

## S5 Калибровка термопары типа N при температуре 1000 °C

**S5.1** Термопары типа N калибруются путем сравнения с двумя эталонными термопарами типа R в горизонтальной печи при температуре 1000 °C. ЭДС, генерируемая термопарами, измеряется с помощью цифрового вольтметра, включенного через селекторный переключатель. Опорные спаи всех термопар находятся при температуре 0 °C. Калибруемая термопара подключается к опорной точке с помощью компенсационных проводов.

Значения температуры приведены в соответствии со шкалой МТШ-90 ( $t_{90}$ ).

**S5.2** Температура  $t_X$  горячего спая калибруемой термопары определяется следующим образом:

$$t_X = t_S \left( V_{iS} + \delta V_{iS1} + \delta V_{iS2} + \delta V_R - \frac{\delta t_{0S}}{C_{S0}} \right) + \delta t_D + \delta t_F \cong$$
$$t_S (V_{iS}) + C_S \times \delta V_{iS1} + C_S \times \delta V_{iS2} + C_S \times \delta V_R - \frac{C_S}{C_{S0}} \delta t_{0S} + \delta t_D + \delta t_F \quad (S5.1)$$

**S5.3** Напряжение  $V_X$ , возникающее в термопаре при температуре холодного спая 0 °C во время калибровки определяется:

$$V_X(t) \cong V_X(t_X) + \frac{\Delta t}{C_X} - \frac{\delta t_{0X}}{C_{X0}} =$$
$$= V_{iX} + \delta V_{iX1} + \delta V_{iX2} + \delta V_R + \delta V_{LX} + \frac{\Delta t}{C_X} - \frac{\delta t_{0X}}{C_{X0}} \quad (S5.2)$$

где:

$t_S (V)$  – температура эталонного термометра при температуре холодного спая 0 °C в зависимости от напряжения. Функция указана в свидетельстве о калибровке;

$V_{iS}, V_{iX}$  – показания вольтметра;

$\delta V_{iS1}, \delta V_{iX1}$  – поправка к значению напряжения, определенная при калибровке вольтметра;

$\delta V_{iS2}, \delta V_{iX2}$  – поправка к значению напряжения, обусловленная конечным разрешением вольтметра;

$\delta V_R$  – поправка к значению напряжения из-за контактных эффектов переключателя полярности;

$\delta t_{0S}, \delta t_{0X}$  – поправка к значению температуры, возникающая из-за отклонения опорной температуры от 0 °C;

$C_S, C_X$  – чувствительность термопар по напряжению при измеряемой температуре 1000 °C;

$C_{S0}, C_{X0}$  – чувствительность термопар по напряжению при опорной температуре 0 °C;

$\delta t_D$  – изменение значений эталонных термометров с момента их последней калибровки из-за дрейфа;

$\delta t_F$  – поправка к значению температуры из-за неоднородности температуры печи;

$t$  – температура, при которой термопара должна быть откалибрована (точка калибровки);

$\Delta t = t - t_X$  – отклонение температуры точки калибровки от температуры печи;

$\delta V_{LX}$  – поправка к значению напряжения, возникающая из-за компенсационных проводов.

**S5.4** Результатом калибровки является измеренная ЭДС калибруемой термопары при определенной температуре ее горячего спая.

Так как измерительный процесс складывается из двух этапов – определения температуры печи и ЭДС калибруемой термопары, то определение неопределенности измерения также состоит из двух частей.

**S5.5 Эталонные термопары ( $t_S(V)$ ):** Эталонные термопары поставляются вместе со свидетельствами калибровки, в которых указывается зависимость температуры горячего спая при температуре холодного спая  $0\text{ }^\circ\text{C}$  от напряжения на термоэлектродах. Соответствующая расширенная неопределенность измерения при  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  составляет  $U = 0,3\text{ K}$  (коэффициент охвата  $k = 2$ ).

**S5.6 Калибровка вольтметра ( $\delta V_{IS1}, \delta V_{IX1}$ ):** Вольтметр был откалиброван. Соответствующие поправки к значениям напряжения были введены для всех результатов измерений. В свидетельстве калибровки приведено постоянное значение расширенной неопределенности измерения при напряжениях менее  $50\text{ мВ}$ , составляющее  $U = 2,0\text{ мВ}$  (коэффициент охвата  $k = 2$ ).

**S5.7 Разрешение вольтметра ( $\delta V_{IS2}, \delta V_{IX2}$ ):** 4.-разрядный цифровой микровольтметр использовался в  $10\text{ мВ}$ -диапазоне, что привело к пределу разрешения для каждого показания  $\pm 0,5\text{ мкВ}$ .

**S5.8 Паразитные напряжения ( $\delta V_R$ ):** Остаточные паразитные напряжения, обусловленные контактными напряжениями в переключателе, равны нулю с границами отклонений  $\pm 2\text{ мкВ}$ .

**S5.9 Опорная температура ( $\delta t_{OS}, \delta t_{OX}$ ):** температура опорной точки каждой термопары составляет  $0\text{ }^\circ\text{C}$  с максимальным отклонением  $\pm 0,1\text{ K}$ .

**S5.10 Чувствительность по напряжению ( $C_S, C_X, C_{S0}, C_{X0}$ ):** Чувствительность по напряжению термопар была выбрана из справочной таблицы:

	$1000\text{ }^\circ\text{C}$	$0\text{ }^\circ\text{C}$
Эталонная термопара	$C_S=0,077\text{ }^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	$C_{S0}=0,189\text{ }^\circ\text{C}/\text{мкВ}$
Неизвестная термопара (калибруемая)	$C_X=0,026\text{ }^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	$C_{X0}=0,039\text{ }^\circ\text{C}/\text{мкВ}$

**S5.11 Дрейф эталонного термометра ( $\delta t_D$ ):** При предыдущих калибровках дрейф эталонного термометра был оценен значением "нуль" внутри интервала  $\pm 0,3\text{ K}$ .

**S5.12 Температурная неоднородность ( $\delta t_F$ ):** Измерялся температурный градиент в печи. При  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  отклонения от равномерного распределения температуры в области измерений лежат в пределах  $\pm 1\text{ K}$ .

**S5.13 Компенсационные соединения ( $\delta V_{LX}$ ):** Компенсационные провода были исследованы в диапазоне от 0 °С до 40 °С. При этом, разница напряжения между проводами и термоэлектродами термопары была получена равной  $\pm 5$  мкВ.

**S5.14 Наблюдения ( $V_{is}$ ,  $t_s(V_{is})$ ,  $V_{ix}$ ):** Показания вольтметра регистрировались согласно следующему измерительному циклу, который позволил получить для каждой термопары четыре измерения, уменьшить эффекты температурного дрейфа в источнике нагрева и эффекты паразитных термо ЭДС:

1-ый цикл:

1-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 2-ая эталонная термопара, 2-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 1-ая эталонная термопара.

Изменение полярности

2-ой цикл:

1-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 2-ая эталонная термопара, 2-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 1-ая эталонная термопара.

**S5.15** Этот способ пригоден только тогда, когда наблюдаемая разность температур между обеими эталонными термопарами не превышает  $\pm 0,3$  °С. Иначе необходимо повторить наблюдения и/или исследовать причины такой большой разницы температур.

Термопара	1-ая эталонная	Неизвестная (калибруемая)	2-я эталонная
Показания напряжения, откорректированные	+ 10500 мкВ	+ 36245 мкВ	+ 10503 мкВ
	+ 10503 мкВ	+ 36248 мкВ	+ 10503 мкВ
	- 10503 мкВ	- 36248 мкВ	- 10505 мкВ
	- 10504 мкВ	- 36251 мкВ	- 10505 мкВ
Среднее напряжение	10502,5 мкВ	36248 мкВ	10504 мкВ
Температура горячего спа	1000,4 °С		1000,6 °С
Температура печи		1000,5 °С	

**S5.16** Для четырех показаний, снятых для каждой термопары и представленных в вышеприведенной таблице, определялось среднее значение напряжения для каждой термопары. Средние значения напряжений эталонных термопар пересчитывались в значения температуры с помощью указанных в их свидетельствах калибровки зависимостей температура-напряжение. Наблюдаемые значения температуры сильно коррелированы (коэффициент корреляции почти единица). Таким образом, вычисление их среднего значения дает одно наблюдение, которое и представляет собой температуру печи в месте размещения калибруемой термопары. Аналогичным образом определяется наблюдаемое значение напряжения калибруемой термопары.

Для того, чтобы оценить неопределенность измерения, связанную с этими наблюдениями, предварительно была проведена серия из десяти измерений при той же рабочей температуре. Она позволила определить общую оценку стандартного отклонения результатов изменения температуры печи и напряжения калибруемой термопары.

Соответствующие стандартные неопределенности измерений измеряемых величин следующие:

Значение суммарной оценки стандартного отклонения  $s_p(t_s)=0,10$  °С

Стандартная неопределенность измерения:  $u(t_S) = s_p(t_S)/\sqrt{1} = 0,10^\circ\text{C}$   
 Значение суммарной оценки стандартного отклонения:  $s_p(V_{iX}) = 1,6\text{мкВ}$   
 Стандартная неопределенность измерения:  $u(V_{iX}) = s_p(V_{iX})/\sqrt{1} = 1,6\text{мкВ}$

### S5.17 Бюджет неопределенности (температура печи $t_X$ ):

Измеряемая величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей	Коэффициент чувствительности $c_i$	Вклад в суммарную неопределенность $u_i(y)$
$t_S$	$1000,5^\circ\text{C}$	$0,10^\circ\text{C}$	Нормальное	1,0	$0,10^\circ\text{C}$
$\delta V_{iS1}$	0мкВ	1,00мкВ	Нормальное	$0,077^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	$0,077^\circ\text{C}$
$\delta V_{iS2}$	0мкВ	0,29мкВ	Прямоугольное	$0,077^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	$0,022^\circ\text{C}$
$\delta V_R$	0мкВ	1,15мкВ	Прямоугольное	$0,077^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	$0,089^\circ\text{C}$
$\delta t_{0S}$	$0^\circ\text{C}$	$0,058^\circ\text{C}$	Прямоугольное	-0,407	$-0,024^\circ\text{C}$
$\delta t_S$	$0^\circ\text{C}$	$0,15^\circ\text{C}$	Нормальное	1,0	$0,15^\circ\text{C}$
$\delta t_D$	$0^\circ\text{C}$	$0,173^\circ\text{C}$	Прямоугольное	1,0	$0,173^\circ\text{C}$
$\delta t_F$	$0^\circ\text{C}$	$0,577^\circ\text{C}$	прямоугольное	1,0	$0,577^\circ\text{C}$
$t_X$	$1000,5^\circ\text{C}$				$0,641^\circ\text{C}$

### S5.18 Бюджет неопределенности (ЭДС $V_X$ калибруемой термопары):

Стандартная неопределенность измерения, связанная с отклонением температуры калибровочной точки от температуры печи, равна стандартной неопределенности измерения температуры печи, так как калибровочная точка имеет определенное (точно известное) значение.

Измеряемая величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятностей	Коэффициент чувствительности $c_i$	Вклад в суммарную неопределенность $u_i(y)$
$V_{iX}$	36248мкВ	1,60мкВ	Нормальное	1,0	1,60мкВ
$\delta V_{iX1}$	0мкВ	1,00мкВ	Нормальное	1,0	1,00мкВ
$\delta V_{iX2}$	0мкВ	0,29мкВ	Прямоугольное	1,0	0,029мкВ
$\delta V_R$	0мкВ	1,15мкВ	Прямоугольное	1,0	1,15мкВ
$\delta V_{LX}$	0мкВ	2,9мкВ	Прямоугольное	1,0	2,9мкВ
$\Delta t$	$0,5^\circ\text{C}$	$0,641^\circ\text{C}$	Нормальное	$38,5\text{мкВ}/^\circ\text{C}$	24,5мкВ
$\delta t_{0X}$	$0^\circ\text{C}$	$0,173^\circ\text{C}$	Прямоугольное	$-25,6\text{мкВ}/^\circ\text{C}$	-1,48мкВ
$V_X$	36229мкВ				25,0мкВ

### S5.19 Расширенная неопределенность

Расширенная неопределенность измерения температуры печи определяется как:

$$U = k \times u(t_X) = 2 \times 0,641^\circ\text{C} \cong 1,3^\circ\text{C}$$

Расширенная неопределенность значения ЭДС калибруемой термопары, составляет:

$$U = k \times u(V_X) = 2 \times 25,0\text{мкВ} \cong 50\text{мкВ}$$

**S5.20 Окончательный результата измерения:**

ЭДС термопары типа N при температуре 1000,0 °С, и температуре холодного спая 0 °С составляет 36230 мкВ ± 50 мкВ. Указанная расширенная неопределенность получена умножением стандартной неопределенности измерений на коэффициент охвата  $k = 2$ , который для нормального распределения соответствует вероятности охвата приблизительно 95%.