

# Как калибровать термопару

## Указания по применению

### Серия заметок о применении термопар

Это четвертая 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 калибровать термопару

### Подготовка к калибровке термопары

#### Подключение к считывателю данных (термометру)

Подключение термопары к термометру зависит от того, используется ли внутренний или внешний эталонный спай. Внутренние эталонные спаи, как правило, используются для достижения высокой пропускной способности с низкой и средней точностью. Остается меньше возможностей для ошибки, и процесс выглядит проще. Ограничение точности связано с дополнительной неопределенностью в самой цепи компенсации эталонного спаия (обычно дополнительно от 0,05 °C до 0,25 °C).

#### Подключение внутреннего эталонного спаия

Подключите 2-проводную термопару непосредственно или через удлинительный провод к термометру, соблюдая полярность. Никогда не используйте медь для удлинительного провода, так как это может привести к погрешности. Убедитесь, что все соединения чистые и хорошо закреплены. Плохо закрепленные и (или) загрязненные соединения вызывают паразитные напряжения и ошибки при измерении. Использование реле и мультиплексоров также ведет к ошибкам, поскольку эти устройства, как правило, изготовлены из меди. Существуют реле, изготовленные из материалов термопар, которые могут использоваться, если требуется откалибровать большое количество термопар одного типа. Однако реле, изготовленные из материалов термопар, будут по-прежнему создавать ошибку, которую крайне трудно оценить. Если требуется откалибровать

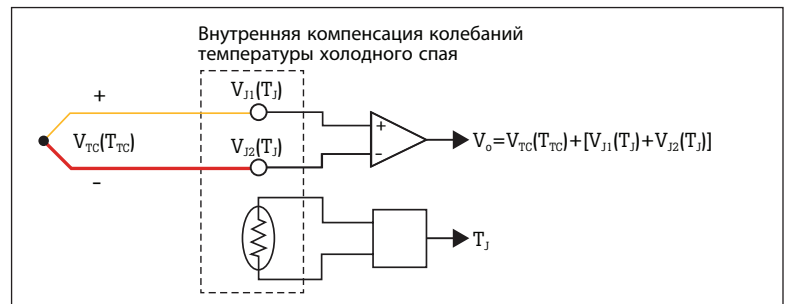


Рис. 1 Подключение внутреннего эталонного спаия.

большое количество термопар, рекомендуется применять многоканальные термометры или технику внешнего спая.

### Подключение внешнего эталонного спая

Внешний эталонный спай обладает высокой точностью и практически всегда используется для калибровки термопар из благородных металлов (тип R и S). Он, как правило, не является необходимым для соответствия требованиям к точности термопар из цветных металлов. Внешние эталонные спаи должны использоваться, когда требуется высокая точность или показания не оборудованы внутренней компенсацией холодного спая (например, обычный цифровой мультиметр). Подключение внешнего эталонного спая требует большого участия с одним проверяемым устройством и может стать довольно сложным, когда требуется откалибровать несколько устройств, сводя погрешность к минимуму.

Термопара подключена к показаниям высококачественными медными проводами. Соединения термопары с медью затем погружают в ледяную ванну, чтобы сформировать эталонный спай. Соединения должны быть электрически изолированы друг от друга и быть физически сухими. Как правило, провода приварены, припаяны или туго прикручены и защищены термоусадочными трубками. Группа проводов вставляется в концевую трубку с тонкими металлическими или стеклянными стенками, а трубка вставляется в ванну со льдом. Важную роль играет глубина погружения, которая зависит от диаметра проволоки. Обычно расстояния от шести до двенадцати дюймов достаточно. Медные соединительные провода присоединены к термометру либо непосредственно, либо через реле. Для каждого проверяемого устройства требуется отдельный эталонный спай.

Некоторые проверяемые устройства подключаются к разъемам термопары, и их нельзя легко отсоединить согласно описанию. В этих случаях «датчики эталонного спая» могут быть изготовлены из меди и провода термопары нужного типа. На конце термопары установлены разъемы, соответствующие разъемам на проверяемом устройстве. Эти датчики должны быть откалиброваны, если требуется высокая точность. В качестве альтернативы может использоваться компенсация внутреннего эталонного спая. Часто показания со встроенной компенсацией эталонного спая имеют встроенные разъемы термопары.

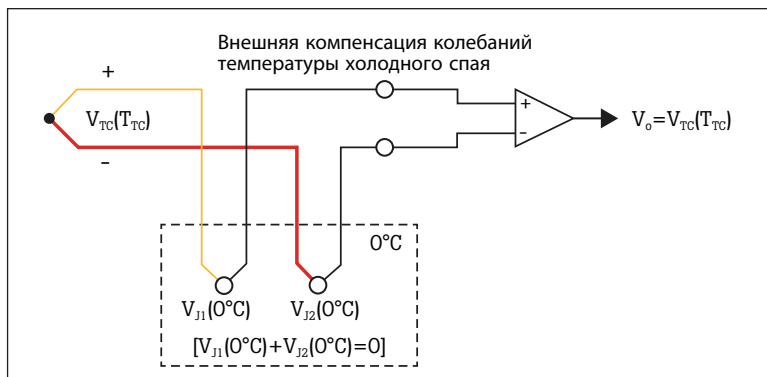


Рис. 2 Подключение внешнего эталонного спая.

### Размещение датчика

Все источники температуры имеют нестабильность и градиенты. Это ведет к ошибкам и (или) неточностям при калибровке. Датчики должны быть размещены настолько близко друг к другу, чтобы свести эти эффекты к минимуму. В сухоблочных источниках температуры используются фиксированные точки погружения датчика. Ванны и печи с открытой трубкой обеспечивают гибкость в размещении датчика. Калибруемые датчики должны быть размещены по кругу с эталонным датчиком в центре круга. При использовании трубчатой печи термопары связываются вокруг эталонного термометра, скрепляются стекловолокном или лентой и вставляются в печь. Такое расположение обеспечивает равное расстояние от опорного датчика до каждого из проверяемых устройств.

Чувствительные элементы также должны лежать в одной плоскости. Спаи термопары, как правило, расположены на кончике датчика. Нужно обеспечить достаточное погружение, чтобы не происходило потерь на ножке. Как правило, погружение является достаточным, когда зонды погружают на глубину, равную 15 диаметрам датчика плюс длина чувствительного элемента. Например, датчик диаметром 0,25 дюйма с чувствительным элементом длиной 1,25 дюйма потребуется погрузить как минимум на 5 дюймов  $((15 \times 0,25 \text{ д.}) + 1,25 \text{ д.} = 5 \text{ д.})$ . Обычно это правило верно для датчиков с тонкой стенкой в ситуациях с хорошей теплопередачей. Большее погружение требуется, если датчик имеет толстые стенки и (или) существует недостаточная теплопередача (например, сухой блок с отверстиями неправильного размера).

## Сбор данных

Отраслевые стандарты и руководящие принципы требуют, чтобы термопары были откалиброваны по всему диапазону температур, в котором они используются. Калибровка может занять значительное время, особенно если нужно откалибровать несколько термопар. Процесс включает в себя повышение температуры источника до температуры уставки и регистрацию показаний термопары, когда температура уставки стабилизируется. Следует уделить достаточное время каждой уставке, чтобы источник температуры достиг устойчивости и однородности перед регистрацией. Затем процесс повторяется последовательно для каждой уставки, охватывая диапазон рабочей температуры термопары.

## Автоматизация калибровки термопары с помощью Super-DAQ 1586A

Super-DAQ 1586A включает функцию «автоматической калибровки датчика», которая позволяет автоматизировать процесс калибровки термопары. Когда Super-DAQ 1586A подключен к печи калибровки термопары 9118A, Super-DAQ контролирует температуру уставки 9118A, показания до 40 термопар и автоматически собирает данные, когда печь стабилизируется в пределах заданных пользователем параметров. Затем Super-DAQ переводит 9118A к остальным запрограммированным уставкам температуры, попутно собирая данные по каждой уставке. После того как тест был настроен и запущен, специалист может заняться другими работами. Эта уникальная особенность, которую предлагает только Fluke Calibration, значительно повышает производительность лаборатории и точность измерения.

Подробную информацию вы можете найти в центре ресурсов 1586A на странице [www.flukecal.com](http://www.flukecal.com).

## Два варианта калибровки

Существует два типа калибровки термопары — аттестация и испытание допуска. Большинство термопар недостаточно устойчивы для аттестации калибровки. Как правило, проводится испытание допуска датчиков термопар и (или) проводов в соответствии с

коэффициентом погрешности Американского общества по испытанию материалов (ASTM). Испытание допуска включает измерение выходного напряжения при различных температурах и вычисление погрешности по стандартным таблицам.

### Испытание допуска

Для большинства задач выполняется испытание допуска термопары, чтобы убедиться, что она ведет себя так, как предписывает стандартная модель в определенных пределах. ASTM предлагает два набора пределов, называемых «стандартные пределы погрешности» и «специальные пределы погрешности». Специальные пределы погрешности используют более жесткие допуски и были разработаны, чтобы покрыть повышенную производительность проводов более высокого класса, используемых в более дорогих термопарах. Для калибровки термопары по спецификациям ASTM следует установить, соответствует ли она стандартной модели. В некоторых случаях отдельные датчики термопар могут быть откалиброваны. В других случаях всему рулону провода может потребоваться сертификация. Метод является простым, без подгонки данных или сложных расчетов.

### Этапы испытания допуска

1. Значения напряжения и температуры проверяемых термопар сравниваются с теми же измерениями, полученными от эталонной стандартной термопары. Значения напряжения могут считываться непосредственно с цифрового вольтметра с достаточной точностью или другого термометра, пригодного для этой цели.
2. Отмечается разница в «°C» между каждой проверяемой термопарой и температурой стандартной эталонной термопары. Это преобразование выполняется с помощью таблицы сопоставления напряжений и соответствующих значений температуры (в °C) для типа термопары. Используемые таблицы должны содержать те же данные и значения, которые содержатся в монографии NIST 175 (1993) или ASTM E230-03 (2011).
3. Допуски термопар, такие как показанные в приложении А, «Суммарная таблица допусков термопар», используются для того, чтобы определить, соответствует ли проверяемая термопара «стандартным или специальным предельным допускам» по отношению к измерениям, полученным с эталонной термопары.

### Аттестация термопар

Когда испытание на допуск не предоставляет достаточно информации о реакции напряжения термопары на температурное воздействие, более полный анализ по всему диапазону можно получить с помощью аттестации производительности термопары. Аттестация термопары, как правило, проводится для задач высокой точности и на термопарах из благородных металлов. В большинстве случаев термопары из основных металлов не являются устойчивыми и не воспроизводят поведение, наблюдаемое в ходе аттестации.

Аттестация термопары включает определение разницы между измеренным и стандартным напряжением, а затем коррекцию этой разницы путем применения к нему полинома второго порядка. Подгонка данных выполняется просто в теории, но может быть сложной задачей на практике. По сути, процесс состоит в одновременном решении множества уравнений, которые содержат данные калибровки, чтобы получить набор коэффициентов, уникальных для термопары и калибровки. Приемлемая «аттестация» основывается на принципах, описанных в специальной публикации NIST 250-35, используемой подобным образом на Fluke Calibration для повторной сертификации термопар типа S и R<sup>(1)</sup>.

### Этапы аттестации

1. Термопары размещаются последовательно в четырех ячейках с реперной точкой. Сводная информация о ячейке с реперной точкой показана на рис. 3. Напряжения проверяемых термопар измеряются по отношению к заданной температуре четырех ячеек с реперной точкой. Пока измерительный спай термопары находится в ячейке с реперной точкой, эталонный спай термопары помещается в ванну при температуре замерзания воды, контролируемой независимым стандартным термистором. Примечание. Печь и термопара эталонного стандарта могут использоваться

вместо ячеек с реперной точкой, чтобы обеспечить нужную температуру среды.

В этом случае печь установлена на различные заданные температуры, так что расположенные по кругу проверяемые термопары можно сравнить с показаниями эталонной стандартной термопары, расположенной в центре печи.

2. После достижения температурного равновесия между проверяемой термопарой и ячейкой с реперной точкой напряжение термопары регистрируется. Это повторяется для всех четырех температур ячеек с реперной точкой. Каждое значение напряжения термопары также включает соответствующую запись температуры точки замерзания в изолированном контейнере, где находится эталонный спай термопары.
3. Уникальные измерения напряжения, полученные для проверяемой термопары в каждой реперной точке, предоставляют все необходимые компоненты, чтобы составить «функцию отклонения». Эта функция добавляется к стандартной «эталонной функции» для типа термопары. Конечным результатом является «аттестация термопары» для проверяемой термопары.

Чтобы составить «функцию отклонения», выполняется несколько операций линейной алгебры для нахождения «решения по методу наименьших квадратов» по сверхопределенной системе, которую составляют «температуры реперной точки и их квадраты величины» и «различия напряжения между измеренными значениями по проверяемой термопаре при температурах в реперной точке» и соответствующие значения напряжения «эталонной функции» при тех же температурах в реперной точке. Решение по методу наименьших квадратов обеспечивает два коэффициента, которые суммируются с соответствующими условиями в «эталонной функции», чтобы произвести функцию «аттестации термопары». Сводка операций линейной алгебры приведена в приложении В.

Элемент или соединение в точке замерзания	Химический знак	Температура в точке замерзания ITS-90 (°C)
Серебро	Ag	961,78
Алюминий	Al	660,323
Цинк	Zn	419,527
Олово	Sn	231,928
Вода	H <sub>2</sub> O	0,010

<sup>(2)</sup>Монография NIST 175, (1993), стр.4.

Рис. 3 Сводка по ячейке реперной точки.

**Приложение А – Сводная таблица допусков термопары<sup>(3, 4)</sup>**

<b>ТИП В</b>				
<b>Pt - 30 % Rh отн. Pt - 6 % Rh</b>			Цвет класса удлинителя = серый	
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа В</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
1250,00 °C	10,622 мкВ/°C	7,311 мВ	6,25	3,13
1000,00 °C	9,123 мкВ/°C	4,834 мВ	5,00	2,50

Диапазон: от 870 °C до 1700 °C; допуски: Стандартный режим: ± 0,5 % от показаний; специальный: ± 0,25 % от показаний.

<b>ТИП Е</b>				
<b>Ni - Cr по сравнению с константаном</b>			Цвет класса удлинителя = пурпурный	
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа Е</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
870,00 °C	77,393 мкВ/°C	66,473 мВ	4,35	3,48
500,00 °C	80,930 мкВ/°C	37,005 мВ	2,50	2,00
250,00 °C	76,240 мкВ/°C	17,181 мВ	1,70	1,00

Диапазон: от -200 °C до 870 °C; допуски: Стандартный режим: ± 1,7 °C или ± 0,5 % от показаний (от 0 до 870 °C), большая из величин. Специальный: ± 1,0 °C или ± 0,4 % от показаний (от 0 до 870 °C), большая из величин.

<b>ТИП J</b>				
<b>Железо по сравнению с константаном</b>			Цвет класса удлинителя = черный	
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа J</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
760,00 °C	63,699 мкВ/°C	42,281 мВ	5,63	3,00
500,00 °C	55,987 мкВ/°C	27,393 мВ	3,75	2,00
250,00 °C	55,512 мкВ/°C	13,555 мВ	2,20	1,10

Диапазон: от 0 до 760 °C; допуски: Стандартный режим: ± 2,2 °C или ± 0,75 % от показаний, большая из величин. Специальный: ± 1,1 °C или ± 0,40 % от показаний, большая из величин.

<b>ТИП К</b>				
<b>Ni - 10 % Cr по сравнению с Ni - 5 % (оксид алюминия - кремний)</b>			Цвет класса удлинителя = желтый	
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа К</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
1260,00 °C	35,566 мкВ/°C	51,000 мВ	9,45	5,04
900,00 °C	40,005 мкВ/°C	37,326 мВ	6,75	3,60
600,00 °C	42,505 мкВ/°C	24,905 мВ	4,50	2,40
300,00 °C	41,446 мкВ/°C	12,209 мВ	2,25	1,20

Диапазон: от -200 °C до 1260 °C; допуски: Стандартный режим: ± 2,2 °C или ± 0,75 % от показаний (от 0 до 1260 °C), большая из величин. Специальный: ± 1,1 °C или ± 0,40 % от показаний (от 0 до 1260 °C), большая из величин.

<b>ТИП N</b>		<b>Ni - 14 % Cr - 1,5 % Si отн. Ni - 4,5 % Si - 0,1 % Mg</b>		
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа N</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Цвет класса удлинителя = оранжевый</b>	
			<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
1260,00 °C	36,580 мкВ/°C	46,060 мВ	9,45	5,04
900,000 °C	39,040 мкВ/°C	32,371 мВ	6,75	3,60
600,000 °C	38,959 мкВ/°C	20,613 мВ	4,50	2,40
300,000 °C	35,422 мкВ/°C	9,341 мВ	2,25	1,20

Диапазон: от 0 до 1260 °C; допуски: Стандартный режим: ± 2,2 °C или ± 0,75 % от показаний, большая из величин.  
Специальный: ± 1,1 °C или ± 0,40 % от показаний, большая из величин.

<b>ТИП R</b>		<b>Pt по сравнению с Pt - 13 % Rh</b>		
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа R</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Цвет класса удлинителя = зеленый</b>	
			<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
1084,62 °C	13,575 мкВ/°C	11,640 мВ	2,71	1,09
961,78 °C	13,065 мкВ/°C	10,003 мВ	2,40	0,96
660,32 °C	11,641 мкВ/°C	6,277 мВ	1,65	0,66
419,53 °C	10,480 мкВ/°C	3,611 мВ	1,50	0,60
231,93 °C	9,168 мкВ/°C	1,756 мВ	1,50	0,60

Диапазон: от 0 до 1480 °C; допуски: Стандартный режим: ± 1,5 °C или ± 0,25 % от показаний, большая из величин.  
Специальный: ± 0,6 °C или ± 0,10 % от показаний, большая из величин.

<b>ТИП S</b>		<b>Pt по сравнению с Pt - 10 % Rh</b>		
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа S</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Цвет класса удлинителя = зеленый</b>	
			<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
1084,62 °C	11,798 мкВ/°C	10,575 мВ	2,71	1,09
961,78 °C	11,418 мкВ/°C	9,148 мВ	2,40	0,96
660,32 °C	10,398 мкВ/°C	5,860 мВ	1,65	0,66
419,53 °C	9,638 мкВ/°C	3,447 мВ	1,50	0,60
231,93 °C	8,711 мкВ/°C	1,715 мВ	1,50	0,60

Диапазон: от 0 до 1480 °C; допуски: Стандартный режим: ± 1,5 °C или ± 0,25 % от показаний, большая из величин.  
Специальный: ± 0,6 °C или ± 0,10 % от показаний, большая из величин.

<b>ТИП T</b>		<b>Cu (медь) по сравнению с константаном</b>		
<b>Испытательные температуры</b>	<b>Чувствительность типа T</b>	<b>Номинальное ЭМП</b>	<b>Цвет класса удлинителя = синий</b>	
			<b>Стандартные пределы допуска (± °C)</b>	<b>Специальные пределы допуска (± °C)</b>
370,00 °C	60,928 мкВ/°C	19,030 мВ	2,78	1,48
200,00 °C	53,150 мкВ/°C	9,288 мВ	1,50	0,80
100,00 °C	46,785 мкВ/°C	4,279 мВ	1,00	0,50

Диапазон: от -200 °C до 370 °C; допуски: Стандартный режим: ± 1,0 °C или ± 0,5 % от показаний (от 0 до 370 °C), большая из величин.  
Специальный: ± 1,0 °C или ± 0,4 % от показаний (от 0 до 370 °C), большая из величин.

## Приложение В – Операции линейной алгебры для аттестации термопары

1. Температуры реперной точки и соответствующие квадраты температуры отмечены в «матрице 5 x 2» под названием «А». В конце данного приложения приведена подробная информация о матрицах и их элементах, описанных в следующих этапах.
2. Небольшая матрица «2 x 1», размещенная как коэффициент справа от матрицы «А», используется, чтобы указать вектор решения. Матрица называется «Х».
3. Произведение двух предыдущих матриц, «А» и «Х», устанавливается равным конечной матрице, составленной из разностей измеренных значений ЭМП и значений ЭМП «эталонной функции» при температурах в реперной точке. Это — «матрица 5 x 1» под названием «b».
4. Эта система уравнений имеет следующий вид:  $[A] [X] = [b]$  <sup>(5)</sup>.
5. При использовании транспонирования и обратных единичных матриц решение наименьших квадратов «x\*» для уравнения в этапе 4 имеет следующий вид:  $[x^*] = (([A^T] [A])^{-1}) [A^T] [b]$  <sup>(5)</sup>.  
Уравнения матрицы в этапах 4 и 5 были адаптированы исходя из информации в справочнике (5), стр. 50–54.
6. Матрица решения  $[x^*]$  — это «матрица 2 x 1», которая содержит два ненулевых коэффициента для квадратной (наиболее подходящей) кривой, «dc<sub>1</sub>» и «dc<sub>2</sub>».
7. «Эталонная функция» для термопары типа S может быть раскрыта следующим образом:  

$$EMP_{ref} = c_0 + (c_1) \cdot t_{90} + (c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$$
 (где ЭМП дано в мкВ пост. тока и t<sub>90</sub> дана в °C).
8. «Функция отклонения» или квадратичная наиболее подходящая кривая — это ЭМП<sub>dev</sub> = 0 + (dc<sub>1</sub>)·t<sub>90</sub> + (dc<sub>2</sub>)·t<sub>90</sub><sup>2</sup>
9. Наконец, если «функция отклонения» в этапе 8 прибавляется к «эталонной функции» для типа S в шаге 7, полученное уравнение суперпозиции является уникальной «аттестацией термопары» для конкретной проверяемой термопары типа S.  

$$EMF_{char} = c_0 + (dc_1 + c_1) \cdot t_{90} + (dc_2 + c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8$$
 <sup>(6)</sup>

### Матрицы аттестации, элементы и решение наименьших квадратов [x\*] (температуры в °C и ЭМП в мВ пост. тока)

Система матриц уравнений:

$$[A] [X] = [b]$$

Элементы матрицы:  $[A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix}$        $[X] = \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix}$        $[b] = \begin{bmatrix} mv_{meas(0)} - mv_{ref(0)} \\ mv_{meas(Sn)} - mv_{ref(Sn)} \\ mv_{meas(Zn)} - mv_{ref(Zn)} \\ mv_{meas(Al)} - mv_{ref(Al)} \\ mv_{meas(Ag)} - mv_{ref(Ag)} \end{bmatrix}$

Матрицы решения по методу наименьших квадратов:  $[x^*] = ([A^T] [A])^{-1} [A^T] [b]$  ( где  $[x^*] \approx \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix}$

и  $[x^*]$  приблизительно  $[X]$  )

Элементы матрицы:  $[A^T] [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \end{bmatrix}$

$$([A^T] [A])^{-1} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{[(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2) \cdot (\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4)] - [(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3) \cdot (\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3)]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix}$$

Решение по методу наименьших квадратов:  $[X^*]$

$$[X^*] = \frac{1}{\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \cdot (\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2) - [(\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2) \cdot (\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2)]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mv_{meas (0)} - mv_{ref (0)} \\ mv_{meas (Sn)} - mv_{ref (Sn)} \\ mv_{meas (Zn)} - mv_{ref (Zn)} \\ mv_{meas (Al)} - mv_{ref (Al)} \\ mv_{meas (Ag)} - mv_{ref (Ag)} \end{bmatrix}$$

### Справочная документация

- 1) NIST Special Publication 250-35, "The Calibration of Thermocouples and Thermocouple Materials", G.W. Burns and M.G. Scroger, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1989.
- 2) NIST Monograph 175, "Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90", G.W. Burns, et al, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1993.
- 3) ASTM E230-03, "Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples", ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 2003.
- 4) Omega Engineering Technical Reference, Section Z. <http://www.omega.com/temperature/Z/zsection.asp> (used for TC color codes)
- 5) Geometric Transformations and Image Warping, University of Utah, SCI (School of Computer Imaging) Institute, School of Computing, an MS-PowerPoint Presentation by Ross Whitaker, as modified by Guido Gerig, Class CS6640, Fall, 2012, pp. 50-54.
- 6) Thermocouple Report of Calibration for Type S, latest version, Fluke Calibration, American Fork, UT, p. 2 of 14.

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

Электрика	РЧ	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 СИАЙЭС»**  
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 13350-rus Rev 01

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