

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ КАЛИБРОВКИ ПЛАТИНОВЫХ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

В.В. Гуреев
ООО СЦ "Элемер-С"

Платиновые термометры сопротивления являются одними из самых высокоточных средств измерения температуры. Высокая точность измерений температуры обеспечивается долговременной стабильностью платиновых чувствительных элементов, используемых в термометрах. Для поддержания требуемой точности измерений необходима периодическая поверка и калибровка платиновых термометров сопротивления. Существует два различных метода калибровки термометров: калибровка в реперных точках и калибровка методом сравнения (сличения).

Суть метода калибровки в реперных точках заключается в последовательном помещении калибруемых термометров в различные ампулы реперных точек, воспроизводящих заданные температуры с высокой точностью (до 0.001 °С). Калибровка в реперных точках осуществляется, как правило, для эталонных платиновых термометров сопротивления и является наиболее точным и дорогим методом калибровки.

Для калибровки термометров методом сравнения характерно то, что калибруемые термометры помещаются в термостатирующий блок - термостат, температура в котором уточняется с помощью эталонного термометра (рис. 1). В отличие от метода калибровки в реперных точках данный метод позволяет производить калибровку нескольких термометров одновременно и для любых температур в заданном температурном диапазоне, а не в отдельных фиксированных температурных толчках. Являясь наиболее простым и дешевым, метод сравнения применяется для калибровки промышленных термометров сопротивления. На основе метода сравнения возможно создание автоматизированных систем калибровки промышленных платиновых термометров сопротивления [1].

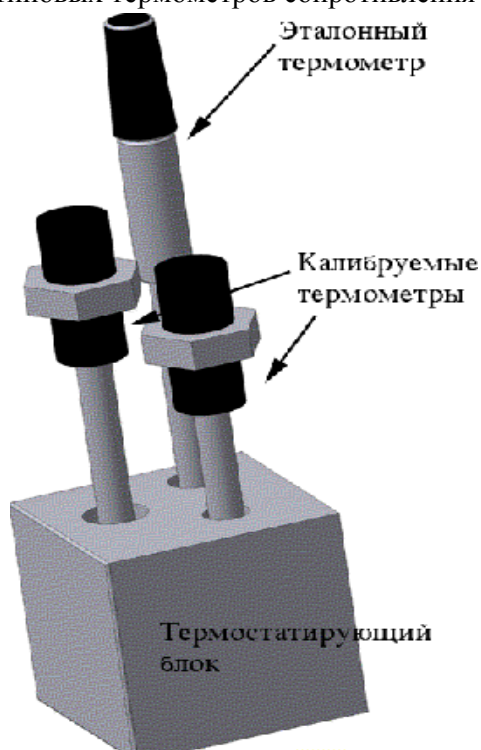


Рис. 1. Калибровка термометров методом сравнения.

К основным недостаткам калибровки термометров методом сравнения можно отнести неоднородность температурного поля в термостатирующем блоке и нестабильность поддержания заданной температуры. Вследствие неоднородности температурного поля внутри термостатирующего блока возникает ошибка передачи единицы температуры от эталонного термометра к калибруемому. Разность температур эталонного и калибруемого термометров является систематической ошибкой и может быть устранена путем проведения двух измерений, в ходе которых эталонный термометр и калибруемый термометр меняются местами. Нестабильность поддержания температуры в термостатирующем блоке связана с особенностью закона регулирования температуры в нем. Дрейф температуры термостатирующего блока может создать динамическую ошибку калибровки, если эталонный и калибруемый термометры имеют различные времена откликов на изменение температуры (различные показатели тепловой инерции). Влияние дрейфа температуры термостатирующего блока на результаты калибровки может возрасти, если между термометрами, помещенными в термостат, и стенками термостата возникнет небольшая воздушная прослойка, как например, это может произойти в сухоблочных калибраторах, если термометр не плотно установлен в канал термостата. В случае наличия такой воздушной прослойки временные отклики термометров увеличиваются в несколько раз и практически не зависят от толщины воздушного слоя [2].

Переходные процессы, возникающие в результате перестройки температуры термостата, исключаются из процедуры калибровки термометров, поскольку данные процессы характеризуются значительными дрейфом и градиентом температуры в термостате. В случае идеального термостата после очередной перестройки температуры на заданное значение система с течением времени стремится к состоянию теплового равновесия, а разность температур эталонного и калибруемого термометров - к нулю. В действительности на термостат оказывают воздействие внешние возмущения, которые не позволяют ему прийти в состояние теплового равновесия. По этой причине огромное значение имеет корректное определение момента окончания переходных процессов в термостате.

Шумы подключаемого к термометрам измерителя, а также электрические помехи, наводящиеся на соединительные провода, также вносят свой вклад в общую ошибку калибровки.

В данной работе предложен метод, позволяющий уменьшить влияние нестабильности поддержания температуры в термостате, а также влияние шумов измерительного оборудования на результаты калибровки.

Калибровка промышленных платиновых термометров сопротивления: основные ошибки

В соответствии с международным стандартом МЭК 751 (IEC 751) и ГОСТ 6651-94 [3], зависимость сопротивления ТСП от температуры выражается в виде функции Каллендара Ван Дюзена (Callendar-Van Dusen):

$$R(T) = R_0[1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3], \quad (1)$$

где R_0 - сопротивление калибруемого термометра при температуре 0°C , T - температура калибруемого термометра. Коэффициент C в функции (1) равен нулю для $T < 0^\circ\text{C}$. Калибровка термометра состоит в определении набора калибровочных точек (R_N, T_N) и вычислении коэффициентов функции (1) по данным точкам. Погрешность измерения сопротивления калибруемого термометра может быть выражена в виде суммы систематической ошибки и случайной ошибки, связанной с шумами: $\Delta R_N = \theta_R + \varepsilon_R$. Погрешность измерения температуры калибруемого термометра представима в виде суммы систематической, динамической и случайной ошибок $\Delta T_N = \theta_T + v_T + \varepsilon_T$. Систематическая погрешность θ_R связана только с особенностями работы измерительного прибора, в то время как в систематическую ошибку θ_T входит разность температур между калибруемым и

эталонным термометрами, связанная с неоднородностью температурного поля в термостате. При необходимости, разность температур между каналами термостата может быть найдена экспериментально путем измерения температуры в каждом канале при одинаковых условиях. Динамическая ошибка v_T возникает вследствие дрейфа температуры в термостате, если показатели тепловой инерции калибруемого и эталонного термометров отличаются. Оценим данную ошибку, используя упрощенную математическую модель термометра [2]

$$\tau_s \frac{dT_s(t)}{dt} + T_s(t) = T_{sys}(t), \quad (2)$$

где T_s - температура термометра; τ_s - показатель тепловой инерции термометра; T_{sys} - температура в термостате. Если температура в термостате изменяется линейно со скоростью α , то отклонение температуры термометра от температуры термостата составит

$$\Delta T = T_s - T_{sys} = -\alpha\tau_s. \quad (3)$$

Уравнение (2) можно записать как для калибруемого, так и для эталонного термометров, поэтому учитывая соотношение (3), можно оценить разность температур между калибруемым и эталонным термометрами

$$v_T = T_c - T_r = -\alpha\Delta\tau, \quad (4)$$

где $\Delta\tau$ - разность показателей тепловой инерции термометров. Динамическую ошибку v_T можно уменьшить двумя способами. Первый способ заключается в подборе термометров с близкими коэффициентами тепловой инерции. Тем не менее, близость коэффициентов тепловой инерции самих термометров не гарантирует сходство временных откликов данных термометров, установленных в термостат. В случае наличия воздушной прослойки между термометрами, помещенными в термостат, и стенками термостата временные отклики термометров увеличиваются в несколько раз, а разность $\Delta\tau$ становится зависимой от конкретных условий калибровки. Второй способ уменьшения динамической погрешности состоит в нахождении условий калибровки, при которых дрейф температуры в термостате α минимален.

Описание метода

Рассмотрим систему, состоящую из термостата, калибруемого и эталонного термометров, показанную на рис. 1. Процесс калибровки методом сравнения состоит из следующих этапов. Термостат перестраивается на заданную температуру, например, на температуру 50°C. После окончания переходных процессов термостат входит в режим стабилизации температуры, которая осуществляется встроенным регулятором температуры. На этом этапе производится измерение сопротивления калибруемого термометра R_1 и температуры термостата T_1 с помощью эталонного термометра. Далее термостат перестраивается на следующую температуру, например 75°C, и процедура повторяется. После того как получено необходимое количество калибровочных точек (R_N, T_N), вычисляются коэффициенты функции (1), например, с помощью линейного регрессионного анализа [4]. На рис. 2 приведена типичная диаграмма изменения температуры в сухоблочном калибраторе, отражающая все этапы калибровки термометров. Горизонтальные линии на диаграмме - режим стабилизации заданных температур. Слева от них - режим перестройки (нагрев) термостата на следующие значения температур. Крайняя правая кривая на диаграмме соответствует режиму релаксации термостата к первоначальному состоянию после его выключения. Время на диаграмме представлено в виде дискретных отсчетов измерительного прибора, период которых в данном случае составляет 8.8 с. В качестве термостата использовался сухоблочный калибратор температуры КТ-500.

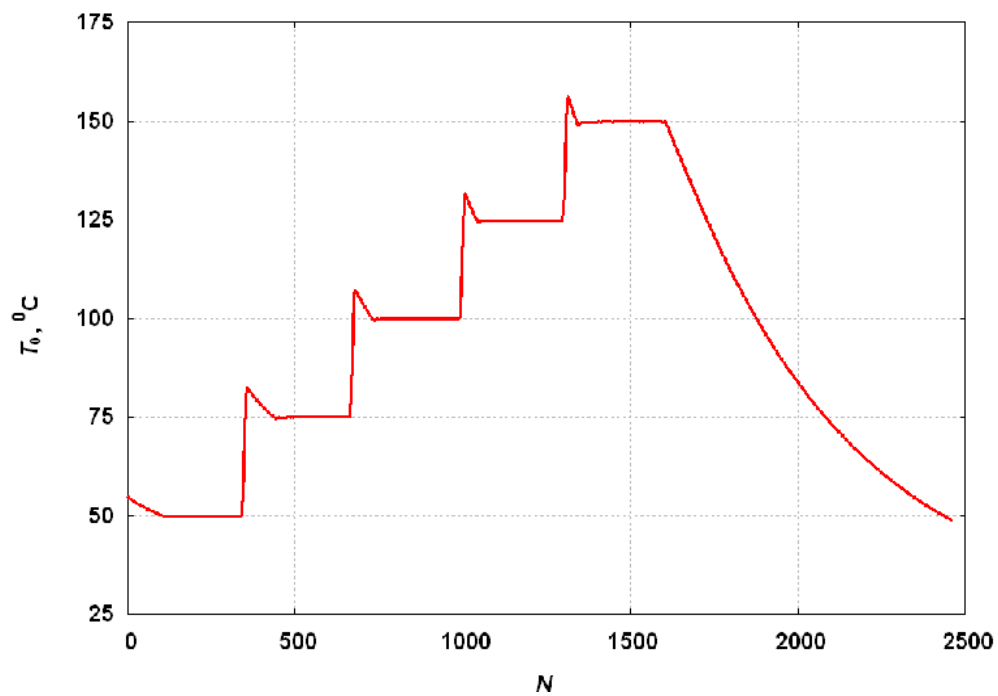


Рис.2. Типичная диаграмма изменения температуры в сухоблочном термостате: режимы перестройки и стабилизации температуры.

Существенными для калибровки являются только режимы стабилизации температуры в термостате, определить которые можно по скорости дрейфа температуры, определяемой как $\alpha = \frac{dT_0}{dt}$, где T_0 - температура термостата, измеренная эталонным термометром, t - время. Вследствие наличия шумов параметр α может быть некорректно определен. Наиболее правильным методом определения параметра α является вычисление производной по времени от функции, аппроксимирующей зашумленную функцию зависимости температуры T_0 от времени t . Предположим, что с помощью одного или нескольких измерительных приборов в каждый дискретный момент времени i и через одинаковый интервал времени Δt производятся измерения сопротивления калибруемого термометра R_i и температуры эталонного термометра T_{0i} . На отрезке, состоящем из N отсчетов, строятся два аппроксимирующих полинома второй степени методом наименьших квадратов [4]: для сопротивления и для температуры так, что

$$R = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2, \quad (5)$$

$$T_0 = b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2, \quad (6)$$

$\xi \in (0, 1)$, $\Delta\xi = \frac{1}{N-1}$. По мере обновления данных в окне коэффициенты функций (5) и (6) вычисляются заново. Учитывая (6) скорость дрейфа температуры вычисляется как

$$\alpha = \frac{b_1 + 2b_2\xi}{\Delta t(N-1)}. \quad (7)$$

Сформулируем первое условие, по которому можно принять окно, в котором были построены аппроксимирующие функции (5) и (6), как оптимальное для выборки из него калибровочных точек $(R_\xi, T_{0\xi})$. Если максимальное значение абсолютного значения параметра α , вычисленного по формуле (7), не превосходит заданного значения α_{\max} , то есть $\max_{\xi \in (0,1)} \alpha(\xi) < \alpha_{\max}$, то данное окно можно считать оптимальным с точки зрения

скорости температурного дрейфа в этом окне.

Если полиномы (5) и (6) неадекватно описывают реальные функции дрейфа сопротивления и температуры, то параметр α также может быть некорректно определен. Для проверки адекватности модели обычно подсчитывают остаточную дисперсию и сравнивают ее с заведомо известной дисперсией, определенной каким-либо другим способом [4]. С

практической точки зрения можно ввести альтернативное условие, которое будет вторым условием оптимальности окна, из которого производится выборка калибровочных точек. Если максимальное по абсолютной величине отклонение измеренной температуры $T_{0\xi}$ от аппроксимирующего полинома (6) не превысит заданного значения $(\delta T_0)_{\max}$, то окно можно считать оптимальным с точки зрения адекватности используемых аппроксимирующих полиномов. В качестве значения $(\delta T_0)_{\max}$ можно взять параметр, характеризующий нестабильность поддержания температуры в термостате за 30 мин. Этот параметр обязательно указывается в технических характеристиках термостатов.

После того, как определено оптимальное окно, вычисляется единственная калибровочная точка, соответствующая минимальному дрейфу температуры, то есть такие $R(\xi_0)$ и $T(\xi_0)$, что $\alpha(\xi_0) = \min_{\xi \in (0,1)} \alpha(\xi)$.

Объем выборки N необходимо выбирать таким, чтобы уменьшить уровень шумов до желаемого уровня. Дисперсии предсказанных моделями (5) и (6) значений сопротивления и температуры определяются как

$$\sigma_{\xi}^2 = \mathbf{f}_{\xi}^T (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{f}_{\xi} \sigma^2, \quad (7)$$

где $\mathbf{f}_{\xi} = [1, \xi, \xi^2]^T$,

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & \Delta\xi & (\Delta\xi)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & (N-1)\Delta\xi & (N-1)^2(\Delta\xi)^2 \end{pmatrix}.$$

Функция, определяемая как $G(N, \xi) = \sqrt{\mathbf{f}_{\xi}^T (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{f}_{\xi}}$, показывает степень подавления шумовых воздействий. На рис.3 изображено семейство характеристик,

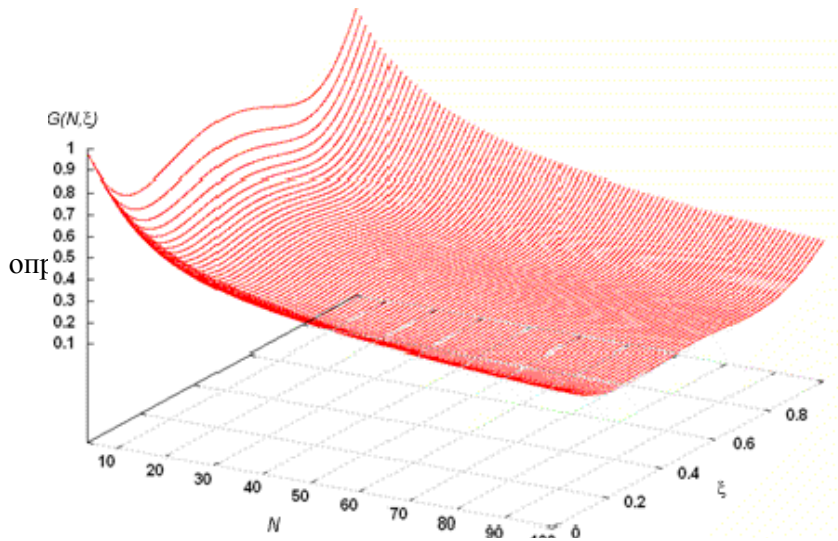


Рис. 3. Функция $G(N, \xi)$.

Из рисунка видно, что при увеличении объема выборки N значение функции $G(N, \xi)$ перестает зависеть от ξ , то есть от положения предсказанной точки в окне.

Эксперимент

С помощью изложенного выше метода был проведен эксперимент по калибровке платинового термометра сопротивления с чувствительным элементом типа Pt100. В качестве эталонного термометра был выбран аналогичный термометр. С целью измерения сопротивления калибруемого термометра и температуры эталонного термометра был собран экспериментальный прибор, позволяющий измерять сопротивления, подключенных к нему термометров методом сравнения с эталонным резистором, а также пересчитывать измеренные значения сопротивлений в значения температуры по заданным характеристикам, в том числе и с помощью функции обратной для (1). Данный прибор также позволяет передавать измеренные значения в компьютер по интерфейсу RS 232C. В качестве термостата использовался сухоблочный калибратор температуры КТ-500. Фотография измерительного прибора представлена на рис. 4. а всей установки - на рис. 5.



Рис. 4. Измерительный прибор.



Рис. 5. Экспериментальная установка.

Перед испытанием метода было проведено измерение отклонений показаний температуры калибруемого термометра, которая рассчитывалась по НСХ Pt100 (по МЭК 751 (IEC 751) и ГОСТ 6651-94), от температуры эталонного термометра для каждой температуры термостата. Для каждой температурной точки термостата, находящегося в режиме стабилизации температуры, отклонения усреднялись 200 раз и рассчитывались среднеквадратические отклонения (СКО) данных отклонений. Средние значения отклонений

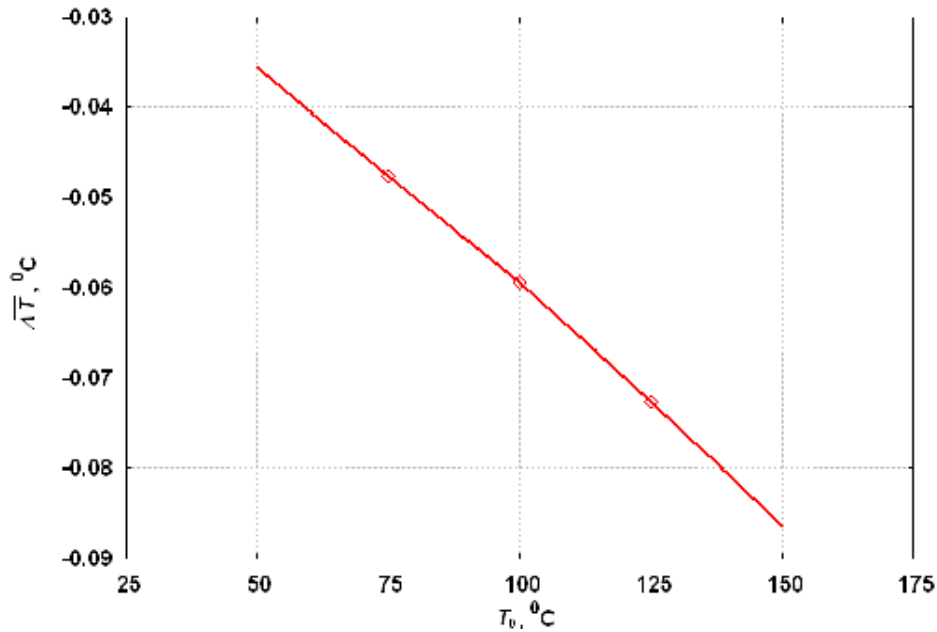


Рис. 6. Средние значения отклонений температуры некалиброванного термометра от температуры эталонного термометра.

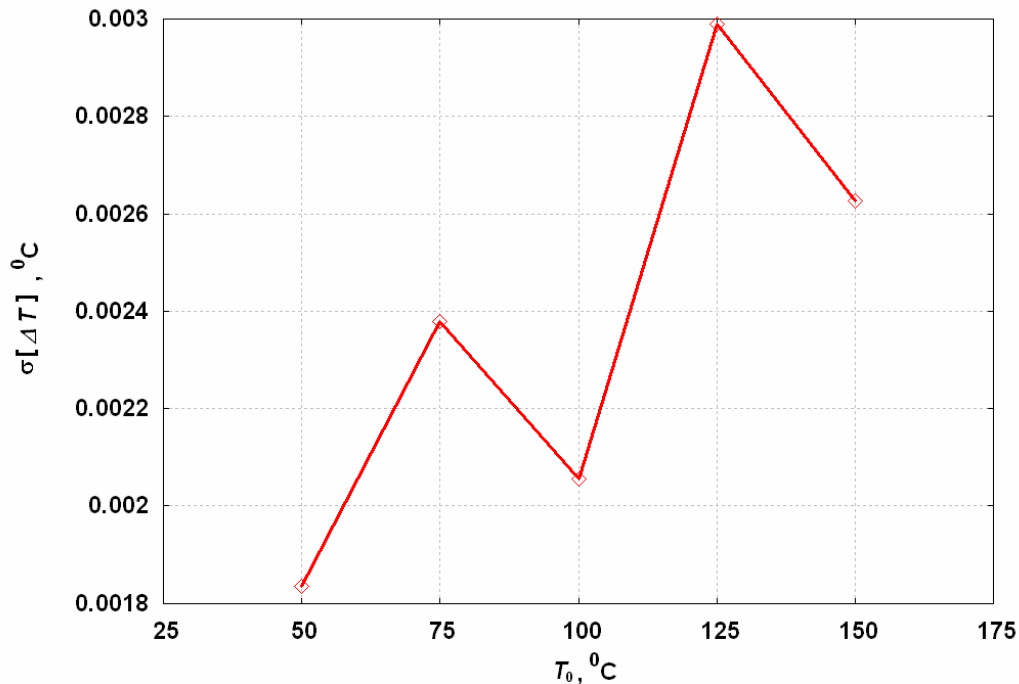


Рис. 7. СКО отклонений температуры некалиброванного термометра от температуры эталонного термометра.

Далее была проведена калибровка термометра изложенным выше методом. В эксперименте были выбраны следующие параметры метода. $N = 100$, $\alpha_{max} = 0.0005^\circ\text{C}/\text{с}$, $(\delta T_0)_{max} = 0.02^\circ\text{C}$. Значение параметра α_{max} было найдено из следующих соображений. Для калибратора КТ-500 разность воспроизводимых температур в каналах может составлять 0.02°C [5], поэтому динамическая ошибка ν_T должна быть как минимум в 4 раза меньше, то есть 0.005°C . Экспериментально было установлено, что разность тепловых инерций установленных в термостат термометров оценивается как 10 с. Далее по формуле (3) была найдена максимально допустимая скорость дрейфа температуры α_{max} . Параметр $(\delta T_0)_{max}$ численно равен нестабильности поддержания температуры за 30 мин для указанного калибратора [5].

По мере того, как в термостате изменялась температура в соответствии с диаграммой, изображенной на рис. 2, изложенным выше методом были вычислены калибровочные точки, которые представлены на рис. 8 в виде вертикальных линий. Рисунок наглядно демонстрирует, что положения предсказанных калибровочных точек соответствуют режимам стабилизации температуры в термостате.

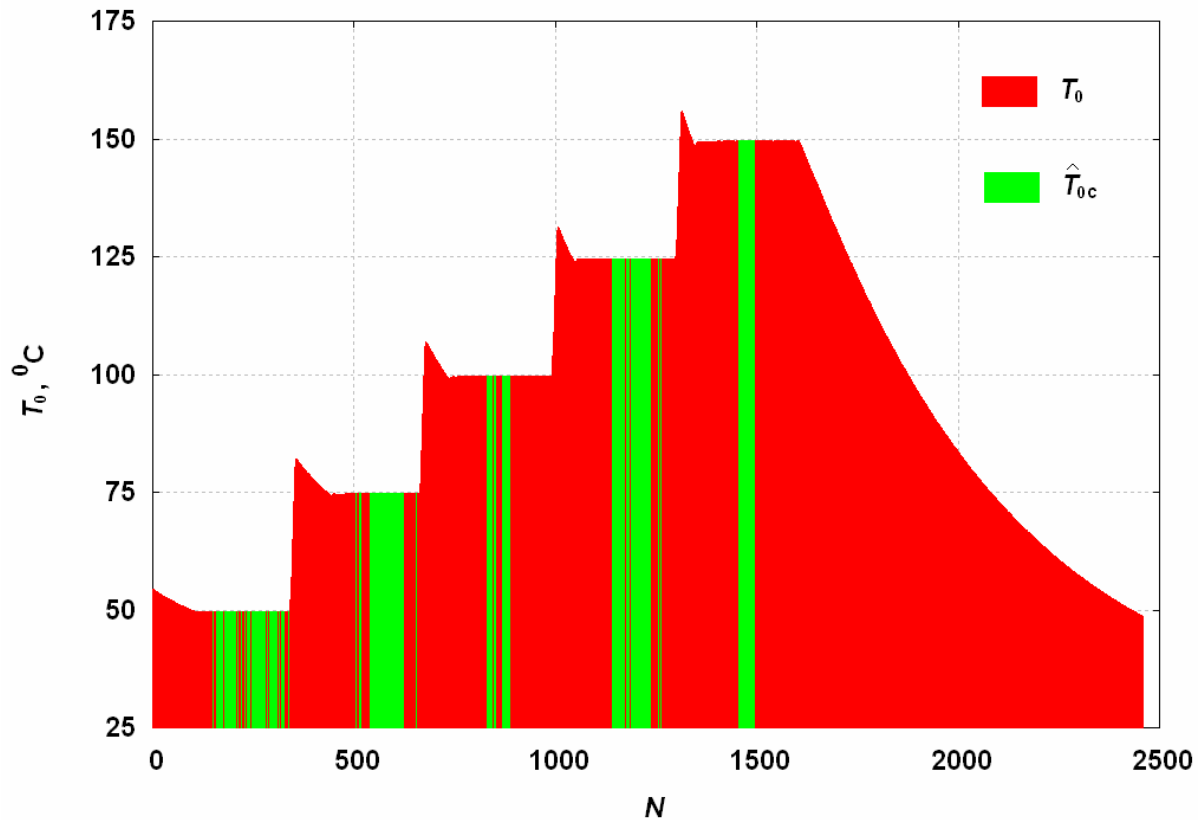


Рис. 8. Вычисленные калибровочные точки T_{0c} .

По самым первым калибровочным точкам из каждой зоны группировок калибровочных точек с помощью метода наименьших квадратов были вычислены коэффициенты функции (1) для калибруемого датчика.

Далее была проведена поверка калиброванного термометра, с характеристикой в виде функции (1) и вычисленными коэффициентами. Результаты поверки отражены в виде усредненных 200 раз отклонений показаний температуры калиброванного термометра от показаний эталонного термометра (рис. 9), а также в виде СКО данных отклонений (рис. 10).

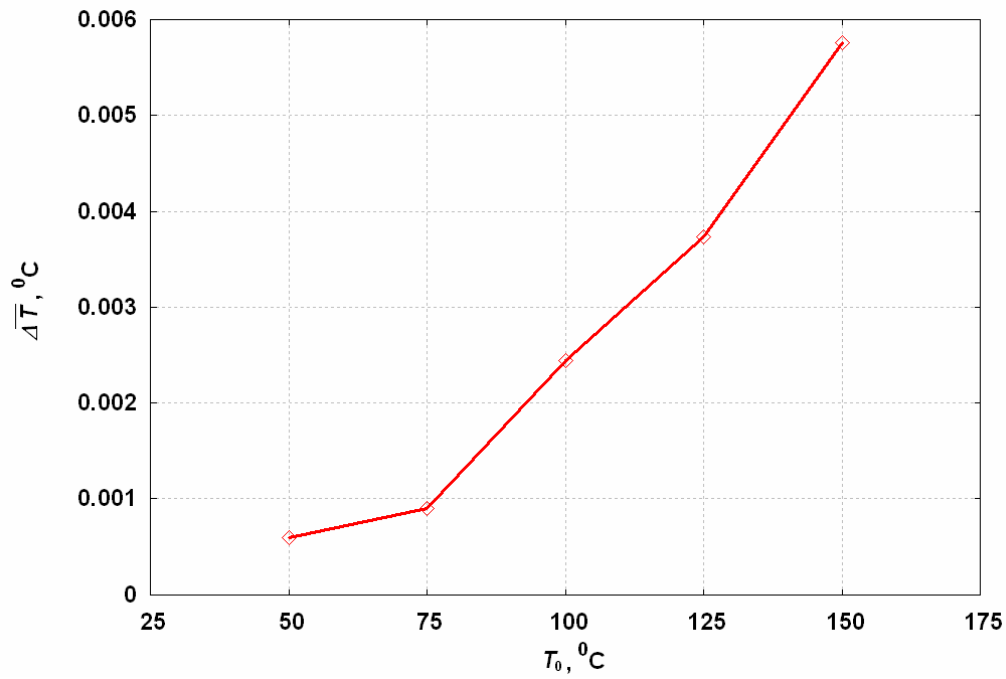


Рис. 9. Средние значения отклонений температуры калиброванного термометра от температуры эталонного термометра.

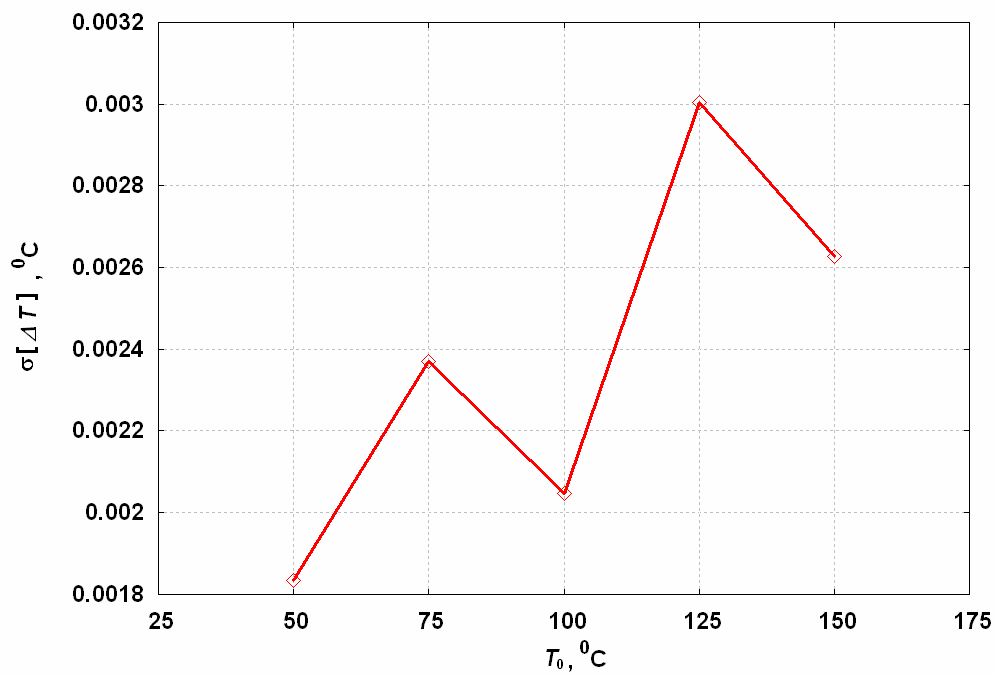


Рис. 10. СКО отклонений температуры калиброванного термометра от температуры эталонного термометра.

Сравнивая попарно результаты поверок до и после процедуры калибровки, можно убедиться, что средние значения отклонений температуры калибруемого термометра от температуры эталонного термометра значительно уменьшились после калибровки, а СКО практически не изменились. Данные результаты демонстрируют адекватность калибровки платиновых термометров изложенным методом.

Заключение

Изложенный в данной статье метод калибровки платиновых термометров сопротивления позволяет достаточно качественно распознавать оптимальные условия калибровки термометров и вычислять соответствующие этим условиям калибровочные точки. Время калибровки с помощью данного метода оптимизировано в том смысле, что оно зависит только от требуемой точности калибровки. Метод в качестве входных параметров требует параметры, приведенные в технических характеристиках на измерительные приборы и термостаты, используемые при калибровке. Работоспособность метода проверена многочисленными экспериментами, результаты которых представлены в данной статье.

Литература

1. Bojkovski J., Drnovšek J., Pušnik I., Tasić T. Automation of a Precision Temperature Calibration Laboratory // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2000. V.49, No. 3. P.596-601.
2. Tavener J.P. Common Errors in Industrial Temperature Measurement. // Isotech Journal of Thermometry. 1992. V.3 No. 1. P.19-28.
3. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования.
4. Вучков И.Н., Бояджијева Л.Н., Солаков Е.Б. Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с.
5. Каталог продукции НПП "Элемер". Часть 3. 2005.