходной характеристики:

$$S_T = \frac{1 - \dfrac{U_{вых}(T1)}{U_{вых}(T2)}}{\Delta T} \qquad (9)$$

Параметры линеаризующей мостовой схемы для интервала $T1 = 323$ K, $T2 = 373$ K

Параметр мостовой схемы	Параметр B терморезистора, 1/K						
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
Оптимальное значение $r1_{опт}$	0,1089	0,1663	0,1663	0,1484	0,1247	0,1083	0,083
Относительная ошибка линеаризации в точках максимального отклонения, %							
Δ_4(335,5 K)	2,800	0,087	0,132	0,212	0,277	0,462	0,621
Δ_5(360,5 K)	-2,200	-0,056	-0,161	-0,186	-0,391	-0,416	-0,593
Относительная крутизна выходной характеристики S_T, 10^{-2}·1/K	1,26	1,28	1,30	1,33	1,36	1,40	1,43
Максимальное относительное напряжение на выходе моста $\frac{U_{вых\ (373\ K)}}{E_0}$	0,086	0,190	0,253	0,351	0,421	0,478	0,531

В таблице представлены результаты расчета параметров мостовой линеаризующей схемы при различных значениях B терморезистора, из которых видно, что в диапазоне температур 323–373 К существуют оптимальные значения сопротивления $R1$ для значений B от 1000 до 4000. Это соответствует диапазону B всех серийно выпускаемых терморезисторов.

Рассчитанные по предложенной методике практические схемы линеаризации имеют температурные зависимости, отличие которых от линейных не превышает 1%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каганов М.А. Расчет электрических цепей с терморезисторами для моделирования линейной температурной зависимости. – Сб. трудов по агрономической физике. Л., „Гидрометеоиздат", 1972, вып. 33.

2. Каганов М.А., Винаров А.З. Вопросы методики расчета схем измерения температуры с позисторами. – Сб. трудов по агрономической физике. Л., АФИ, 1976, вып. 41.

3. Кричевский Е.С., Селиверстов А.А. Теплоимпульсные влагомеры. Измерительная техника, 1976, № 7.