

Моисеева Н.П.

ВЫБОР ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПЛАТИНОВОГО ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Введение

Среди всех средств измерения температуры платиновый термометр сопротивления занимает особое место. Во-первых, именно платиновый термометр является основным интерполяционным прибором для воспроизведения международной температурной шкалы МТШ-90 в диапазоне от 13,8 до 961,78 °С. Во-вторых, на настоящий момент, это самый точный температурный датчик для контактного измерения температуры. В третьих, платиновые термометры сейчас могут изготавливаться в очень миниатюрном исполнении, в герметичных корпусах, позволяющих использовать их практически на любых в объектах. Точность измерения температуры платиновым термометром сопротивления зависит от таких факторов, как стабильность сопротивления термометра при рабочих условиях и неопределенность поверки, т.е. сличений с вышестоящим эталоном в градуировочных точках. Важное значение имеет также выбор вида интерполяционной функции $R(T)$, позволяющей по результатам градуировки воспроизвести зависимость сопротивления от температуры во всем рабочем диапазоне температур. Для эталонных термометров, входящих в состав Государственного эталона температуры, альтернативы в выборе интерполяционного уравнения нет. Для них должны использоваться уравнения МТШ-90 в том виде, в котором они установлены в положении о шкале (например, для диапазона выше 0 °С это полином девятой степени плюс функции отклонения). Однако, для термометров более низкого звена, как образцовых, так и рабочих, упрощение эталонных уравнений не запрещено. И здесь вопрос о выборе уравнения

интерполяции очень важен, именно он определяет необходимое число градуировочных точек, трудоемкость и себестоимость градуировки термометров. В данной статье анализируется возможность построения альтернативных интерполяционных зависимостей для образцовых и рабочих платиновых термометров сопротивления на основе упрощения функций отклонения от стандартной зависимости МТШ-90 и на основе упрощения самой стандартной зависимости. Результаты анализа могут быть интересны всем, кто использует платиновые термометры в научных лабораториях, поверочных центрах, на производстве, а также специалистам, разрабатывающим вторичные преобразователи сигнала для термометров сопротивления.

Упрощенные интерполяционные функции на основе метода МТШ-90

Принцип построения практической международной температурной шкалы был выбран еще в 1927 г, когда была введена первая шкала МТШ-27. Главными элементами шкалы с тех пор являются реперные температуры – температуры фазовых переходов чистых веществ, а также удобные интерполяционные инструменты, в качестве которых уже тогда было решено использовать платиновые термометры сопротивления (ПТС) на интервале температур от -200 до 600 °С. Важным элементом шкалы, который также устанавливается при принятии положения о международной шкале Генеральной конференцией МБМВ, является вид уравнений, связывающих термометрическое свойство (в нашем случае, сопротивление термометра) и температуру. Так, последняя версия шкалы, МТШ-90, устанавливает метод построения индивидуальной интерполяционной зависимости для платиновых термометров на основании стандартного полинома с известными коэффициентами $W_{\text{ref}}(T)$ и функций отклонения в поддиапазонах температур.

Стандартный полином – это фактически полученная экспериментально зависимость удельного сопротивления платины высокой чистоты от термодинамической температуры. Градуировка всех платиновых термометров сводится к вычислению отклонения от данной стандартной функции, характерного для конкретного термометра. И хотя в положении о шкале установлен набор реперных точек для градуировки термометров и степени полиномов функций отклонения от $W_{ref}(T)$, 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 высокотемпературных термометров сопротивления (ВТС) в интервале 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 альтернативные 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 при использовании квадратичной зависимости вместо кубической не превышает 4,7 мК. В работе [4] предлагается для образцовых и рабочих термометров использовать точку 230 °С 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 °С! Такая упрощенная методика сейчас используется в американской корпорации Goodrich для градуировки термометров специальной конструкции. 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.

Особый интерес представляет, конечно, линейная функция отклонения, построенная на основе градуировки в одной реперной точке затвердевания металла плюс в тройной точке воды. Для высокотемпературных термометров градуировка в одной точке снижает стоимость поверки в четыре раза по сравнению с традиционным методом. Проанализируем точность метода на примере данных градуировки 52 термометров ВТС, 22 из которых градуировались в различных институтах за границей (данные опубликованы в документе консультативного комитета по термометрии «H.J. Jung and Li Xumo, Document SST/87-8»), 30 термометров – во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. По относительному сопротивлению в точке затвердевания цинка $W(\text{Zn})$ рассчитаем коэффициент a линейной функции отклонения от стандартной функции МТШ-90 $\Delta W(T) = a (W(T) - 1)$ по простой формуле $a = [W(\text{Zn}) - W_{ref}(\text{Zn})] / [W(\text{Zn}) - 1]$. Складывая теперь известную во всем диапазоне температур стандартную функцию $W_{ref}(T)$ и функцию отклонения $\Delta W(T)$ получим индивидуальную зависимость $W(T)$. Погрешность метода, т.е. отклонение полученной зависимости от реальных результатов можно оценить сравнив расхождение расчетных и градуировочных значений относительных сопротивлений в точках алюминия и серебра. Результаты представлены на рис.1 и рис.2. соответственно. На графиках отклонение температур реперных точек показаны в зависимости от $W(\text{Zn})$.

Из графиков следует, что используя только одну градуировочную точку для ВТС можно получить отклонение от МТШ-90 не превышающее 0,015 °С до 660 °С и не более 0,065 °С до 960 °С. Отклонения разные для различных термометров, но прямой зависимости от температурного коэффициента используемой платины не наблюдается. Скорее всего разница связана с конструктивными особенностями термометров, их

стабильностью и неопределенностью градуировки в точке цинка в различных лабораториях.

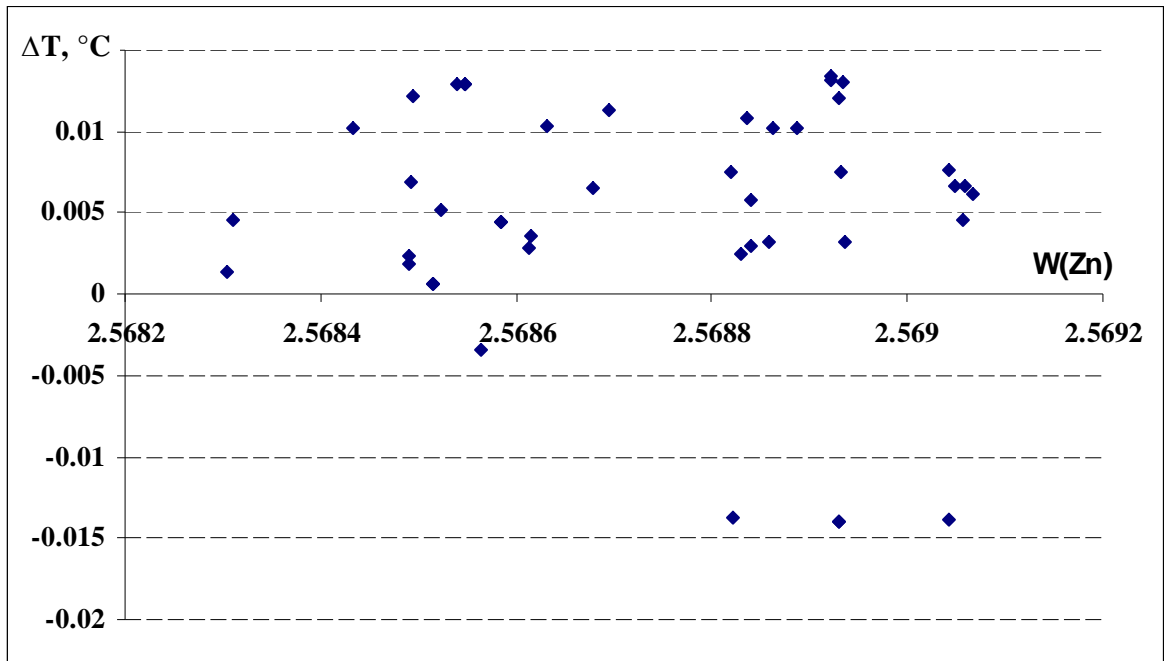


Рис.1 Расхождение расчетных и измеренных значений температуры в реперной точке алюминия.

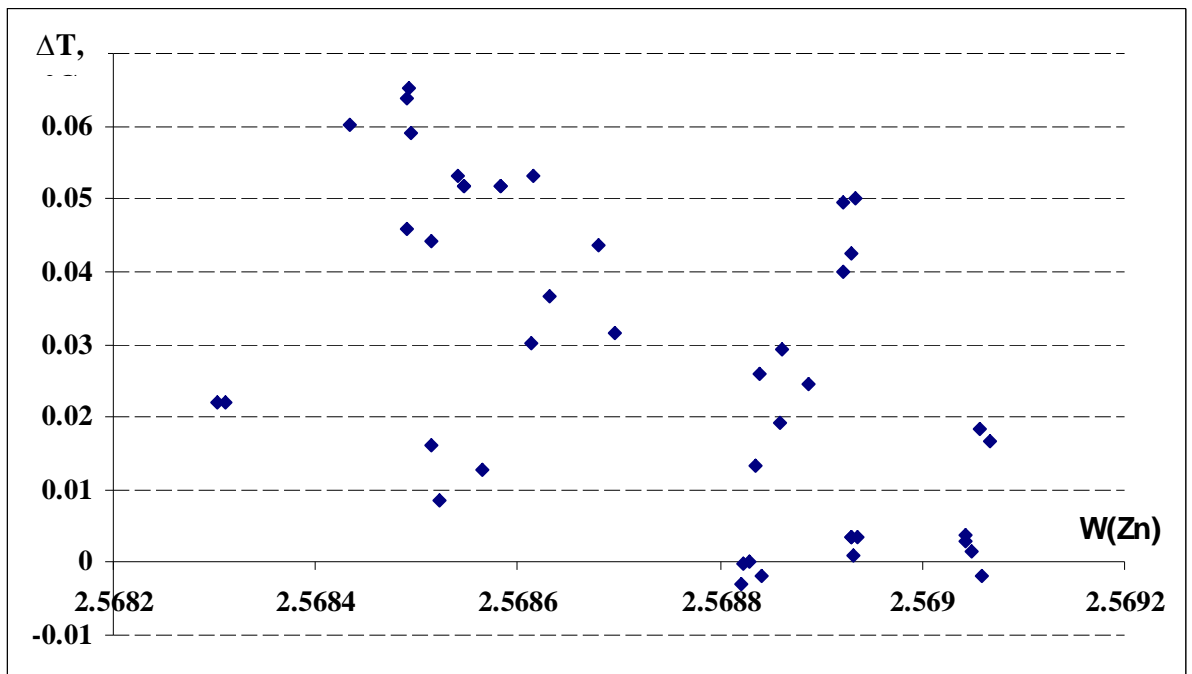


Рис.2 Расхождение расчетных и измеренных значений температуры в реперной точке серебра.

Основной вывод заключается в том, что упрощенные функции вполне могут применяться для термометров, требования к точности и стабильности которых находятся на уровне нескольких сотых градуса. Заметим, что для ВТС первого разряда в стандарте ГОСТ 51233-98 установлены требования к доверительной погрешности $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ в точке цинка и $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в точке меди ($1084,62\text{ }^{\circ}\text{C}$). Отметим также, 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. Функция Каллендара Ван Дюзена.

Для рабочих платиновых термометров сопротивления (ТС) законно применяется на практике еще более далекий от МТШ-90 метод. Это метод заключается в упрощении самой стандартной функции и отказа от какой-либо функции отклонения. Стандартной функцией для рабочих термометров является функция Каллендара Ван Дюзена (КВД). Фактически, вместо полинома девятой степени в диапазоне выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ используется полином второй степени. Вместо уточняющей зависимости индивидуальной функции отклонения используется просто сортировка ТС 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 погрешности значения температуры

измеренного рабочим ТС по отношению к значению по МТШ-90. Допуски на отклонение от стандартной функции для рабочих ТС класса А составляют более 0,15 °С при комнатных температурах и более 1 °С при 450 °С.

Существует промежуточный класс термометров, точность которых выше, чем точность рабочих ТС, но ниже, чем точность образцовых ПТС. 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 вышеупомянутого полинома Каллендара Ван Дюзена. 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, японский стандарт JIS) и стандарты промышленных компаний позволяют использовать также другие полиномы.

Наиболее полное экспериментальное исследование погрешности зависимости КВД по отношению к шкале эталонного термометра провел П. Маркарино (Италия) [5]. Принимая во внимание, что единственным законным методом интерполяции для рабочих ТС является уравнение Каллендара Ван Дюзена, он уделил этому методу особое внимание и провел градуировку 38 платиновых ТС в диапазоне от -80 до 650 °С, по результатам которой построил экспериментальные кривые, показывающие, на сколько температура, рассчитанная по КВД для рабочих ТС, отличается от показаний эталонного термометра,

градуированного по МТШ-90. Выяснилось, что не зависимо 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 [5]. 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 для включения в новую рекомендацию МЭК, хотя широкое распространение этого метода вызывает сомнения, поскольку 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.

Необходимо отметить, что методика МТШ-90, хотя и не входит в стандарты на рабочие ТС, уже широко используется во вторичных преобразователях. На основании обработки большого количества данных градуировки эталонных и рабочих ТС было подтверждено во многих работах, в частности в статье [6], что отклонение индивидуальной функции КВД от МТШ-90 для термометров проволочного типа не зависит от сорта платины и температурного коэффициента сопротивления термометра.

Выше в предыдущей главе было показано, что для градуировки образцовых термометров могут использоваться упрощенные

зависимости для функций отклонения от стандартной функции МТШ-90, требующие использования одной градуировочной точки. В работе [6] предложен метод, который сохраняет подход МТШ-90, но позволяет упростить для рабочих термометров также опорную функцию. 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 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 простую, чем МТШ-90 и более точную, чем НСХ по МЭК60751, которая была получена экспериментальным путем в диапазоне 0-650 °С.

Например, приведем коэффициенты стандартной функции КВД для двух узких диапазонов:

для диапазона 0-156 °С

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

для диапазона 0-230 °С

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

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

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

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

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.3

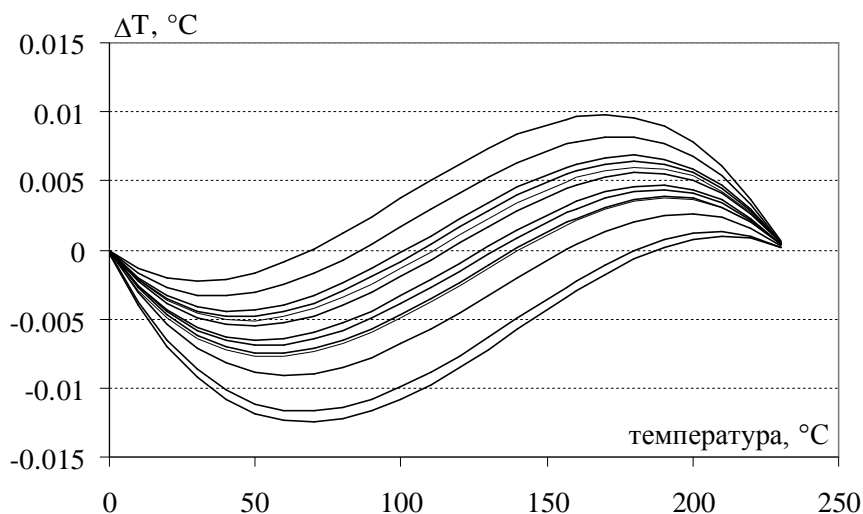


Рис.3 Отклонение функции МТШ-90 от функции, полученной по формулам (3) и (4).

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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в 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 АМЕТЕК 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.

Таблица 1 – суммарные стандартные неопределенности коэффициентов функции КВД, полученные при двух разных значениях неопределенностей градуировки ТС, в $^{\circ}\text{C}$.

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

Метод использования стандартного коэффициента В очень распространен для индивидуальной градуировки термометров, используемых в приборах учета количества потребляемой тепловой энергии. Такие термометры очень часто имеют чувствительный элемент в виде напыленной на пластинку платиновой пленки. Как показывает опыт, коэффициент В для напыленных термометров может быть отличным от стандартного по НСХ МЭК 60751, но в то же время очень хорошо воспроизводимым для партии ТС. В этом случае, лучшим вариантом функции является использование коэффициентов КВД, характерных для конкретной партии ТС,

Вывод

В работе рассмотрены наиболее распространенные методы интерполяции для образцовых и рабочих платиновых термометров. Показано, что возможно упростить методику МТШ-90, как сократив

количество градуировочных точек, так и применяя более простой вид стандартной функции.

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