

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕЗ ОПОРНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков

Преобразователи температуры на базе термосопротивления (преобразователи термосопротивления) широко применяются для измерения температуры благодаря высокой точности измерения. Типичная схема термопреобразователя приведена в книгах [1, 2]. Для измерения используется зависимость металлического сопротивления от температуры. Базовая схема измерения состоит из последовательно включенных источника опорного напряжения, резистора термосопротивления, подверженного действию измеряемой температуры и опорного сопротивления, значение которого известно заранее. В данной работе рассматривается преобразователь термосопротивлений с более простой схемой без опорного сопротивления и алгоритм обработки результатов измерений.

1. Схема измерения

Структурная схема типичного преобразователя температуры, собранного на современных электронных компонентах изображена на рис. 1. Здесь МК – микроконтроллер, ИН – источник напряжения, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, $R_{оп}$ – опорное сопротивление, $R_{Тч1}$ – термочувствительное сопротивление (находится в щупе), $R_{Тч2}$ – термочувствительное сопротивление 2 (находится в блоке электроники).

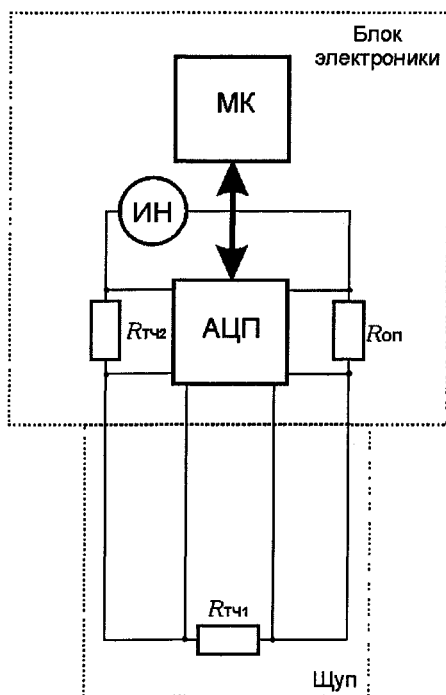


Рис. 1. Структурная схема преобразователя термосопротивления

ИН генерирует опорное напряжение U , которое вызывает ток i через контур ИН, $R_{оп}$, $R_{Тч1}$, $R_{Тч2}$. Токи, протекающие через АЦП не учитываются, поскольку входное сопротивление АЦП на несколько порядков больше сопротивления резисторов в измеряемой цепи. В качестве $R_{оп}$ используется высокоточный резистор, в качестве $R_{Тч1}$, $R_{Тч2}$ используются платиновые термосопротивления, $R_{Тч1}$ измеряет искомую температуру технологического процесса. Как показывает практика, невозможно не учитывать зависимость значений $R_{оп}$ от температуры самого $R_{оп}$. Поэтому приходится либо отдельно термостабилизировать $R_{оп}$, что и делается в прецизионных термопреобразователях, либо измерять температуру $R_{оп}$ и учитывать ее в дальнейших расчетах. $R_{Тч2}$ измеряет температуру модуля электроники для корректировки показаний, вызванных ее изменением.

Зная напряжение $U_{Rоп}$ на $R_{оп}$, $U_{RТч1}$, $U_{RТч2}$, можно найти $R_{Тч1}$, $R_{Тч2}$:

$$i = \frac{U_{Rоп}}{R_{оп}} = \frac{U_{RТч1}}{R_{Тч1}} = \frac{U_{RТч2}}{R_{Тч2}}, \quad (1)$$

а затем, используя индивидуальные или серийные коэффициенты калибровки, рассчитать искомые температуры.

Перед эксплуатацией электроника термопреобразователя нуждается в отдельной калибровке в зависимости от собственной температуры, что дополнительно удорожает стоимость изделия.

Целью данной работы является исследование предлагаемой более простой схемы реализации термопреобразователя и алгоритм обработки данных, позволяющих удешевить средство измерения без ухудшения базовых характеристик.

2. Предлагаемая реализация схемы измерения

2.1. Функциональная схема преобразователя термосопротивления

Предлагаемый вариант структурной схемы преобразователя температуры приведен на рис. 2. В данном варианте в схеме отсутствует резистор $R_{оп}$, а резистор $R_{Тч2}$ помещен, так же, как и $R_{Тч1}$ в щуп термометра. Температуры обоих термосопротивлений совпадают и равны измеряемой температуре. В такой схеме роль опорного сопротивления выполняет одно из термосопротивлений, а изменения «опорного» сопротивления от температуры уже учтены в калибровке. Очевидно, что характеристики зависимости сопротивления от температуры у обоих термосопротивлений должны быть отличны друг от друга.

2.2. Алгоритм обработки информации

В качестве функции, от которой зависит температура, предлагается взять отношение значений напряжений на термосопротивлениях:

$$X(t) = \frac{U_{R_{TЧ1}}(t)}{U_{R_{TЧ2}}(t)}, \quad (2)$$

где t – измеряемая температура, $X(t)$ – некоторая функция. Пренебрегая значениями входного тока АЦП, можно записать:

$$X(t) = \frac{R_{TЧ1}(t)}{R_{TЧ2}(t)}. \quad (3)$$

При этом $X(t)$ не является функцией тока i , протекающего через резисторы. Из выражения (3) следует, что для максимальной чувствительности термометра необходимо выполнение неравенства (4):

$$R_{TЧ1} \neq kR_{TЧ2}, \quad (4)$$

где k – некоторая константа.

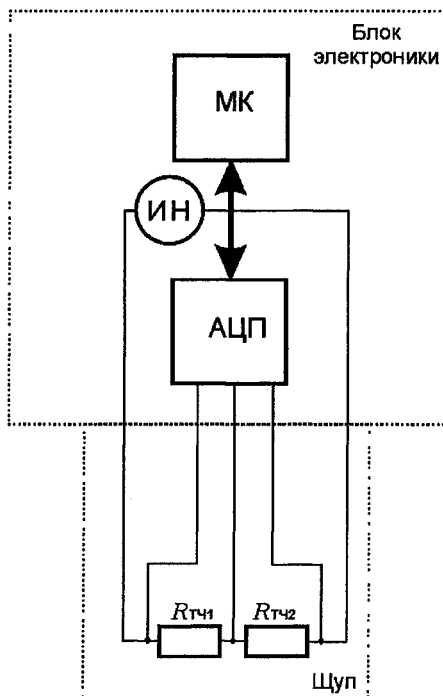


Рис. 2. Структурная схема преобразователя термосопротивления

Типичными параметрами платинового элемента согласно [3], [4] являются: для класса А: $-200...+650$ °С,

$$\Delta t = \pm(0,15 \text{ °С} + 0,002|t|), \quad (5)$$

для класса В: $-200...+850$ °С

$$\Delta t = \pm(0,3 \text{ °С} + 0,005|t|), \quad (6)$$

где t – значение измеряемой температуры, °С; Δt – значение допускаемой погрешности при температуре t , °С.

Рассмотрим варианты термозависимых элементов для выбора наиболее подходящей пары

Температурные зависимости различных термосопротивлений из статьи [5] приведены на рис. 3.

Можно видеть, что максимально различный вид функции зависимости сопротивления от тем-

пературы от платины имеет термистор. Но термистор имеет гораздо меньший по сравнению с платиной температурный диапазон, это исключает его применение в поставленной задаче. Приведенные на рис. 3 зависимости показывают, что наиболее отличающиеся друг от друга характеристики имеют платина и никель. Поэтому именно они используются для решения данной задачи.

Характеристики для терморезисторов из платины и никеля, производства фирмы Advanced Thermal Products [3], приведены ниже.

Для платины в температурном диапазоне $-200...+600$ °С зависимость сопротивления от температуры определяется выражением:

$$\begin{cases} R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3(t-100)), & t < 0 \text{ °С}; \\ R_t = R_0(1 + At + Bt^2), & t > 0 \text{ °С}, \end{cases} \quad (7)$$

где $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °С}^{-2}$, $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °С}^{-3}$.

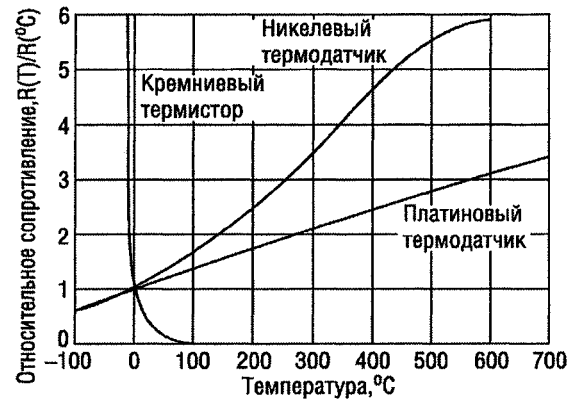


Рис. 3. Зависимости сопротивления различных чувствительных элементов от температуры

Для никеля, в температурном диапазоне $-100...+250$ °С зависимость сопротивления от температуры определяется выражением:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3 + Dt^4 + Et^5 + Ft^6), \quad (8)$$

где $A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$, $B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ °С}^{-2}$, $C = 0 \text{ °С}^{-3}$, $D = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ °С}^{-4}$, $E = 0 \text{ °С}^{-5}$, $F = -2 \cdot 10^{-17} \text{ °С}^{-6}$.

Погрешности этих термосопротивлений для платины определяются выражениями (5), (6).

Погрешности терморезисторов [4] для никеля: класс 1/2 DIN:

$$\Delta t = \begin{cases} \pm 0,2 + 0,0140|t|, & t < 0 \text{ °С}; \\ \pm 0,2 + 0,0035|t|, & t > 0 \text{ °С}; \end{cases} \quad (9)$$

класс DIN 43760:

$$\Delta t = \begin{cases} \pm 0,4 + 0,028|t|, & t < 0 \text{ °С}; \\ \pm 0,2 + 0,007|t|, & t > 0 \text{ °С}; \end{cases} \quad (10)$$

класс 2 DIN:

$$\Delta t = \begin{cases} \pm 0,8 + 0,028|t|, & t < 0 \text{ °С}; \\ \pm 0,8 + 0,007|t|, & t > 0 \text{ °С}, \end{cases} \quad (11)$$

где t – значение измеряемой температуры, °С; Δt – значение допускаемой погрешности при температуре t , °С.

Основой построения математической модели являются зависимости выражений (7), (8). Примем, что в дальнейшем к коэффициентам уравнения (7) добавляем индекс «п» (платина), а к коэффициентам уравнения (8) добавляем индекс «н» (никель).

Выражение (3), используя (7), (8), запишем в виде:

$$X(t) = \left(\frac{R_{0н}}{R_{0п}} \right) \frac{1 + A_н t + B_н t^2 + D_н t^4 + F_н t^6}{1 + A_п t + B_п t^2 - 100 C_п t^3 + C_п t^4}. \quad (12)$$

График функции $X(t)$ представлен на рис. 4.

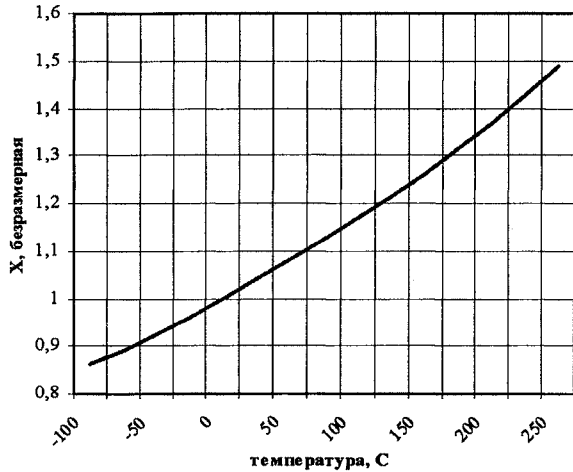


Рис. 4. Зависимость отношений сопротивлений никель/платина от температуры

Поскольку функции (7), (8) (в заданном диапазоне температур никелевого сопротивления $-100 \dots +250$ °С определены, непрерывны, ограничены и не равны нулю, то функция отношения этих полиномов $X = X(t)$ в заданном диапазоне температур также определена, непрерывна и ограничена. Согласно рис. 3 эта функция монотонна, следовательно (по теореме о существовании обратной функции) для X в диапазоне $0,864 - 1,490$ существует обратная функция $t = T(X)$, которая определена во всем диапазоне X , определена, непрерывна, ограничена и монотонна.

Аналитического решения функции $t = T(X)$, обратной к функции (12), не существует, но для решения прикладной задачи требуемое вычисление температуры в зависимости от параметра X достаточно представить в виде алгоритма для программирования.

Левую и правую части уравнения (12) умножим на знаменатель дроби и перенесем все в левую часть. После преобразований получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X \right) + \left(A_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X A_п \right) t + \\ & + \left(B_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X B_п \right) t^2 + \left(100 \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) t^3 + \\ & + \left(D_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) t^4 + F_н t^6 = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Введем функцию $Z(t, X)$:

$$Z(t, X) = z_0 + z_1 t + z_2 t^2 + z_3 t^3 + z_4 t^4 + z_6 t^6,$$

где:

$$\begin{cases} z_0 = \left(1 - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X \right) \\ z_1 = \left(A_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X A_п \right) \\ z_2 = \left(B_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X B_п \right) \\ z_3 = \left(100 \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) \\ z_4 = \left(D_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) \\ z_6 = F_н. \end{cases} \quad (14)$$

По условиям задачи аргумент X известен, следовательно функция $Z(t, x)$ превращается в степенной полином от одного аргумента t .

Математическое моделирование показало достаточную эффективность простого решения данного нелинейного алгебраического уравнения: методом половинного деления. Решение уравнения (13) с использованием функции (14) методом половинного деления удобно производить по следующему алгоритму, приведенному на рис. 5.

Здесь следует отметить, что можно также по заданному алгоритму рассчитать температуру сразу из выражения (12), заменив $Z(t, X)$ на $X(t)$, а условие $Z(t, X) > 0$ в модуле «если» на условие $X(t) - X > 0$. Однако программа, написанная на основании формулы (14) будет несколько проще и короче, займет меньше памяти микроконтроллера и, поэтому, возможно, позволит использовать более дешевый микроконтроллер.

2.3. Калибровка

Используя стандартные степенные коэффициенты, можно калибровать конкретное изделие по одной или нескольким точкам диапазона, зная стандартные степенные коэффициенты при старших степенях, можно рассчитать по результатам калибровки степенные коэффициенты при более младших степенях полинома.

При одной точке калибровки известно истинное значение температуры в некоторой точке $t_{ист}$ и измеренное в этой точке значение $X_{изм}$. Подставляя $t_{ист}$ в формулу (12), получаем $X_{ист}$. Вычисляем поправочное значение $X_{попр}$ по формуле:

$$X_{попр} = X_{ист} - X_{изм}, \quad (15)$$

а выражение (12) в этом случае приобретает вид:

$$\begin{aligned} X(t) = & \\ = & \left(\frac{R_{0н}}{R_{0п}} \right) \frac{1 + A_н t + B_н t^2 + D_н t^4 + F_н t^6}{1 + A_п t + B_п t^2 - 100 C_п t^3 + C_п t^4} + X_{попр}. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналогично будет обстоять дело и при большем количестве точек калибровки – в этом случае при n точках калибровки $X_{попр}$ будет представлять

из себя некоторый полином, степени $n - 1$, от температуры. Имея n значений $(t_i, X_{\text{попр}_i})$, необходимо построить по этим точкам удобный аппроксимирующий полином.

Можно также производить полную индивидуальную калибровку изделия, например при его изготовлении. В этом случае достаточно построить любой удобный полином $t = T(X)$ из множества измеренных точек калибровки (t_i, X_i) . Полное количество точек калибровки требует дополнительного исследования. Если же требуется калибровка по неполному множеству точек калибровки (t_i, X_i) , например при подстройке одной, или нескольких точек в процессе эксплуатации изделия, то на базе этих данных можно пересчитать коэффициенты при младших степенях полинома, оставив коэффициенты при старших степенях неизменными.

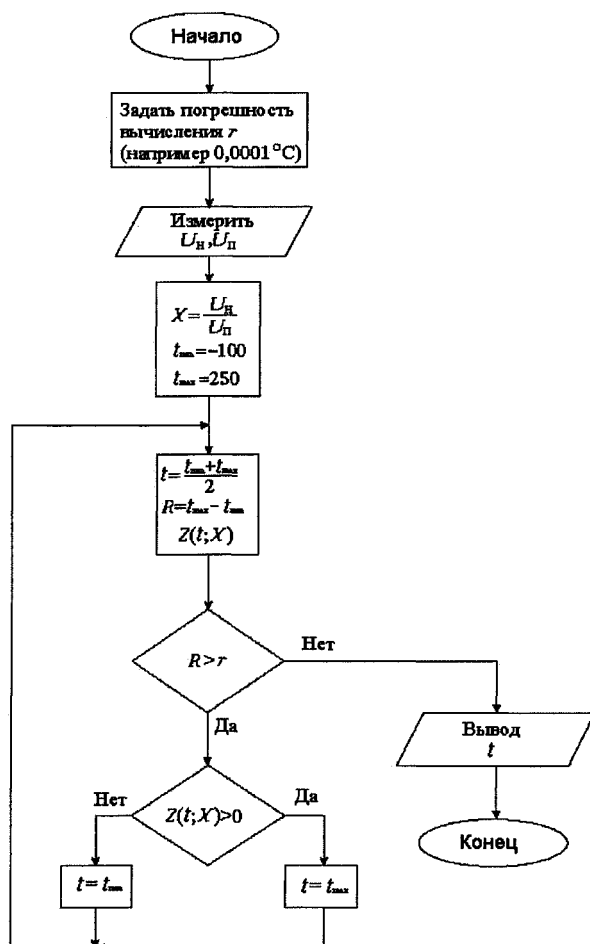


Рис. 5. Алгоритм решения уравнения (14) методом половинного деления

2.4. Анализ погрешностей предлагаемой реализации в сравнении с исходной

Наиболее существенными погрешностями в исходной схеме термопреобразователя сопротивления являются погрешности долговременного ухода опорного сопротивления и термосопротивления. В предлагаемой реализации термопреобразователя наиболее существенными погрешностями будет

погрешность отношения сопротивлений, вызванная погрешностями платиновых и никелевых термосопротивлений. Анализ причин долговременных необратимых погрешностей меры и термосопротивлений, сделанных из чистых металлов, указывает на следующие главные причины этого явления: химическое (главным образом окисление) и физическое (растрескивание, пластические деформации) разрушение металлического слоя сопротивлений. При всех этих воздействиях может происходить только увеличение значения сопротивления. Опорное сопротивление, если оно изготовлено из сплавов, может иметь и отрицательное долговременное изменение сопротивления, но знак изменения его сопротивления качественно не меняет характер графика суммарной погрешности для общепринятой реализации. Зависимости погрешностей термосопротивлений и термопреобразователей приведены на рис. 6. Рассмотрим рис. 6.

Общая допустимая погрешность для платинового термосопротивления класса В из статей [3], [4] приведена на графике «Платиновое ТС», общая допустимая погрешность для никелевого термосопротивления класса 1/2 DIN по одноименному стандарту из статьи [4] приведена на графике «Никелевое ТС». В исходной реализации в качестве опорного сопротивления рассматривается резистор P1-37 100 Ом, его данные взяты из статьи [6]: максимальная допустимая погрешность опорного сопротивления из P1-37 при наработке 10000 ч в температуре 40 °C составила 0,05 % от номинала.

Изменения номинала опорного сопротивления вызовут дополнительную погрешность измерения температуры. Дополнительная погрешность измерения температуры, вызванная изменением номинала опорного сопротивления для термопреобразователя с платиновым термосопротивлением приведена на графике «Мера на платиновом ТС», для никелевого термосопротивления аналогичным образом рассчитан график «Мера на никелевом ТС». Суммарные погрешности для общепринятых реализаций для никеля и платины приведены соответственно на графиках «Общепринятая реализация никель» и «Общепринятая реализация платина». Подразумевается, что погрешности опорного сопротивления и термочувствительного сопротивления являются независимыми случайными величинами, суммарная погрешность находится по формуле

$$\delta_{\text{сумм}} = \sqrt{\delta_{\text{ОС}}^2 + \delta_{\text{ТС}}^2}, \quad (17)$$

где $\delta_{\text{сумм}}$ – суммарная погрешность преобразователя термосопротивления, $\delta_{\text{ОС}}$ – погрешность опорного сопротивления, $\delta_{\text{ТС}}$ – погрешность термочувствительного сопротивления

Погрешность предлагаемой реализации представлена на графике «предлагаемая реализация». Изменения термочувствительных сопротивлений в этом случае будет являться причиной погрешности величины X , что, в свою очередь, вызовет погрешность измерения температуры.

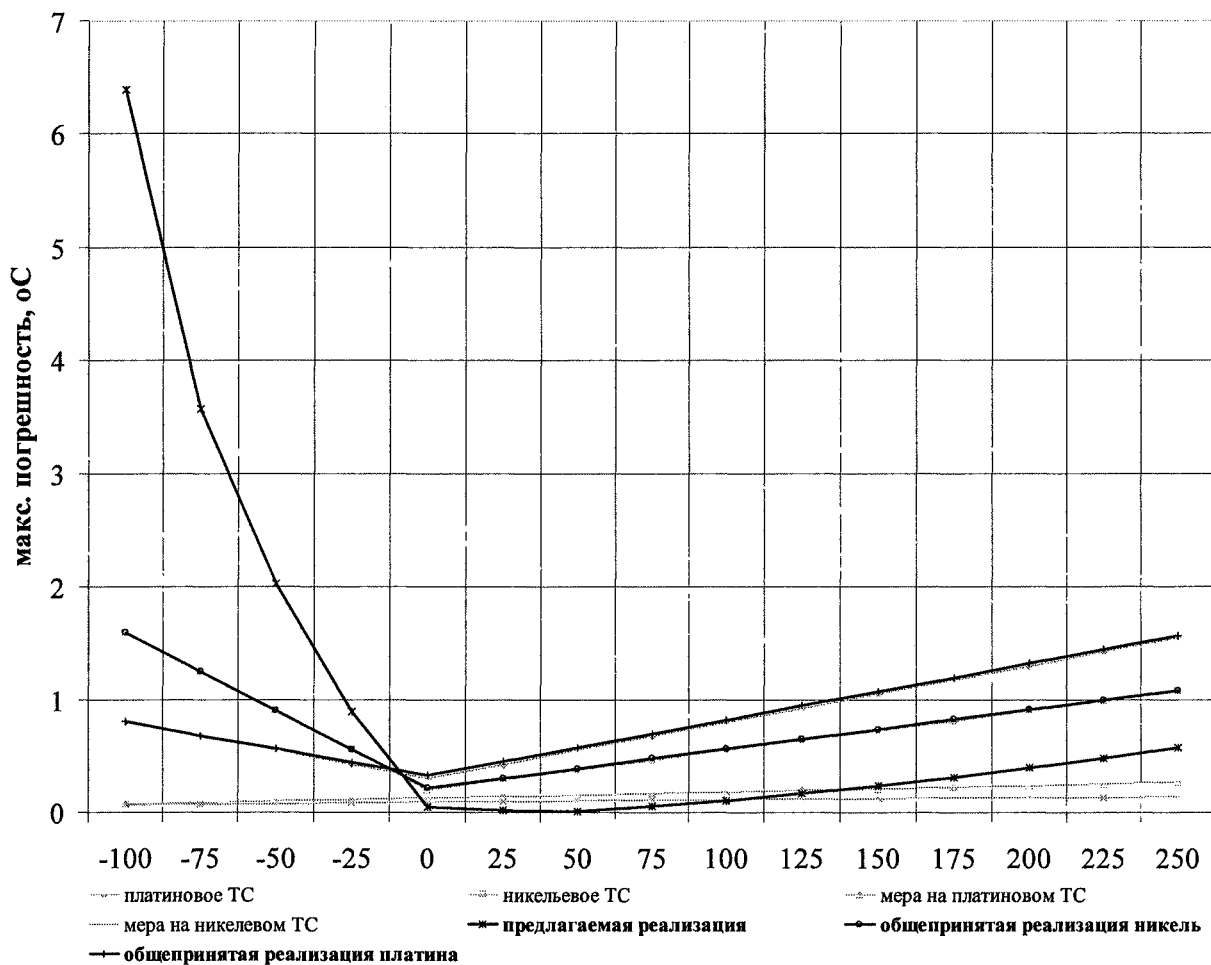


Рис. 6. Наиболее существенные погрешности термопреобразователя сопротивлений

Заключение

1. Предложенная схема реализации термопреобразователя сопротивления по сравнению с общепринятой схемой не содержит опорного сопротивления, которое является прецизионным и недешевым элементом. Такая схема не требует калибровки блока электроники от температуры, что также снижает стоимость серийно выпускаемого изделия.

2. Алгоритм обработки информации предложенной реализации существенно отличаются от общепринятого, – так как в процессе вычисления не используются величина тока в цепи термочувствительных сопротивлений и значение температуры блока электроники термопреобразователя.

3. Рассчитанные значения погрешностей предлагаемой реализации при максимальных отклонениях сопротивления термопреобразователя в диапазоне температур 0...+250 °С существенно ниже погрешностей преобразователя температур в общепринятой схеме реализации. В расчетах погрешности использовались суммарные значения разброса параметров для термочувствительных сопротивлений, включающие в себя как разброс параметров при изготовлении индивидуального сопротивления, так и долговременную стабильность.

Литература

1. Блинов, О. М. *Теплотехнические измерения и приборы* / О. М. Блинов, А. М. Беленький, В. Ф. Бердышев. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.
2. Олейник, Б. Н. *Приборы и методы температурных измерений* / Б. Н. Олейник, С. И. Лаздрин, В. П. Лаздрин. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 296 с.
3. *Resistance Temperature Detectors (RTD'S)*. – Access mode: <http://www.atpsensor.com/pdfs/rtd.pdf>, free.
4. ГОСТ 8.624-2006. *Термометры сопротивления из платины, меди и никеля*. – М.: Изд-во стандартов, 2006.
5. Маргелов, А. *Новые платиновые датчики температуры* / А. Маргелов // *Новости электроники*. – 2007. – № 1. – С. 12–15. – Режим доступа: <http://www.compeljournal.ru/enews/2007/1/6>, свободный.
6. *Технические характеристики резистора постоянного непровольного прецизионного P1–37, Элимком ТВС*. – Режим доступа: http://www.elmicom.ru/r1_37.shtml, свободный.