

ни и интервала наблюдения, при которых обеспечивается допустимая или минимальная погрешность хранения единицы частоты и шкалы времени на заданном интервале времени хранения.

Л и т е р а т у р а

1. Levandovski W., Jiang Z. Use of GLONASS at the BIPM // Proc. 41st Annu. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2009. P. 5—13.
2. Пашев Г. П. Погрешность определения коэффициента линейного изменения и постоянного отклонения частоты высокостабильных генераторов по радиосигналам космических навигационных систем // Измерительная техника. 2011. № 5. С. 42—46; Pashev G. P. The error in determining the linear frequency drift coefficient and constant frequency deviation of highly stable oscillators by the radio signals of space navigation systems // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 5. P. 536—543.

3. Smaliy Y. S., Ibarro-Manzano O., Arceo-Miquel L. Efficient Predictive Steering of Local Clocks in GPS-based Timekeeping // Europ. Frequency and Time Forum, 2009. P. 727—732.

4. Рютман Ж. Характеристики нестабильности частоты и фазы сигналов высокостабильных генераторов // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 9. С. 70—102.

5. ГОСТ 8.967—99. ГСИ. Измерения времени и частоты. Термины и определения.

6. Пашев Г. П. Анализ дискретных алгоритмов синхронизации группы квантовых стандартов частоты // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 56—61; Pashev G. P. Analysis of discrete algorithms for synchronizing a group of quantum frequency standards // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 9. P. 1006—1014.

7. Пашев Г. П. Установка для синхронизации высокостабильных генераторов по радиосигналам космических навигационных систем // Радиоизмерения и электроника. 2011. № 15. С. 3—4.

Дата принятия 11.09.2012 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.39

Измерительный преобразователь температуры

Ю. М. БАРКОВСКИЙ, С. И. КАМАЛХОДЖАЕВ

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия:
e-mail: barkovsky_ura@mail.ru

Рассмотрена методика расчета измерительного преобразователя температуры, выполненного по схеме автокомпенсатора напряжения на основе использования операционного усилителя и мостовой схемы с двумя диагоналями питания. Предложенная методика позволяет определить номиналы всех резисторов из условий получения заданных характеристик измерительного преобразователя температуры.

Ключевые слова: измерительный преобразователь температуры, мостовая схема, нелинейная характеристика.

The method of calculation of measuring temperature converter designed according to the scheme of self-balancing voltage potentiometer based on usage of operation amplifier and bridge circuit with two power diagonals is considered. This method allows to determine the nominal values of all resistors according to conditions for obtaining the specified characteristics of measuring temperature converter.

Key words: measuring temperature converter, bridge circuit, nonlinear characteristic.

В рассматриваемом измерительном преобразователе (ИП) сигнала от термопреобразователя сопротивления (ТС) в напряжение постоянного тока 0—10 В использован принцип дополнительного изменения тока в ТС с нелинейной характеристикой путем создания в мостовой схеме (МС) второй диагонали питания [1], к которой подводится обратная связь от измерительной диагонали.

В [1] отмечено, что возможно несколько вариантов построения ИП температуры, работающих в комплекте с ТС. На рис. 1 приведена схема одного из подобных преобразователей, предназначенного для применения в качестве входного усилителя в аналоговых и цифровых измерителях температуры [2]. При помощи трехпроводной линии связи ТС включен в плечо ab мостовой схемы МС так, что два провода этой линии находятся соответственно в соседних плечах ab и ad ,

а третий — во входной цепи операционного усилителя ОУ. Линии связи с подгоночными резисторами на рис. 1 не показаны. Измерительная диагональ ac соединена со входами ОУ, а диагональ питания db подключена к стабилизатору тока СТ. Выходное напряжение U ОУ подается на последовательно соединенные резисторы R , R_{k2} и R_{k1} . Резистор R служит для ограничения тока I в цепи обратной связи ОУ. Резистор отрицательной обратной связи R_{k1} в плече cb необходим для выбора заданного диапазона измерения. Резистор положительной обратной связи R_{k2} в плече cd предназначен для получения линейной характеристики преобразования при использовании платиновых ТС. В плече ab последовательно с ТС включен добавочный резистор для обеспечения начала диапазона измерения. Сопротивление нагрузки между выходом ОУ и общей шиной на схеме не показано.

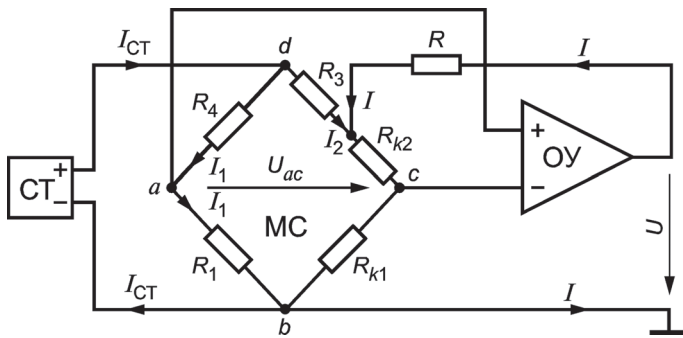


Рис. 1. Измерительный преобразователь температуры:
СТ — стабилизатор тока; МС — мостовая схема; ОУ — операционный усилитель

Изменение сопротивления плеча ab вследствие изменения температуры вызывает неравновесие МС, которое при большом коэффициенте усиления ОУ фактически сводится к нулю вследствие изменения тока I , подводимого к резисторам обратной связи R_{k1} и R_{k2} . Так как уравнивание МС связано с дополнительным увеличением тока I_1 ТС, чувствительность схемы к изменению сопротивления ТС возрастает с увеличением тока I , что компенсирует уменьшение чувствительности как платинового ТС, так и МС к изменению температуры.

В [3] рассмотрена методика расчета ИП температуры. Ее нельзя считать совершенной, поскольку при проектировании ИП необходимо получить линейную характеристику в требуемом диапазоне измерения, обеспечить нужный ток в ТС, минимальную погрешность от изменения сопротивлений соединительных проводов, достаточные уровни полезного сигнала для уменьшения погрешности от смещения нуля ОУ и напряжения на диагонали питания db МС. Кроме того, должны быть указаны ограничения, при которых схема не может быть реализована или ее реализация неудовлетворительна, формулы для расчета должны быть предельно простыми.

Работа рассматриваемого ИП описывается системой алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} I_{CT} &= I_1 + I_2; \\ I_1(R_1 + R_4) &= I_2(R_{k1} + R_3 + R_{k2}) + I(R_{k2} + R_{k1}); \\ U &= I(R + R_{k2} + R_{k1}) + I_2(R_{k2} + R_{k1}); \\ U_{ac} &= I_1R_1 - I_2R_{k1} - IR_{k1}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Приведенные уравнения составлены на основе законов Кирхгофа, при этом принято, что входное сопротивление ОУ равно бесконечности, а выходное — нулю. Решая (1), находим напряжение на измерительной диагонали ac :

$$\begin{aligned} U_{ac} &= \left\{ I_{CT} \left[R_1 \left(R_3 + \frac{RR_{k2}}{R + R_{k1} + R_{k2}} \right) - R_4 \frac{RR_{k1}}{R + R_{k1} + R_{k2}} \right] - \right. \\ &\quad \left. - U \left[\frac{R_{k1}(R_3 + R_4)}{R + R_{k1} + R_{k2}} - \frac{R_{k2}R_1}{R + R_{k1} + R_{k2}} \right] \right\} \times \\ &\quad \times \left[R_1 + R_3 + R_4 + \frac{(R_{k1} + R_{k2})R}{R + R_{k1} + R_{k2}} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Напряжение $U_{ac} = U'_{ac} - U''_{ac}$. Составляющая U'_{ac} зависит от тока I_{CT} , а U''_{ac} — от напряжения U , подведенных соответственно к первой и второй диагоналям питания. Разработанный ИП — это автокомпенсатор постоянного напряжения, в котором указанные составляющие уравниваются друг друга. Роль автоматического уравнивающего устройства выполняет ОУ. При коэффициенте усиления ОУ, равном бесконечности, $U'_{ac} = U''_{ac}$. Выражение для напряжения U'_{ac} позволяет оценить погрешность от смещения нуля ОУ.

Если учитывать, что ОУ имеет коэффициент усиления k , то в четвертом уравнении системы (1) следует принять $U_{ac} = U/k$. Решая полученную таким образом систему уравнений, находим выражения для выходного напряжения U и тока I_1 ТС:

$$U = I_{CT} [R_1(R_3(R + R_{k1} + R_{k2}) + RR_{k2}) - R_4RR_{k1}]/d; \quad (3)$$

$$I_1 = I_{CT} [R_{k1}R_3 + (R_{k1} + R_{k2})R/k + (R + R_{k1} + R_{k2})R_3/k]/d, \quad (4)$$

где $d = (R_{k1} + (R + R_{k1} + R_{k2})/k)(R_3 + R_4) - (R_{k2} - (R + R_{k1} + R_{k2})/k)R_1 + (R_{k1} + R_{k2})R/k$.

Введем следующие обозначения:

$$R_{k1}^3 = RR_{k1}/(R + R_{k1} + R_{k2}); R_{k2}^3 = RR_{k2}/(R + R_{k1} + R_{k2}). \quad (5)$$

Так как плечо ab содержит платиновый ТС, тогда $R_1 = R_1^H + R_t - R_{th}$, где разность $R_t - R_{th}$ зависит нелинейно от измеряемой температуры t ; R_1^H , R_{th} — начальные сопротивления. В этом случае с учетом введенных обозначений получим

$$U'_{ac} = I_{CT} \frac{R_1^H(R_3 + R_{k2}^3) - R_4R_{k1}^3 + (R_3 + R_{k2}^3)(R_t - R_{th})}{R_1^H + R_3 + R_4 + R_{k1}^3 + R_{k2}^3 + (R_t - R_{th})}; \quad (6)$$

$$U = a/b, \quad (7)$$

$$\text{где } a = I_{CT} R \left[R_1^H(R_3 + R_{k2}^3) - R_4R_{k1}^3 + (R_3 + R_{k2}^3)(R_t - R_{th}) \right];$$

$$\begin{aligned} b &= (R_{k1}^3 + R/k)(R_3 + R_4) - (R_{k2}^3 - R/k)R_1^H + (R_{k1}^3 + R_{k2}^3)R/k - \\ &\quad - (R_{k2}^3 - R/k)(R_t - R_{th}); \end{aligned}$$

$$I_1 = I_{CT} \left[(R_{k1}^3 - R/k)R_3 + (R_{k1}^3 + R_{k2}^3)R/k \right] / b. \quad (8)$$

Нелинейность измерительной характеристики ИП. С увеличением измеряемой температуры крутизна характеристики преобразования платинового ТС уменьшается. Знаменатель в (7) с увеличением разности $R_t - R_{th}$ уменьшается, крутизна характеристики ИП возрастает. При этом по ме-

тоту последовательной взаимной коррекции можно получить результирующую линейную характеристику преобразования напряжение — температура.

Зависимость $U(R_t - R_{th})$ представляет собой гиперболу, которая однозначно определяется координатами трех заданных точек. Поэтому характеристика преобразования (7) позволяет найти погрешность от нелинейности, равную нулю в трех точках шкалы, например, в начале, конце и середине. Для этого в (7) необходимо принять, что $U = 0$ при $R_t = R_{th}$, $U = U_k$ при $R_t = R_{tk}$, $U = 0,5U_k$ при $R_t = R_{tc}$, где U_k — выходное напряжение ИП, относящееся к концу шкалы; R_{th} , R_{tc} , R_{tk} , R_t — сопротивления ТС, соответствующие началу t_h , середине t_c , концу t_k и промежуточной t точкам шкалы, которые определяются по номинальной статической характеристике преобразования на стандартные ТС согласно [4].

В результате интерполяции находим условия, при выполнении которых зависимость (7) будет проходить через три заданные точки на линейной градуировочной характеристике $U_{гр} = U_k (t - t_h) / (t_k - t_h)$:

$$R_1^H (R_3 + R_{k2}^3) = R_4 R_{k1}^3; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & (R_{k1}^3 + R/k) (R_3 + R_4) - (R_{k2}^3 - R/k) R_1^H + (R_{k1}^3 + R_{k2}^3) R/k = \\ & = I_{CT} R (R_3 + R_{k2}^3) (R_{tc} - R_{th}) (R_{tk} - R_{th}) / [U_k (R_{tk} - R_{tc})]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$R_{k2}^3 - \frac{R}{k} = \frac{I_{CT} R (R_3 + R_{k2}^3) (2R_{tc} - R_{tk} - R_{th})}{U_k (R_{tk} - R_{tc})}. \quad (11)$$

С учетом условий (9) — (11) приведем (7) к виду

$$U = \frac{U_k (R_{tk} - R_{tc}) (R_t - R_{th})}{(R_{tc} - R_{th}) (R_{tk} - R_{th}) - (2R_{tc} - R_{tk} - R_{th}) (R_t - R_{th})}. \quad (12)$$

Используя (12), определяем относительную приведенную нелинейность характеристики преобразования $U = f(t)$:

$$\gamma = \frac{(R_{tk} - R_{tc}) (R_t - R_{th})}{(R_{tc} - R_{th}) (R_{tk} - R_{th}) - (2R_{tc} - R_{tk} - R_{th}) (R_t - R_{th})} - \frac{t - t_h}{t_k - t_h}. \quad (13)$$

Погрешность от нелинейности зависит от диапазона измерения и положения узлов интерполяции и не зависит от номинального значения сопротивления R_t при 0 °С. Если узлы интерполяции R_{t1} , R_{t2} размещены внутри диапазона измерения, то (13) примет вид

$$\gamma = \frac{(R_{t2} - R_{tc}) (R_t - R_{t1}) (x_2 - x_1)}{(R_{tc} - R_{t1}) (R_{t2} - R_{t1}) - (2R_{tc} - R_{t2} - R_{t1}) (R_t - R_{t1})} - (x - x_1), \quad (14)$$

где R_{t1} , R_{t2} — сопротивления ТС при температурах t_1 и t_2 ; $x = (t - t_h) / (t_k - t_h)$, $x_1 = (t_1 - t_h) / (t_k - t_h)$, $x_2 = (t_2 - t_h) / (t_k - t_h)$.

Результаты расчета погрешности от нелинейности γ по (14) для различных диапазонов измерения температуры при $x_1 = 0,5 - \sqrt{3}/4$, $x_2 = 0,5 + \sqrt{3}/4$, $x_c = 0,5 (x_1 + x_2)$ приведены на рис. 2.

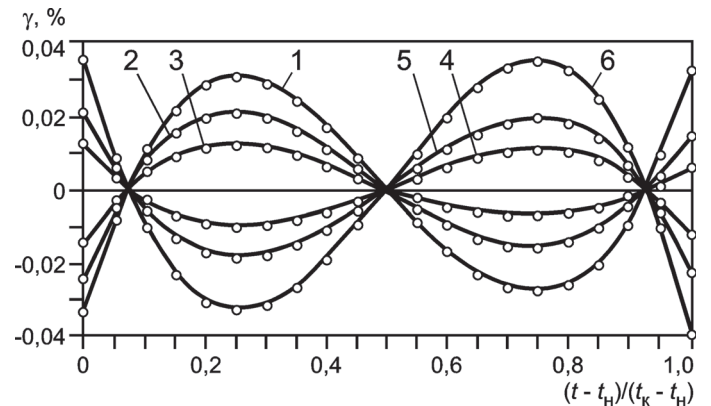


Рис. 2. Результаты расчета погрешности нелинейности γ для различных пределов измерения: $-(200 - 70)$; $-120 - +30$; $-90 - +50$; $300 - 650$; $0 - 500$; $0 - 650$ °С — соответственно кривые 1 — 6

Чтобы получить выражение для определения тока I_1 ТС, из (9) найдем R_4 и подставим в левую часть уравнения (10). После преобразований имеем

$$\begin{aligned} & (R_{k1}^3 + \frac{R}{k}) R_3 + \frac{R}{k} (R_{k1}^3 + R_{k2}^3) = \\ & = \frac{R_{k1}^3 I_{CT} R (R_3 + R_{k2}^3) (R_{tc} - R_{th}) (R_{tk} - R_{th})}{(R_1^H + R_{k1}^3) U_k (R_{tk} - R_{tc})}. \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнение (8) для тока I_1 ТС с учетом (10), (11), (15) примет вид

$$I_1 = \frac{I_{CT} R_{k1}^3 (R_{tc} - R_{th}) (R_{tk} - R_{th})}{(R_1^H + R_{k1}^3) ((R_{tc} - R_{th}) (R_{tk} - R_{th}) - (2R_{tc} - R_{tk} - R_{th}) (R_t - R_{th}))}. \quad (16)$$

С ростом R_t ток I_1 ТС увеличивается и определяется соотношением сопротивлений R_{k1}^3 и R_1^H . Из (16) при $R_t = R_{th}$ находим выражение для начального тока I_1^H ТС, которые запишем как

$$R_1^H = R_{k1}^3 (I_{CT} / I_1^H - 1). \quad (17)$$

Уравнение (17) является условием обеспечения заданного тока ТС в начале диапазона измерения.

Погрешность от равноценного изменения сопротивлений соединительных проводов линии связи. Поскольку, как отмечалось выше, провода линии связи входят в плечи ab , ad и во входную цепь OU (см. рис. 1), будем полагать, что R_1^H и R_4 имеют равноценные приращения ΔR_{Δ} вследствие изменения сопротивлений соединительных проводов трехпроводной линии связи. При этом числитель a и знаменатель b в (7) соответственно получают приращение Δa и Δb , а напряжение U — приращение ΔU_{Δ} . Тогда (7) примет вид

$$U + \Delta U_{\text{л}} = (a + \Delta a)/(b + \Delta b), \quad (18)$$

$$\text{где } \Delta a = I_{\text{СТ}} R (R_3 + R_{k2}^3 - R_{k1}^3) \Delta R_{\text{л}}; \Delta b = (R_{k1}^3 - R_{k2}^3 + 2R/k) \Delta R_{\text{л}}.$$

Вычитая U из правой и левой частей (18), после преобразований с учетом того, что $a = Ub$, находим выражение для абсолютной погрешности от равноценного изменения сопротивлений соединительных проводов:

$$\Delta U_{\text{л}} = (\Delta a - \Delta b U)/(b + \Delta b).$$

Погрешность от любых равноценных изменений сопротивлений соединительных проводов будет равна нулю в средней точке шкалы, если выполнено условие $\Delta a = 0,5 U_{\text{к}} \Delta b$. В этом случае при $b \gg \Delta b$ относительную приведенную погрешность от равноценного изменения сопротивлений соединительных проводов выразим как

$$\gamma_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л}} / U_{\text{к}} = (0,5 - U/U_{\text{к}}) \Delta b/b, \quad (19)$$

а условие $\Delta a = 0,5 U_{\text{к}} \Delta b$ в соответствии с (18) представим в виде

$$I_{\text{СТ}} R (R_3 + R_{k2}^3 - R_{k1}^3) = 0,5 U_{\text{к}} (R_{k1}^3 - R_{k2}^3 + 2R/k). \quad (20)$$

С учетом уравнения (20) получим

$$\Delta b = 2 I_{\text{СТ}} R (R_3 + R_{k2}^3 - R_{k1}^3) \Delta R_{\text{л}} / U_{\text{к}}.$$

Используя (10), (11) в уравнении (7) для b , найдем

$$b = \frac{I_{\text{СТ}} R (R_3 + R_{k2}^3)}{U_{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})} \times \\ \times \left((R_{\text{тс}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) - (2R_{\text{тс}} - R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{т}} - R_{\text{тн}}) \right).$$

В результате (19) примет вид

$$\gamma_{\text{л}} = \frac{2(0,5 - U/U_{\text{к}}) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}}) (R_3 + R_{k2}^3 - R_{k1}^3) \Delta R_{\text{л}}}{(R_3 + R_{k2}^3) \left((R_{\text{тс}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) - (2R_{\text{тс}} - R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{т}} - R_{\text{тн}}) \right)}.$$

Погрешность от равноценного изменения сопротивлений соединительных проводов при $\Delta R_{\text{л}} > 0$ имеет положительный знак в начале и отрицательный в конце шкалы. При $R_{\text{т}} = R_{\text{тк}}$ и $U = U_{\text{к}}$ получаем уравнение для погрешности в конце шкалы

$$\gamma_{\text{л}}^{\text{к}} = -\Delta R_{\text{л}} (R_3 + R_{k2}^3 - R_{k1}^3) / \left[(R_3 + R_{k2}^3) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) \right]. \quad (21)$$

Система уравнений (9) — (11), (17), (20), (21) позволяет спроектировать ИП температуры, для которого погрешность от нелинейности равна нулю в начале, конце и середине шкалы, ток через ТС задан, погрешность от любых равноценных изменений сопротивлений соединительных проводов

равна нулю в середине шкалы и имеет заданное значение в конце шкалы. Однако непосредственно определить неизвестные $R_{k1}^3, R_{k2}^3, R_{k1}^3, R_{k2}^3, R$ невозможно из-за нелинейности системы уравнений относительно этих сопротивлений. Указанную систему преобразуем к виду, удобному для определения неизвестных сопротивлений.

Из (9) в соответствии с (17) имеем

$$R_4 = (R_3 + R_{k2}^3) (I_{\text{СТ}} / I_1^{\text{н}} - 1). \quad (22)$$

Вычитаем (15) из (10) и получаем

$$\left(R_{k1}^3 + \frac{R}{k} \right) R_4 - \left(R_{k2}^3 - \frac{R}{k} \right) R_1^{\text{н}} = \\ = \frac{R_1^{\text{н}} I_{\text{СТ}} R (R_3 + R_{k2}^3) (R_{\text{тс}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})}{\left(R_1^{\text{н}} + R_{k1}^3 \right) U_{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}})}. \quad (23)$$

Подставляя (11) и (22) в (23), находим выражение, из которого с учетом (17) можно определить R_{k1}^3 :

$$R_{k1}^3 + \frac{R}{k} - R_{k1}^3 \frac{I_{\text{СТ}} R (2R_{\text{тс}} - R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})}{U_{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}})} = \\ = \frac{I_1^{\text{н}} R (R_{\text{тс}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})}{U_{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}})}. \quad (24)$$

Из (11) получаем

$$R_3 = \frac{U_{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}})}{I_{\text{СТ}} R (2R_{\text{тс}} - R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})} \left(R_{k2}^3 - \frac{R}{k} \right) - R_{k2}^3. \quad (25)$$

Уравнение (20) с учетом (25) будет иметь вид

$$R_{k2}^3 = R_{k1}^3 \left(1 + \frac{2 I_{\text{СТ}} R}{U_{\text{к}}} \right) \frac{(2R_{\text{тс}} - R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})}{(R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})} + \frac{2R(R_{\text{тс}} - R_{\text{тн}})}{k(R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})}. \quad (26)$$

В левой части уравнения (26) используем (11), тогда

$$R_{k1}^3 = \frac{I_{\text{СТ}} R (R_3 + R_{k2}^3) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})}{(U_{\text{к}} + 2 I_{\text{СТ}} R) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}})} - \frac{R U_{\text{к}}}{k(U_{\text{к}} + 2 I_{\text{СТ}} R)}. \quad (27)$$

Выражение (21) с учетом (27) при $k = \infty$ принимает вид

$$\gamma_{\text{л}}^{\text{к}} = -\Delta R_{\text{л}} \frac{U_{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}}) - I_{\text{СТ}} R (2R_{\text{тс}} - R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})}{(U_{\text{к}} + 2 I_{\text{СТ}} R) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}})}, \quad (28)$$

из которого определяем

$$R = \frac{U_{\text{к}} (\Delta R_{\text{л}} + \gamma_{\text{л}}^{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}})) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}})}{I_{\text{СТ}} ((2R_{\text{тс}} - R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) \Delta R_{\text{л}} - 2 \gamma_{\text{л}}^{\text{к}} (R_{\text{тк}} - R_{\text{тн}}) (R_{\text{тк}} - R_{\text{тс}}))}. \quad (29)$$

Необходимое условие реализации схемы ИП следует из (24) и (28):

$$U_K(R_{tk} - R_{tc}) > I_{CT} R(2R_{tc} - R_{tk} - R_{th}).$$

Для оценки погрешности от смещения нуля ОУ уравнение (6) с учетом (9), (17), (22) примет вид

$$U'_{ac} = I_1^H R_4 (R_t - R_{th}) \times \left[R_1^H + R_4 + \left(1 - I_1^H / I_{CT} \right) (R_t - R_{th}) \right]^{-1}. \quad (30)$$

При $R_t = R_{tk}$ из (30) получаем уравнение для конечного значения полезного сигнала

$$U'_{ac} = \frac{I_1^H R_4 (R_{tk} - R_{th})}{R_1^H + R_4 + \left(1 - I_1^H / I_{CT} \right) (R_{tk} - R_{th})}. \quad (31)$$

Напряжение на диагонали питания db МС $U_{db} = I_1(R_4 + R_1)$. С увеличением R_t оно возрастает. При $R_t = R_{tk}$ конечное значение напряжения на диагонали питания имеет наибольшее значение

$$U_{db}^K = I_1^H (R_{tc} - R_{th}) (R_4 + R_1^H + R_{tk} - R_{th}) / (R_{tk} - R_{tc}). \quad (32)$$

Порядок расчета преобразователя. Используем ТС с $W_{100} = 1,3910$, диапазон измерения $0 - 500^\circ\text{C}$, $U_K = 10\text{ В}$, $R_{\text{л}} = 5\text{ Ом}$, $I_{CT} = 4\text{ мА}$, k — коэффициент усиления ОУ задан, при $I_1^H = 0,5 I_{CT}$ ток ТС изменяется в диапазоне $2 \leq I_1 \leq 2,165119\text{ мА}$. Из [4] находим $R_{th} = 100\text{ Ом}$, $R_{tc} = 195,59\text{ Ом}$, $R_{tk} = 283,89\text{ Ом}$.

Если заданы $\gamma_{\text{л}}^K$ и $\Delta R_{\text{л}}$, то R находим по (29), R_{k1}^3 — по (24), R_1^H — по (17), R_{k2}^3 — по (26), R_3 — по (25), R_4 — по (22). Так как $R_4 = R_{d2} + R_{\text{л}}$, $R_1^H = R_{\text{л}} + R_{th} + R_{d1}$, рассчитываем добавочные сопротивления R_{d2} , R_{d1} . Полученные значения R_{k1}^3 и R_{k2}^3 позволяют при помощи (5) вычислить R_{k1} , R_{k2} . Заметим, что в (29) при $\Delta R_{\text{л}} > 0$ необходимо принять $\gamma_{\text{л}}^K < 0$. По (31) и (32) находим U'_{ac} и U_{db}^K . Если использовать резисторы стандартных номиналов, то полагаем R заданным, далее R_{k1}^3 , R_1^H , R_{k2}^3 , R_3 , R_4 , R_{d2} , R_{d1} , R_{k1} , R_{k2} , U'_{ac} и U_{db}^K вычисляем как в первом варианте. По (21) находим $\gamma_{\text{л}}^K / \Delta R_{\text{л}}$.

Результаты расчета для двух вариантов приведены в таблице.

Параметр	Варианты расчета					
	первый		второй			
k	10^5	10^5	∞	10^5	∞	10^5
R_{d1} , Ом	2445,67	1146,44	489,445	489,306	2240,3	2239,71
R , Ом	20563,8	15424,8	10^4	10^4	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
R_{d2} , Ом	2593,47	1294,24	637,25	637,101	2388,1	2387,51
R_3 , Ом	833,66	637,27	430,155	429,955	812,515	812,115
R_{k1} , Ом	3228,12	1428,67	646,608	646,438	2918,11	2917,24
R_{k2} , Ом	2233,53	755,714	230,703	230,755	1966,62	1966,29
U_{db}^K , В	11,5466	5,92068	3,07574	3,07511	10,6573	10,6547
U'_{ac} , мВ	182,341	180,818	177,781	177,778	182,209	182,209
$\gamma_{\text{л}}^K / \Delta R_{\text{л}}$, %/Ом	−0,01	−0,02	−0,0405	−0,0405	−0,0108	−0,0109

С увеличением R сопротивления МС возрастают, погрешность от равноценного изменения сопротивлений соединительных проводов уменьшается, напряжение на диагонали питания увеличивается, полезный сигнал увеличивается незначительно.

При помощи программы Multisim выполнено моделирование работы ИП температуры. Модель ИП позволяет проверить результаты расчета, учесть влияние реальных характеристик ОУ на точность работы ИП. Результаты компьютерного эксперимента для данных из таблицы подтверждают все теоретические выкладки, приведенные в статье.

Л и т е р а т у р а

1. Барковский Ю. М., Горбунов Н. И. Мостовые схемы с управляемой нелинейностью // Контрольно-измерительная техника. 1985. № 37. С. 53—57.
2. Барковский Ю. М., Гаврилов Ю. М. Совершенствование схем вторичных приборов для измерения температуры и разности температур // Приборы и системы управления. 1994. № 1. С. 26—27.
3. Малыгин В. М. Расчет измерительного преобразователя температуры с платиновым термометром сопротивления и повышенной точностью линеаризации выходного напряжения // Измерительная техника. 1995. № 1. С. 48—50; Malygin V. M. Design of a platinum resistance thermometer temperature measuring transducer and improved accuracy of linearizing the output voltage // Measurement Techniques. 1995. V. 38. N 1. P. 84—88.
4. ГОСТ 6651-94—2009. ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины меди и никеля. Общие технические условия и методы испытаний.

Дата принятия 04.05.2012 г.