

# Расчет неопределенности в системе калибровки термопары

## Указания по применению

### Серия заметок о применении термопары

Это третья из четырех заметок о применении термопар:

1. Основные сведения о термопаре
2. Как выбрать оборудование для калибровки термопары
3. Расчет неопределенности в системе калибровки термопары
4. Как откалибровать термопару



Прецизионный сканер температуры Super-DAQ 1586A с мультимплексором DAQ-STAQ

### Примерная оценка неопределенности

Существует несколько неопределенностей калибровки, которые необходимо оценить при определении общей неопределенности системы калибровки термопары. В этом разделе приведен пример того, как подготовить оценку неопределенности для системы, состоящей из следующего оборудования, для калибровки термопар при 1000 °С.

- Эталонный датчик: Термопара типа S с эталонным спаем 5650
- Показания: Прецизионный сканер температуры Super-DAQ 1586A с мультимплексором DAQ-STAQ
- Источник температуры: Калибровочная печь для термопары 9118A
- Проверяемое оборудование (UUT): Термопара типа S с эталонным спаем

На рис. 1 показан пример оценки неопределенности. Он предлагает один метод для агрегирования некоторых наиболее важных факторов неопределенности системы. Для каждой неопределенности приведен код и представлено соответствующее обсуждение. Этот анализ неопределенности является всеобъемлющим, но упрощается для общей технической аудиторией, так что может быть важно проконсультироваться с местным НМИ (Национальный институт метрологии) или

органом аккредитации (для аккредитованных калибровочных лабораторий) и получить более подробную информацию.

Следующий анализ неопределенности показывает неопределенность в стандартной и расширенной форме. Разница между стандартной и расширенной формой заключается в том, что стандартная неопределенность умножается на определенный коэффициент покрытия, как правило, указанный как значение  $k$ , чтобы стать расширенной неопределенностью. Или неопределенность делится на делитель



Калибровочная печь для термопары 9118A

**Рис. 1. Оценка неопределенности системы калибровки термопары при 1000 °С**

Стандартные неопределенности типа В	Код	Стандартная неопределенность (°С)	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность (°С)
Помехи измерения/стабильность эталона (n≥30)	A1	0,01	2	0,02
Помехи измерения/стабильность проверяемого устройства (n≥30)	A2	0,01	2	0,02
Статистика образцового средства измерений	A3	0,01	2	0,02
Точность показаний 1586А (для эталонного зонда)	B1	0,19	2	0,38
Точность эталонного спая (для эталонного зонда)	B2	0,01	√3	0,01
Точность показаний 1586А (для проверяемого устройства – тип S)	B3	0,28	2	0,56
Точность эталонного спая (для проверяемого устройства – тип S)	B4	0,07	2	0,13
Неопределенность калибровки эталонного датчика	B5	0,13	2	0,26
Предел долговременного ухода эталонного зонда	B6	0,06	√3	0,10
Осевая однородность печи 9118А	B7	0,10	2	0,20
Радиальная однородность печи 9118А	B8	0,12	2	0,23
Общая стандартная неопределенность (k=1)				<b>0,52</b>
Общая расширенная неопределенность (k=2)				<b>1,04</b>

Примечание. Каждая неопределенность округляется до двух знаков после запятой после расчета.

преобразования, чтобы оценить его значение стандартной неопределенности (k=1). Значение k соответствует уровню доверия. Например, в большинстве случаев k=2 соответствует 2-сигме или уровню доверия 95 %. Подробнее об этом будет рассказано в разделе данного документа «Объединение неопределенностей».

### A1 и A2. Помехи измерения

Помехи измерения — это неопределенность, вызванная помехами или нестабильностью показаний измерения. Каждая точка измерения основана на среднем или среднем из 30 или более показаний или образцов. Неопределенность помех или нестабильности 30 показаний рассчитывается путем деления стандартного отклонения по 30 образцам на квадратный корень из n (n=30). Этот расчет часто называют стандартной погрешностью среднего.

Как правило, измерение помех охватывает как помехи показаний, так и нестабильность источника тепла. Спецификации производителя на стабильность источника тепла могут быть схожими, но лучше провести измерения и проконтролировать фактическое стандартное отклонение, чтобы обеспечить соответствие требованиям анализа неопределенности.

Стандартное отклонение текущего измерения или соответствующая стандартная погрешность могут быть введены в анализ неопределенности каждый раз при измерении, или предел помех измерения может быть назначен каждой точке измерения. В случае предела измерения контролируются для проверки соответствия устойчивости (стандартное отклонение) пределам, заявленным в ходе анализа

неопределенности. В этом примере мы будем использовать стандартный предел отклонения.

Следующее уравнение показывает, как выполнить этот расчет:

$$U_{A1} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\pm 0.050 \text{ °C}}{\sqrt{30}} = \pm 0.009 \text{ °C}$$

- U<sub>A1</sub>: неопределенность в связи с помехами измерения (°C)
- s: стандартное отклонение измерений (°C)
- n: количество образцов (30 и более)

Совет: Если показания даны в единицах напряжения (мВ), разделите U<sub>A1</sub> на чувствительность термопары, чтобы преобразовать температуру (°C).

### A3. Статистика образцового средства измерений

Статистика образцового средства измерений — это показатель стабильности процесса калибровки. Может быть полезно измерить датчик образцового средства измерений вместе с проверяемым устройством. Результаты измерения образцового средства измерений показаны на контрольной диаграмме и анализируются, чтобы убедиться в отсутствии неожиданных ошибок.

Образцовое средство измерений должно быть аналогично проверяемому устройству, чтобы изменения в процессе одинаково повлияли на образцовое средство измерений и на проверяемое устройство. Образцовое средство измерений, изготовленное из неблагородного металла, не может быть достаточно повторяемым, чтобы обеспечить долгосрочную стабильность процесса калибровки. Рекомендуется использовать

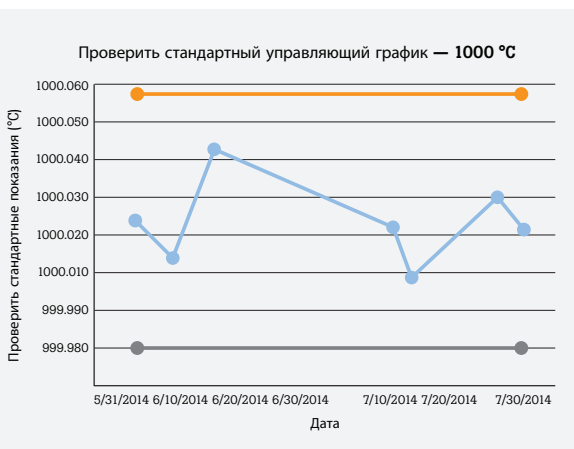
высококачественную термопару типа S или R в качестве образцового средства измерений.

Значение, введенное в анализ неопределенности, является стандартным отклонением образцового средства измерений с течением времени. Например, в таблице на рис. 2 приведены показания, взятые из нескольких проходов процесса калибровки. Стандартное отклонение семи показаний образцового средства измерений рассчитывается как 0,011 °C. Это можно ввести в анализ неопределенности, но лучше продолжить добавлять показания и обновлять компонент статистики образцового средства измерений, пока количество не достигнет 30 и более. Это число также используется, чтобы установить контрольные линии на графике проверки образцового средства измерений. Значение стандартного отклонения ( $\sigma$ ) умножается на два или на три, чтобы установить 2- $\sigma$  или 3- $\sigma$  контрольные линии в зависимости от ваших требований. На примере контрольного графика на рис. 3 показаны 3- $\sigma$  контрольные линии.

**Рис. 2. Пример контрольных показаний**

	Показания образцового средства измерений (°C)
Проход 1	1000,025
Проход 2	1000,014
Проход 3	1000,042
Проход 4	1000,022
Проход 5	1000,008
Проход 6	1000,031
Проход 7	1000,021
	Стандартное отклонение = ± 0,011 °C

**Рис. 3: Пример контрольного графика**



**V1 и V3. Вычисление точности показаний 1586A (для эталонного датчика и проверяемого устройства)**

Точность показаний относится к эталонному датчику и к проверяемому устройству. Следующие расчеты показывают, как преобразовать типичные характеристики термопары в значения, которые могут быть введены в анализ неопределенности.

Поскольку большинство показаний термопары указаны как точность напряжения, следующее уравнение преобразует неопределенность напряжения в температуру:

$$U_{T(°C)} = \frac{U_v}{S_{M1}}$$

- $U_{T(°C)}$ : неопределенность эквивалентной температуры
- $U_v$ : неопределенность измерения напряжения
- $S_{M1}$ : чувствительность термопары при температуре измерительного спая

Совет: Вычислите  $S_{M1}$  по таблице напряжений термопары. Это изменение напряжения (мВ) при изменении температуры на 1 °C ( $\Delta V/\Delta T$ ).

Точность показаний 1586A для эталонного датчика:

- Характеристика точности напряжения 1586A составляет 0,004 % + 4 мкВ (% от показаний,  $k=2$ ), примечание: добавьте дополнительно 2 мкВ для измеряемого проверяемого устройства на канал сканера DAQ-STAQ.

- Термопара типа S
- Температура 1000 °C
- Напряжение термопары типа S при 1000 °C составляет 9,6 мВ
- Указанная точность напряжения в этом диапазоне составляет ± 0,0022 мВ ( $k=1$ ), см. следующее уравнение:

$$U_{U(k=1)} = \frac{0,004 \times 100 + 0,004mV}{2} = \pm 0,0022 mV$$

- Термопара типа S имеет чувствительность ± 0,0115 мВ/°C при 1000 °C
- Точность показаний преобразуется в единицы температуры следующим образом:

$$U_{T(°C)} = \frac{\pm 0,0022 mV}{\pm 0,0115 mV/°C} = \pm 0,191 °C$$

**V2. Точность эталонного спая (для эталонного зонда)**

Эталонный спай может быть внешним или внутренним. В этом примере используется внешний эталонный спай. Неопределенность внешнего эталонного спая зависит от типа используемого

оборудования. В большинстве лабораторий используется источник температуры 0 °С, такой как вставка со льдом или сухой блок, например, сухоблочный калибратор нулевой точки Fluke 9101. Неопределенность, связанная со вставкой со льдом, может составлять всего несколько мК, но это сложный процесс, требующий большой аккуратности. Первичная лаборатория калибровки температуры Fluke использует упрощенный метод со вставкой с ледяной стружкой и водопроводной водой, но контроль температуры выполняется с помощью датчика термистора и показаний. Неопределенность данного метода основана на приемлемом диапазоне температуры вставки со льдом, который составляет 0 °С ± 0,025 °С. Чтобы получить вставку со льдом с низкой неопределенностью, см. документ ASTM E563-11 «Стандартная практика подготовки и использования вставки со льдом при температуре плавления как эталона температуры».

Следующее уравнение используется для вычисления эффективной неопределенности температуры эталонного спая. При измерении термопары оба спая участвуют в измерении. Таким образом, неопределенность эталонного спая умножается на коэффициент значений чувствительности термопары (Зеебек) при температуре эталонного спая и измерительного спая для расчета эффективной неопределенности эталонного спая.

$$U_{RJ\_Effective} = \frac{U_{RJ} \times S_{RJ}}{S_{MJ}}$$

- $U_{RJ\_Effective}$ : эффективная неопределенность температуры эталонного спая
- $U_{RJ}$ : неопределенность эталонного спая
- $S_{MJ}$ : чувствительность термопары при температуре измерительного спая
- $S_{RJ}$ : чувствительность термопары при температуре эталонного спая

Неопределенность температуры эталонного спая в этом примере:

- Термопара типа S
- Температура 1000 °С
- Точность эталонного спая 0,025 °С
- Чувствительность термопары ± 0,0115 мВ/°С при 1000 °С
- Чувствительность термопары ± 0,006 мВ/°С при 25 °С
- Неопределенность эквивалентной температуры 0,013 °С

$$U_{RJ\_Effective} = \frac{0,025 \text{ °С} \times 0,006 \text{ мВ/°С}}{0,0115 \text{ мВ/°С}} = 0,013 \text{ °С}$$

- Далее неопределенность преобразуется в стандартную неопределенность:

$$U_{B2 (k=1)} = \frac{0,013 \text{ °С}}{\sqrt{3}} = 0,007 \text{ °С}$$

#### **В4. Точность эталонного спая (для проверяемого устройства)**

В этом примере соответствующая неопределенность для внутреннего эталонного спая рассчитывается по следующей формуле.

$$U_{RJ\_Effective} = \frac{U_{RJ} \times S_{RJ}}{S_{MJ}}$$

- $U_{RJ\_Effective}$ : эффективная неопределенность температуры эталонного спая
- $U_{RJ}$ : неопределенность эталонного спая
- $S_{MJ}$ : чувствительность термопары при температуре измерительного спая
- $S_{RJ}$ : чувствительность термопары при температуре эталонного спая

Неопределенность температуры внутреннего эталонного спая в этом примере:

- Термопара типа S
- Температура 1000 °С
- Точность внутреннего эталонного спая 1586A 0,25 (k=2) или 0,13 (k=1) °С
- Чувствительность термопары ± 0,0115 мВ/°С при 1000 °С
- Чувствительность термопары ± 0,006 мВ/°С при 25 °С
- Неопределенность эквивалентной температуры вычисляется следующим образом:

$$U_{RJ\_Effective} = \frac{0,25 \text{ °С} \times 0,006 \text{ мВ/°С}}{0,0115 \text{ мВ/°С}} = 0,13 \text{ °С}$$

- Далее неопределенность преобразуется в стандартную неопределенность:

$$U_{B4 (k=1)} = \frac{0,13 \text{ °С}}{2} = 0,07 \text{ °С}$$

#### **В5. Неопределенность калибровки эталонного датчика**

Эта неопределенность передается непосредственно от сертификата калибровки эталонного зонда. Если неопределенность в определенной точке температуры не указана в сертификате, ее нужно будет вычислить. Проконсультируйтесь с поставщиком калибровки относительно проведения расчетов. Безопасным, но, как правило, завышенным приближением является выбор более высокой неопределенности двух переданных окружающих точек температуры.

Если эталонный датчик является термопарой, необходимо учитывать неоднородность. Если неопределенность калибровки не учитывает неоднородность, важно включить дополнительный компонент неопределенности для ее учета. Проконсультируйтесь с авторитетной калибровочной лабораторией или НМИ и получите более подробную информацию по этой теме.

## В6. Долговременный уход эталонного зонда

Долговременный уход эталонного датчика может быть трудно отследить. Производители могут указывать Долговременный уход с использованием значения на основе определенного количества часов использования при максимальной температуре. Это касается только старения материала и не охватывает другие источники износа, такие как погрузка, механические удары и термоциклирование. Целесообразно начать со спецификаций производителя по долговременному уходу, но важно следить за уходом датчика.

- Допустимый долговременный уход  $\pm 0,10$  °C (делится на квадратный корень из 3 для преобразования в  $\pm 0,06$  °C,  $k=1$ )

## В7 и В8. Осевая и радиальная однородность печи

Основной вклад печи в анализ неопределенности — это стабильность и однородность. Стабильность уже учтена в А1 и А2 как шум измерения, так как эта неопределенность описывает общий шум системы калибровки, включая стабильность печи. Однородность указана двумя компонентами: радиальным (отверстие к отверстию) и осевым (градиент на разных глубинах в уравнивающем блоке). Они определяются производителем и перечислены на рисунке 4. Вы можете положиться на эти цифры при расчете предварительного бюджета неопределенности, но практика подсказывает, что их следует проверять. В некоторых случаях неопределенность может быть снижена, поскольку прибор работает лучше, чем спецификации производителя. Для оценки значения однородности при 1000 °C возьмите значения для 700 °C и 1200 °C и интерполируйте линейно.

- Производитель указывает однородность при 1000 °C как: осевая  $\pm 0,20$  °C ( $k=2$ ) или  $\pm 0,10$  °C ( $k=1$ ) и радиальная 0,23 °C ( $k=2$ ) или  $\pm 0,12$  °C ( $k=1$ )

**Рис. 4: Спецификации производителя 9118А**

Радиальная однородность		
Температура	9118А (14 мм от геометрической центральной точки)	9118А-ИТВ от отверстия до отверстия
300 °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,1$ °C
700 °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,20$ °C
1200 °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 0,25$ °C

Осевая однородность		
Температура	9118А (30 мм осевой длины от геометрической центральной точки)	9118А-ИТВ (на 60 мм от полного погружения)
Полный диапазон	$\pm 0,25$ °C	$\pm 0,2$ °C

Стабильность температуры		
Характеристика	9118А	9118А-ИТВ
Устойчивость	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,1$ °C
Время стабилизации	2 часа, полный диапазон	3 часа при 700 °C или ниже, 2 часа выше 700 °C
<b>Примечание.</b> Стабильность температуры измеряется как 2-сигма в течение 30 минут		

## Совмещение неопределенностей

Для объединения всех компонентов неопределенности их следует сначала преобразовать в стандартные неопределенности. Для этого важно понять тип (распределение) каждой неопределенности, чтобы можно было правильно рассчитать преобразование. В этом анализе неопределенности существует два вида неопределенностей в таблице—нормальное распределение и прямоугольное распределение.

Нормальная неопределенность распределения — это неопределенность с большинством результатов в центре, так что распределение имеет форму колоколообразной кривой. Прямоугольное распределение имеет равную вероятность того, что результат будет находиться в любом месте внутри пределов, так что распределение имеет форму прямоугольника. Нередко пределы процесса, такие как допустимый долговременный уход, привязаны к прямоугольному распределению. Если неизвестно, каково распределение, можно с уверенностью предположить, что это прямоугольное распределение.

Для преобразования расширенного ( $k=2$  или  $k=3$ ) нормального распределения в стандартную неопределенность ( $k=1$ ) вы просто разделите его на значение  $k$ . Чтобы преобразовать прямоугольную неопределенность в стандартную форму, разделите ее на квадратный корень из 3. Для преобразования других типов распределений неопределенности обратитесь к «Руководству по неопределенности в измерениях» или какому-либо другому надежному источнику информации о расчете неопределенности.

Наконец, чтобы объединить стандартные неопределенности для расчета общей неопределенности, важно знать, является ли каждая неопределенность самостоятельной или соотнесенной. Независимая неопределенность не имеет ничего общего с другими неопределенностями. Все независимые неопределенности

могут быть объединены или складываются с помощью корня из суммы квадратов. Пример корня из суммы квадратов приведен ниже. Соотнесенная неопределенность имеет определенное отношение или коррелирует с одним или несколькими другими неопределенностями. Соотнесенные неопределенности часто могут быть сложены, а затем к сумме добавляется корень из суммы с другими неопределенностями. Иногда используются более сложные методы расчета корреляций, но это не требуется для данного анализа неопределенности.

В этом анализе неопределенности точности показаний 1586А коррелируют, так как используется один и тот же прибор для измерения эталонного датчика и проверяемого прибора. Поэтому они складываются простым образом, а затем складываются с другими с использованием корня из суммы. После расчета общей стандартной неопределенности она умножается на необходимый коэффициент охвата, в данном случае 2 для k=2 (95 %), чтобы прийти к общей расширенной неопределенности.

### Квадратный корень из суммы квадратов

$$U = \sqrt{B1^2 + B2^2 + B3^2 + B4^2 + B5^2 + B6^2...}$$

**Fluke Calibration.** Точность, эффективность, надежность.™

Электрика	PC	Температура	Давление	Расход	ПО
-----------	----	-------------	----------	--------	----

**Fluke Calibration**  
PO Box 9090, Everett, WA 98206 U.S.A.

**Fluke Europe B.V.**  
PO Box 1186, 5602 BD  
Eindhoven, The Netherlands

**ООО «Флюк СИИЭС»**  
125167, г. Москва, Ленинградский  
проспект дом 37, кор. 9  
Тел: +7 495 664 75 12  
Факс: +7 495 664 75 13  
e-mail: info@fluke.ru

**Для получения более подробной информации звоните:**

В США: тел. (877) 355-3225 или факс (425) 446-5116  
В Европе, в Африке, на Ближнем  
Востоке: тел. +31 (0) 40 2675 200 или факс +31 (0) 40 2675 222  
В Канаде тел. (800)-36-FLUKE или факс (905) 890-6866  
В других странах тел. +1 (425) 446-5500 или факс +1 (425) 446-5116  
Веб-сайт: <http://www.flukecal.com>

© Fluke Calibration, 2015. Технические характеристики могут меняться без предварительного уведомления. Отпечатано в США. 7/2015  
Pub-ID 13348-rus

**Внесение изменений в этот документ не допускается без письменного разрешения Fluke Corporation.**