

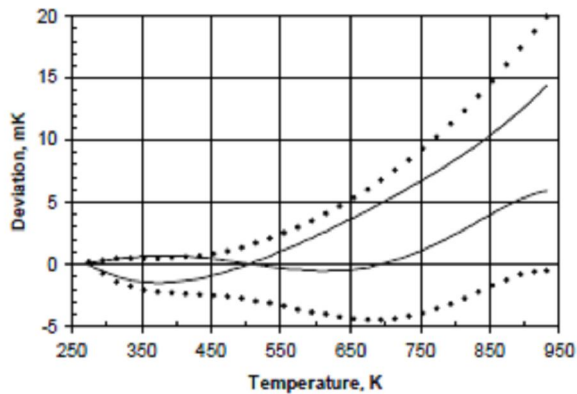
Моисеева Н.П.

Выбор интерполяционного уравнения для платинового термометра сопротивления

Эталонные термометры

Для эталонных термометров, входящих в состав Государственного эталона температуры, альтернативы нет. Для них должны использоваться уравнения МТШ-90 в том виде, в котором они установлены в положении о шкале. Однако, для термометров более низкого звена, как образцовых, так и рабочих, упрощение эталонных уравнений не запрещено. Вопрос о выборе уравнения интерполяции очень важен, именно он определяет необходимое число градуировочных точек, трудоемкость и себестоимость градуировки термометров. Поэтому, несмотря на то, что положение о МТШ-90 дает четкие указания о методе построения функций отклонения в поддиапазонах температур и степенях используемых полиномов, постоянно предпринимаются попытки упростить вид функций, сократить количество градуировочных точек для термометров, не входящих в эталон температуры. Теоретически упрощение функции отклонения, вплоть до линейных зависимостей, вполне может быть обосновано. Сопротивление металлов согласно современной теории проводимости обусловлено неидеальностью кристаллической решетки. Рассеяние электронов и увеличение удельного сопротивления происходит из-за наличия примесных атомов, точечных дефектов, дислокаций. Электроны рассеиваются также за счет излучения и поглощения квантов тепловой колебательной энергии – фононов. Согласно правилу Матиссена, каждый из этих процессов характеризуется своим временем релаксации и общее удельное сопротивление металла может быть представлено виде суммы удельных сопротивлений, обусловленных дефектами решетки и фононами. Это правило хорошо выполняется при низких температурах, когда электрон-фононная компонента может быть фактически полностью учтена в стандартной функции и отклонение от стандартной функции связано только с различием в примесях. Функция отклонения индивидуальной зависимости от стандартной может быть описана линейной зависимостью относительного сопротивления $W - W_{ref} = a (W - I)$. Именно эта функция установлена в МТШ-90 для поддиапазонов от 0,01 до 29,7646 °С и от 0,01 до 156,5985 °С. Для ее определения фактически требуется измерение только в одной градуировочной точке кроме тройной точки воды. Можно ли использовать подобные линейные функции в более широких диапазонах? Этим вопросом задавались многие метрологи. Упрощению функций отклонения были посвящены доклады на конференциях и статьи [1-4]. Можно вспомнить, что при разработке метода МТШ-90 первым рассматриваемым вариантом функции отклонения для ВТС в диапазоне до 419,527 °С была именно линейная зависимость, построенная на основе градуировки в точке цинка. Этот вариант принят не был, хотя давал погрешность для высокотемпературных термометров сравнимую с их стабильностью - несколько тысячных градуса [1]. В работе [2] исследовались интерполяционные зависимости для ВТС, причем диапазон стандартной функции МТШ-90 был продлен до точки меди 1084,62 °С. Было показано, что неопределенность метода не превышает нескольких сотых градуса. Исследование метода упрощения функции отклонения в диапазоне 0 – 660 °С, проведенное на 50 ПТС в работе [3], показало, что отклонение от МТШ-90 не превышает 4,7 мК. В работе [4] предлагается для образцовых и рабочих термометров использовать точку олова в качестве единственной точки в диапазоне до 660 °С, причем приводятся очень обнадеживающие данные расчетов, расхождение расчетного и измеренного значения температуры в точке алюминия

укладывается в $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$! Имея большую базу данных градуировки платиновых термометров в реперных точках, не составляет труда поупражняться в подборе всевозможных функций отклонения и сравнении их с методом, установленным МТШ-90. Приведем графики результатов из работы [4], на которых показано расхождение функций отклонения, рассчитанных по методике МТШ-90 и по упрощенной функции с использованием одной точки олова. Упрощенная функция сейчас используется в корпорации Goodrich для градуировки термометров специальной конструкции.



Основной вывод заключается в том, что упрощенные функции вполне могут применяться для термометров, требования к точности и стабильности которых находятся на уровне сотых градуса. Отметим, что в наших российских стандартах на поверку образцовых термометров уже используются упрощенная линейная зависимость для функции отклонения в диапазоне от -196 до $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ и упрощенная функция второй

степени для высокотемпературного термометра в диапазоне от $0,01$ до $1084,62\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с экстраполяцией стандартной функции МТШ-90 от $961,78$ до $1084,62\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Рабочие термометры

Для рабочих платиновых термометров законно применяется на практике еще более далекий от МТШ-90 метод. Это метод заключается в упрощении самой стандартной функции. Вместо полинома девятой степени используется полином второй степени. Функции отклонения от данного полинома фактически отсутствуют. Вместо них используется просто разделение термометров по результатам градуировки в двух реперных точках (0 и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) на классы точности. Кроме того, снижены требования к чистоте платины и вместо минимального температурного коэффициента $0,003925\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ используется номинальный коэффициент $0,00385\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (МЭК 60751). Изменение требований к термометрам и упрощение интерполяционной зависимости вызывает резкий рост неединственности температурной шкалы. Спасает то, что допуски на отклонение от стандартной функции для рабочих ТС составляют более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Существует промежуточный класс термометров, точность которых выше, чем точность рабочих ТС, но ниже, чем точность образцовых ТС. Эти термометры требуют индивидуальной градуировки. В последнее время таких термометров становится все больше и больше, причем не только благодаря повышению требований к точности температурных измерений, но и из-за очень широкого использования вторичных цифровых измерительных приборов. Как учитываются индивидуальные особенности термометров во вторичных приборах? Большинство приборов имеют возможность задания индивидуальных коэффициентов полинома Каллендара Ван Дюзена (КВД). Некоторые мосты позволяют вводить коэффициенты МТШ-90. Отметим, что метод КВД на настоящий момент является единственным методом, стандартизованным в международном масштабе для промышленных платиновых ТС. Некоторые национальные стандарты (например JIS) и стандарты промышленных компаний позволяют использовать также другие полиномы.

Исследуя точность индивидуального квадратичного полинома Каллендара, многие исследователи делали вывод о том, что использование трех точек градуировки для определения трех коэффициентов полинома не достаточно, увеличение количества точек с последующим применением метода наименьших квадратов может дать лучшую точность. В некоторых работах даже предлагалось использовать десять точек градуировки в довольно узком диапазоне температур. Такой метод уточнения зависимости действительно работает, если неопределенности градуировки в точках велики – больше чем несколько сотых градуса. Если градуировка выполнялась на более точном оборудовании, то увеличение количества градуировочных точек не дает снижения погрешности индивидуального полинома КВД.

Наиболее полное экспериментальное исследование погрешности зависимости Каллендара по отношению к шкале эталонного термометра провел Пьеро Маркарино (Италия) в 2001 г. и в 2004 г.[5]. Принимая во внимание, что единственным законным методом интерполяции для рабочих ТС является уравнение Каллендара Ван Дюзена, он провел градуировку 38 платиновых ТС в диапазоне от -80 до 650 °С и построил экспериментальные кривые, показывающие, насколько температура, рассчитанная по КВД для рабочих ТС отличается от показаний эталонного термометра. Выяснилось, что независимо от термометра и от температурного коэффициента платины, зависимость исследуемого отклонения от температуры имеет один и тот же вид, причем отклонение достигает $\pm 0,05$ °С при воспроизводимости результатов в пределах $\pm 0,01$ °С. Опираясь на полученные результаты, Маркарино предложил уточнить полином КВД добавив к нему дополнительный полином 12-ой степени в диапазоне ниже 0°С и 11-ой степени выше 0°С. Этот поправочный полином был вычислен на основе его экспериментальной работы, а затем более точное значение коэффициентов получено из аппроксимации функции МТШ-90 квадратичным полиномом. Коэффициенты А, В, С функции КВД определялись по индивидуальной градуировке ТС, а коэффициенты поправочного полинома были фиксированными, одинаковыми для всех термометров. Такая модификация функции КВД была предложена как новая рекомендация МЭК, но предложение принято не было ввиду сложности работы в промышленности с функциями высоких степеней. Фактически получается, что мы уточняем показания рабочего ТС за счет усложнения функции интерполяции. Но ведь само уравнение КВД используется именно для того, чтобы упростить подход МТШ-90.

Немного другой подход к индивидуальной градуировке рабочих ТС был изложен в работе [6]. На основании обработки большого количества данных градуировки эталонных и рабочих ТС было подтверждено, что отклонение индивидуальной функции КВД от МТШ-90 для термометров проволочного типа не зависит от сорта платины и температурного коэффициента сопротивления термометра. Расхождение КВД и МТШ-90 в узких диапазонах температур намного меньше, чем в широком диапазоне. Поэтому за опорную функцию для градуировки рабочих ТС может быть взята квадратичная зависимость, построенная для платины высокой чистоты, в частности построенная на основе стандартной функции МТШ-90. Важно то, что в эта функция будет иметь разные коэффициенты А и В для разных поддиапазонов температур. Таким образом, мы уже будем иметь для каждого диапазона опорную функцию более точную, чем НСХ, которая была получена экспериментальным путем в диапазоне 0-650 °С.

Например:

для диапазона 0-156 °С

$$A_{90} = 3.9881 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, B_{90} = -5.9827 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}, \quad (1)$$

для диапазона 0-230 °С

$$A_{90} = 3.9873 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, B_{90} = -5.9300 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}. \quad (2)$$

Для построения индивидуальной функции КВД предлагается использовать линейную функцию отклонения, аналогичную методу МТШ-90 в диапазоне 0-156 °С. Таким образом, для градуировки ТС достаточно использовать одну температурную точку, кроме тройной точки воды. Пониженные требования к точности рабочих термометров позволяют использовать этот метод в более широком диапазоне – до 230 °С.

Формулы для расчета коэффициентов индивидуальной интерполяционной зависимости $W(T) = 1 + A_u T + B_u T^2$ по одной градуировочной точке очень простые:

$$A_u = (1 + a) A_{90}; \quad B_u = (1 + a) B_{90} \quad (3)$$

$$a = [W(T_2) - W_{90}(T_2)]/[W_{90}(T_2) - 1] \quad (4)$$

где:

$W(T_2)$ – результат градуировки термометра в точке градуировки T_2 $W(T_2) = R(T_2)/R(0)$;

$W_{90}(T_2)$ - значение стандартной функции при температуре T_2 : $W_{90}(T_2) = 1 + A_{90} T_2 + B_{90} T_2^2$

Еще раз необходимо отметить, что значения A_{90} ; B_{90} – разные для разных поддиапазонов (см. (1), (2)). Метод тем точнее, чем уже диапазон температуры.

Для исследования точности описанного выше метода, была проведена градуировка 10 термометров с разным $W(100)$ (от 1,379 до 1,327) в диапазоне 0-230 °С и рассчитано отклонение функции, полученной по формулам МТШ-90, от функции, полученной по формулам (3) и (4) с использованием коэффициентов стандартной функции (2). Отклонение представлено графически на рис.1

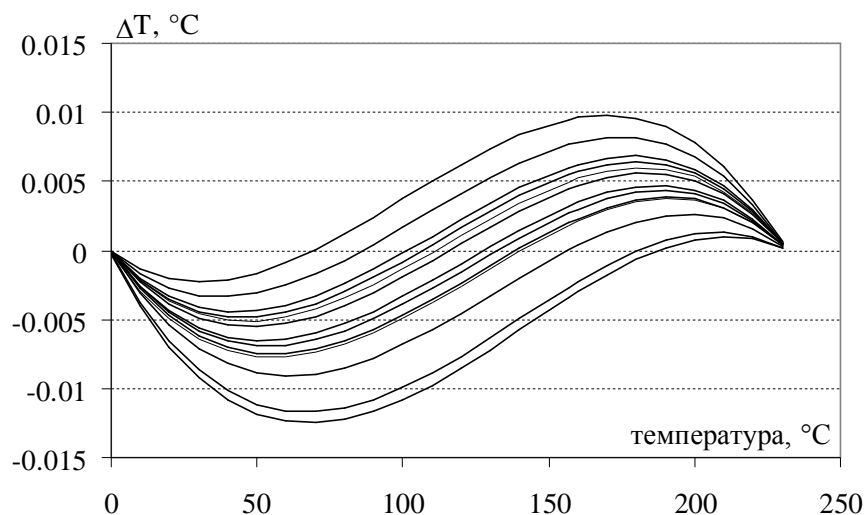


Рис.1 Отклонение функции МТШ-90 от функции, полученной по формулам (3) и (4).

Отклонение температур от МТШ-90, согласно представленному графику, находится в пределах $\pm 0,015$ °С, что соответствует стандартной неопределенности в предположении равномерного закона распределения $0,015/1,73 = 0,0087$ °С, что вполне приемлемо для градуировки большинства рабочих платиновых термометров.

Наиболее простой метод индивидуальной градуировки рабочих ТС заключается в использовании стандартного коэффициента В зависимости Каллендара и уточнении $R(0)$ и

коэффициента А по результатам градуировки при 0 °С и одной точке на конце диапазона измерений. Этот метод может быть обоснован исходя из особенностей зависимости R(T) для платиновых термометров.

Кривая W(t) для платины является выпуклой с малой кривизной. Значение В связано с А, однако разница в значениях В для платины различной чистоты не более 10^{-8} . Для того чтобы оценить возможный реальный разброс значений коэффициентов интерполяционной зависимости для платиновых термометров, их зависимость от чистоты платины и конструкции термометров, в работе [7] были проанализированы данные о 112 термометрах, градуированных во ВНИИМ и данные из международных публикаций. Разность между максимальным и минимальным значением В для платиновых термометров с показателем W(100) от 1,391 до 1,3926 составила $3,5 \cdot 10^{-9}$. Разброс коэффициентов В термометров фирмы АМТЕК с номинальным W(100)=1,385 составил $2,5 \cdot 10^{-9}$. Очевидно, что точность определения коэффициентов А и В будет существенно зависеть от неопределенности измерений при градуировке, от расстояния между градуировочными точками и от диапазона температур. Применяя закон распространения неопределенности к формулам для коэффициентов А и В, в работе [8] были получены следующие значения неопределенности коэффициентов в зависимости от точности градуировки и диапазонов температур.

Неопр. в точках		Точки градуировки, °С		
		0-75-150	20-85-150	20-232-420
$u_t, ^\circ\text{C}$				
0.01	u_a	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$
	u_b	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
0.03	u_a	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
	u_b	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$

Таким образом даже если суммарная неопределенность градуировки термометров в трех точках диапазона 0-150 °С составляет 0,01 °С мы имеем возможность оценить коэффициент В лишь с точностью до $8,3 \cdot 10^{-9}$. Причем, если первая точка градуировки отлична от 0 °С, то неопределенность коэффициентов возрастает до $1,1 \cdot 10^{-8}$. При неопределенности градуировки 0,03 °С в диапазоне 0-150 °С неопределенность В превышает диапазон коэффициентов для всех типов платины используемых в ТСП. Трудность определения В связана с малой кривизной кривой R(T) в узком диапазоне температур. В диапазоне 0-420 °С точность определения кривизны интерполяционной кривой много выше чем в диапазоне 0-150 °С.

Измерение разности температур

Неопределенность измерения разности температур с помощью двух термометров с индивидуальной градуировкой зависит от неопределенности градуировки каждого термометра и от условий работы термометров, т.е от теплообмена ЧЭ термометров со средой. Методы индивидуальной градуировки ТС были рассмотрены в предыдущей главе. Эти методы могут применяться только в том случае, если нестабильность ТС достаточно высока и если вторичный прибор позволяет использовать индивидуальные коэффициенты. Очень часто возможности работать с индивидуальными характеристиками термометров нет. В прибор введены стандартные коэффициенты КВД по стандарту МЭК 60751 и по стандарту ГОСТ Р 8.625-2006. Можно ли в этом случае получить точность

разности температур лучше, чем допуск рабочих ТС по вышеназванным стандартам? Если взять два произвольных термометра и использовать НСХ, то допускаемая погрешность разности будет равна сумме допусков двух ТС при измеряемых температурах. Снизить погрешность можно, если специально подобрать термометры, исходя из величины их отклонения от НСХ. Именно эта задача решается в методиках поверки комплектов термометров для измерения разности температур.

Если вычислять погрешность разности температур, измеренной с помощью двух термометров, подключенных к прибору, преобразующему сигнал с помощью стандартной НСХ и при этом учитывать только отклонение индивидуальной характеристики $R(T)$ термометров от НСХ, то формула для погрешности будет следующей:

$$\Delta_{12} = ((T_{и1}(R_1) - T_{и2}(R_2)) - ((T_n(R_1) - T_n(R_2))), \quad (5)$$

где:

$T_{и1}(R_1)$, $T_{и2}(R_2)$ – температуры, определенные по индивидуальным градуировочным функциям для первого и второго термометров;

$T_n(R_1)$, $T_n(R_2)$ – температуры, определенные по стандартной градуировочной функции (НСХ) для первого и второго термометров.

Согласно международному стандарту EN 1434 погрешность разности температур в зависимости от величины разности должна находиться в следующих пределах:

$$\Delta_{12} = \pm (0.5 + 3 \times \Delta\theta_{\min}/\Delta\theta)\Delta\theta/100 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6)$$

причем при минимальной разности температур $\Delta\theta_{\min} = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ погрешность не должна превышать $\pm 0,14 \text{ } ^\circ\text{C}$ для разности $\Delta\theta = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $\pm 0,24 \text{ } ^\circ\text{C}$ для разности $\Delta\theta = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Перед предприятиями, выпускающими комплекты термометров для измерения разности температур, стоит задача подобрать пары термометров так, чтобы минимальной оставалась разность (5). Причем, учитывая, что пар много, желательно выбрать наиболее экономичный метод подбора пар.

Проанализируем возможность использования упрощенных методов интерполяции на примере конкретной пары термометров.

Пара состоит из двух термометров с пленочным ЧЭ. Данные градуировки при трех температурах и полученные коэффициенты А и В следующие:

$T_r, \text{ } ^\circ\text{C}$	0,00074	99,46676	149,59771	A	B
R1, Ом	100,0206	138,3601	157,2030	$3,91598 \cdot 10^{-3}$	$-6,39182 \cdot 10^{-7}$
R2, Ом	100,0328	138,3636	157,2028	$3,917452 \cdot 10^{-3}$	$-6,40374 \cdot 10^{-7}$

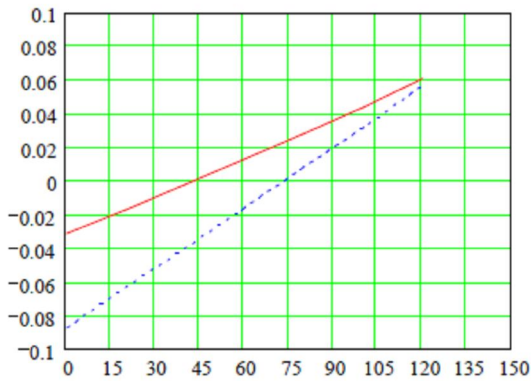
Индивидуальные зависимости $T_{и1}(R_1)$ и $T_{и2}(R_2)$ получаем четырьмя методами:

- 1) расчет коэффициентов $R(0)$, А, В по трем градуировочным точкам,
- 2) расчет $R(0)$ и А по точкам 0 и $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ с использованием стандартного коэффициента В,
- 3) расчет $R(0)$ и А по точкам 0 и $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ с использованием коэффициента В, близкого к реальному для данного типа термометров,
- 4) расчет коэффициентов $R(0)$, А, В по отклонению от стандартной функции МТШ-90 в точке $100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

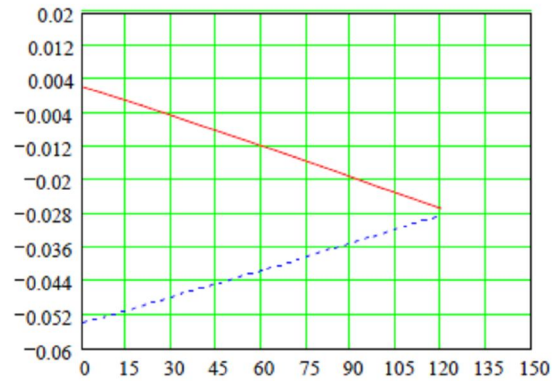
Погрешность пары, вычисляем по формуле (5) для разностей температур «холодного» и «горячего» термометра 10 °С и 30 °С. Диапазон изменения температуры для «холодного» термометра 0 – 120 °С. Графики погрешности были получены для случая, когда «холодным» является термометр №1 (красная линия) и когда «холодным» является термометр №2 (синяя линия).

Рис. 1. Разность температур «холодного» и «горячего» термометра 30 °С. Значения по обеим осям в °С.

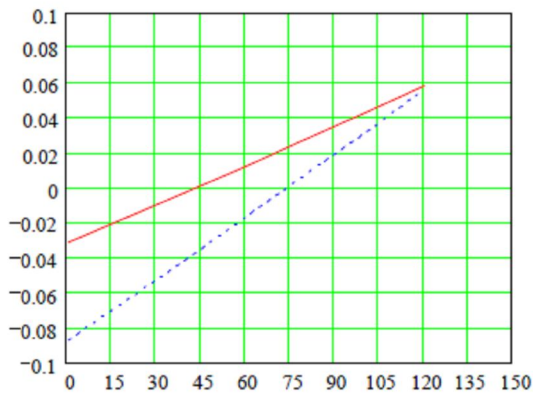
Три точки градуировки



Две точки градуировки, стандартный коэф В



Две точки градуировки, индивидуальный коэф В



Две точки градуировки, по отклонению от МТШ-90

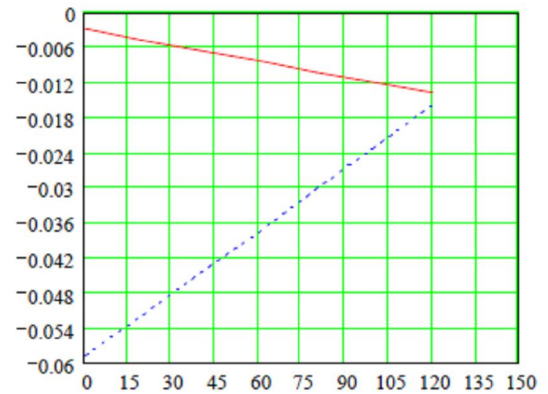
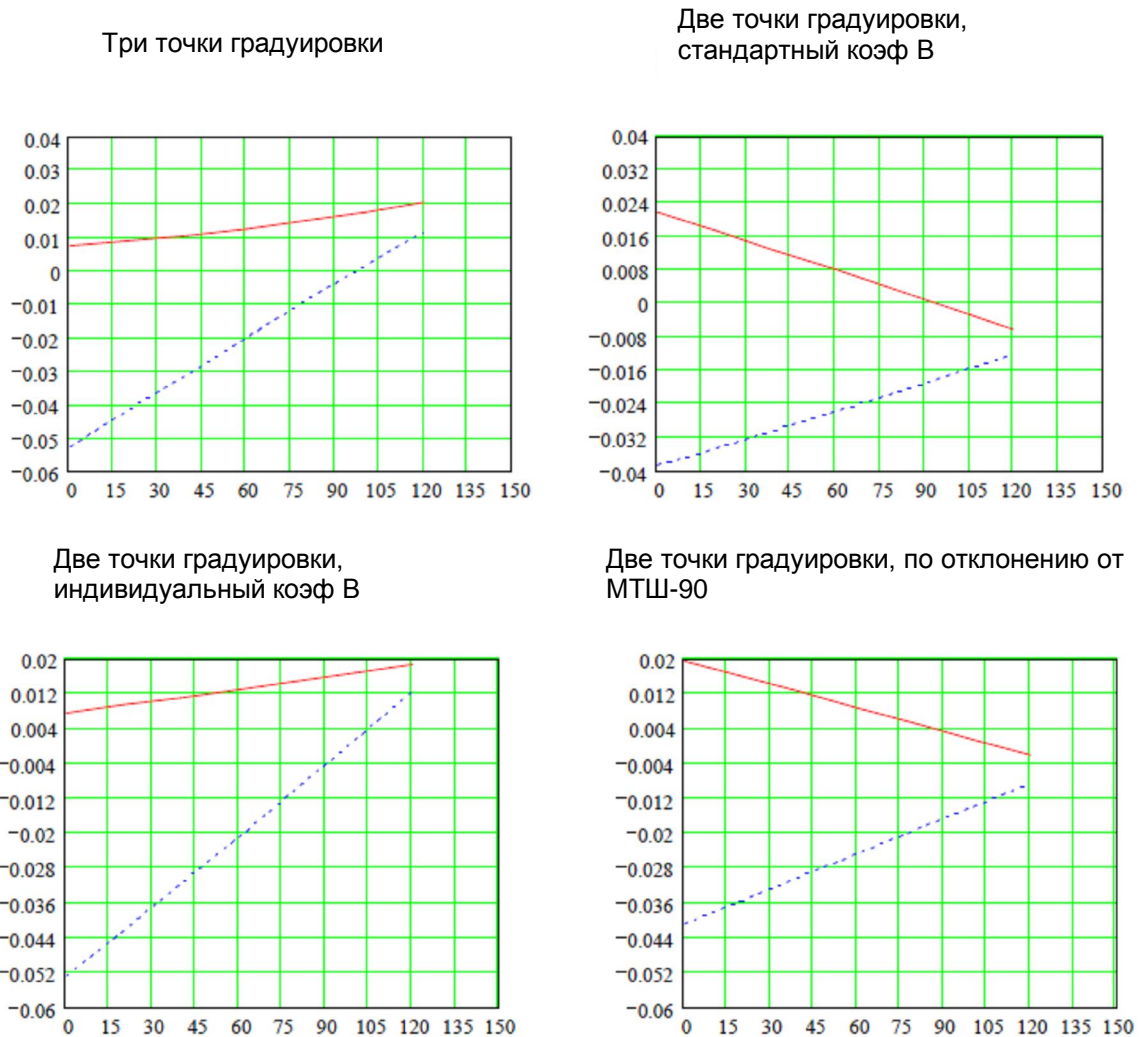


Рис. 2. Разность температур «холодного» и «горячего» термометра 10 °С. Значения по обеим осям в °С.



Для выбранной пары ТС погрешности хорошо укладываются в допустимые по формуле (6) значения. Ход графиков погрешностей при перемене местами «холодного» и «горячего» термометров изменяется при применении упрощенного метода с использованием стандартного коэффициента B и при методе с использованием отклонения от МТШ-90. Из упрощенных методов ближе всех к зависимости, построенной по трем точкам, метод, в котором применяется индивидуальное значение коэффициента B , характерное для данного типа термометров. Это не удивительно, поскольку различие между стандартным B и индивидуальным довольно существенное. Современная технология изготовления пленочных ТС позволяет достичь высокой воспроизводимости коэффициентов зависимости $R(t)$. Однако, как правило, сами коэффициенты могут существенно отличаться от стандартных. Упрощенная методика подбора пар термометров может быть основана на исследовании индивидуальных коэффициентов, характерных для партии ТС.

Литература

1. Мирлин А.Д., Моисеева Н.П. «Методика описания интерполяционной зависимости платиновых термометров сопротивления в диапазоне 0 – 962 °С.» – Измерительная техника № 4, 1990, стр. 34-36.
2. Moiseeva, N. P., Pokhodun A.I. “Approximation of ITS-90 with High Temperature Thermometers up to 1085 °C ”, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 7, edited by D. C. Ripple et al., AIP Conference Proceedings, Melville, New York, 2003, p. 369-374.
3. Kang Zhiru^{1,2}, Fu Guangsheng¹, Kenneth D. Hill «TWO QUADRATIC DEVIATION FUNCTIONS FOR SPRT IN THE RANGE 0°C TO 660.323°C» In *Proceedings of TEMPMEKO 2004: The 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science* (Edited by Davor Zvizdic), Dubrovnik, Croatia, 2005.
4. Richard W. Phillips “Efficient Calibration Methods For Platinum Resistance Thermometers” in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 7, edited by D. C. Ripple et al., AIP Conference Proceedings, Melville, New York, 2003
5. P. Marcarino, A. Merlone, P.P.M. Steur, A. Actis, M. Antinori “PROPOSAL OF NEW REFERENCE FUNCTIONS FOR INDUSTRIAL PLATINUM RESISTANCE THERMOMETERS” In *Proceedings of TEMPMEKO 2004: The 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science* (Edited by Davor Zvizdic), Dubrovnik, Croatia, 2005
6. Moiseeva, N. P., “Investigation of W(T) Functions for Low- α PRTs in the Sub-ranges above 0 °C”, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 7, edited by D. C. Ripple et al., AIP Conference Proceedings, Melville, New York, 2003, p. 333-338.
7. Н.П. Моисеева «ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ТСП В УЗКИХ ДИАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР» Измерительная Техника 2004 г № 11, стр. 39-43
8. Моисеева Н.П. «Неопределенность значения температуры, измеренной платиновым термометром сопротивления», Приборы №12, 2002, стр. 30-34

