

Keysight Technologies

Практические советы по измерению температуры

Рекомендации
по применению



Содержание

Введение	2
Термопара	4
Выполнение измерений с помощью термопар	12
Резистивный датчик температуры	21
Термистор	26
Интегральный датчик	27
Измерительная система	28
Приложение А	31
Приложение Б	32
Конструкция термопар	34
Список литературы	35

Введение

Задача этого документа – дать представление об общепринятых методах измерения температуры и способах повышения их точности. Основное внимание мы уделим четырем наиболее распространенным датчикам температуры: термопаре, резистивному датчику температуры, термистору и датчику на основе интегральной схемы (ИС). Несмотря на широкую популярность термопары, ее часто используют неправильно. По этой причине мы особое внимание уделим прежде всего методам измерений с помощью термопар.

В Приложении А приведены эмпирические законы для термопар, являющиеся основой всех положений, содержащихся в настоящем издании. Читателям, заинтересованным в более глубоком изучении теории термопар, рекомендуем изучить документ 3 из списка литературы.

Приложение Б поможет правильно выбрать тип термопары для конкретной задачи.

Мы будем постоянно приводить практические рекомендации о размещении преобразователя температуры, обработке сигнала и используемом инструментарии.

Как мерили температуру раньше

Считается, что термометр изобрел Галилей в 1592 г.^{1, 2} В открытый контейнер, заполненный подкрашенным спиртом, он подвесил длинную узкую трубку с полый сферой на верхнем конце. При нагревании воздух в сфере расширялся и выходил через жидкость в виде пузырьков. Охлаждение вызывало подъем жидкости в трубке.¹ Колебания температуры сферы можно было наблюдать по изменению уровня жидкости в трубке. Такая индикация по принципу «вверх-вниз» была неточной, поскольку уровень менялся также в зависимости от атмосферного давления, а трубка не имела шкалы. Значительное повышение точности измерений температуры связано с разработкой флорентийского термометра, который стал герметичным и получил шкалу.

В последующие годы появилось множество температурных шкал, основанных на двух и более реперных точках. Однако ни одна из них не стала общепризнанной, пока в начале XVIII века инженер и стеклодув Габриэль Фаренгейт не начал выпускать в Голландии точные ртутные термометры с воспроизводимыми результатами измерений. В качестве низшей реперной точки своей шкалы он использовал температуру, при которой замерзает смесь воды, льда и соли (или хлористого аммония). Эта была самая низкая температура, которую он мог воспроизвести. Фаренгейт принял ее за 0 градусов. В качестве высшей реперной точки своей шкалы он использовал нормальную температуру человеческого тела, которую он принял за 96 градусов.

Почему 96, а не 100? Дело в том, что первые термометры, подобно часам, имели шкалу из 12 делений. Стремясь повысить разрешение, Фаренгейт разделил свою шкалу сначала на 24, затем на 48, а потом и на 96 частей.

Шкала Фаренгейта стала популярной в основном из-за качества выпускаемых им термометров и воспроизводимости результатов сделанных с их помощью измерений.

Примерно в 1742 г. Андерс Цельсий предложил шкалу, в которой в качестве реперных точек использовались температуры таяния льда и закипания воды. За 0 градусов он принял температуру закипания, а за 100 градусов – температуру таяния льда. Позднее реперные точки поменяли местами и появилась всем известная стоградусная шкала. В 1948 г. ей официально присвоили имя Цельсия.

В начале XIX века Уильям Томсон (лорд Кельвин) разработал универсальную термодинамическую шкалу, основанную на коэффициенте расширения идеального газа. Кельвин ввел понятие абсолютного нуля, и его шкала остается стандартом для современной термометрии.

Формулы преобразования для четырех современных температурных шкал следующие:

$$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32) \quad ^{\circ}\text{F} = 9/5^{\circ}\text{C} + 32$$

$$\text{k} = ^{\circ}\text{C} + 273,15 \quad ^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,67$$

Шкала Ранкина ($^{\circ}\text{R}$) – это просто эквивалент шкалы Кельвина, но с делениями, равными градусу Фаренгейта. Она названа в честь одного из основоположников термодинамики Уильяма Джона Макуорна Ранкина. Обратите внимание на то, что значения по шкале Кельвина обозначаются без символа градуса. Эта единица измерения называется просто «Кельвин» без добавления слова «градус».

Реперные температуры

Мы не можем построить делитель температуры, подобный делителю напряжения. Мы также не можем складывать «отрезки» температуры, как складываем эталонные значения длины, измеряя расстояния. Мы можем опираться только на значения температуры, связанные с физическими явлениями, которые легко наблюдаются и имеют устойчивую природу.

Международная температурная шкала (МТШ) основана на подобных явлениях. Шкала, в последний раз пересмотренная в 1990 г., устанавливает семнадцать реперных точек и соответствующие температуры. Некоторые из этих реперных точек приведены в таблице 1.

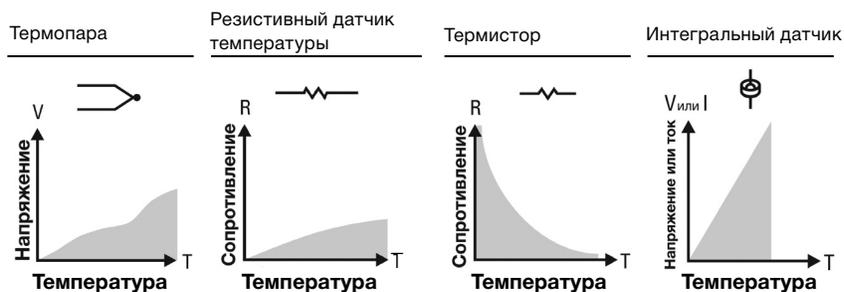


Рисунок 1. Четыре наиболее распространенных типа датчиков температуры

Преимущества

- Не требует внешнего питания	- Самый стабильный	- Высокий уровень выходного сигнала	- Наилучшая линейность
- Простой	- Самый точный	- Быстродействующий	- Самый высокий уровень выходного сигнала
- Надежный	- Линейность лучше, чем у термопары	- Измерение сопротивления по 2-проводной схеме	- Недорогой
- Недорогой			
- Разнообразие форм-факторов			
- Широкий диапазон температур			

Недостатки

- Низкая линейность	- Дорогой	- Низкая линейность	- $T < +250^{\circ}\text{C}$
- Низкий уровень выходного сигнала	- Медленный	- Ограниченный диапазон температур	- Требуется источник питания
- Требуется опорный сигнал	- Требуется источник тока	- Хрупкий	- Медленный
- Самый нестабильный	- Небольшое изменение сопротивления	- Требуется источник тока	- Самонагрев
- Наихудшая чувствительность	- Измерение сопротивления по 4-проводной схеме	- Самонагрев	- Ограниченные конфигурации

Таблица 1. Реперные точки МТШ-90

Вещество	Тип	Температура К	$^{\circ}\text{C}$	
(H2)	Водород	Тройная точка	13,8033 K	-259,3467 $^{\circ}\text{C}$
(Ne)	Неон	Тройная точка	24,5561 K	-248,5939 $^{\circ}\text{C}$
(O2)	Кислород	Тройная точка	54,3584 K	-218,7916 $^{\circ}\text{C}$
(Ar)	Аргон	Тройная точка	83,8058 K	-189,3442 $^{\circ}\text{C}$
(Hg)	Ртуть	Тройная точка	234,315 K	-38,8344 $^{\circ}\text{C}$
(H2O)	Вода	Тройная точка	273,16 K	+0,01 $^{\circ}\text{C}$
(Ga)	Галлий	Точка плавления	302,9146 K	+29,7646 $^{\circ}\text{C}$
(In)	Индий	Точка затвердевания	429,7485 K	+156,5985 $^{\circ}\text{C}$
(Sn)	Олово	Точка затвердевания	505,078 K	+231,928 $^{\circ}\text{C}$
(Zn)	Цинк	Точка затвердевания	692,677 K	+419,527 $^{\circ}\text{C}$
(Al)	Алюминий	Точка затвердевания	933,473 K	+660,323 $^{\circ}\text{C}$
(Ag)	Серебро	Точка затвердевания	1234,93 K	+961,78 $^{\circ}\text{C}$
(Au)	Золото	Точка затвердевания	1337,33 K	+1064,18 $^{\circ}\text{C}$

Поскольку мы располагаем только этими фиксированными реперными значениями, то наш прибор должен интерполировать результаты измерений между ними. Но для точной интерполяции между этими температурами могут потребоваться преобразователи, которые будут слишком сложными или дорогими для практического использования. Ограничим предметы нашего обсуждения четырьмя наиболее распространенными термопреобразователями: термопарами, резистивными датчиками температуры, термисторами и датчиками на основе интегральной схемы (интегральными).

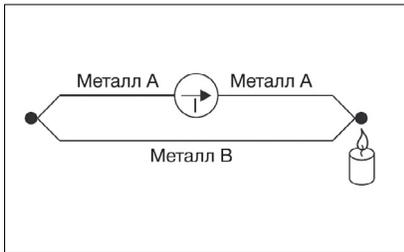


Рисунок 2. Эффект Зеебека



Рисунок 3. Напряжение Зеебека пропорционально изменению температуры

Термопара

Если два разнородных проводника спаить в замкнутую цепь и нагреть одно из двух мест соединения (в дальнейшем место соединения в термоэлектрической цепи мы будем называть спаем), то в этой замкнутой цепи начнет протекать постоянный ток. Это явление открыл Томас Зеебек в 1821 г. (рис. 2).

Если разорвать второй спай, то в месте разрыва появится напряжение Зеебека, зависящее от температуры первого спаия и материалов двух проводников (рис. 3).

Этот эффект демонстрируют все разнородные металлы. Наиболее распространенные комбинации двух металлов и их важнейшие характеристики перечислены на с. 32 этого документа. При небольших изменениях температуры напряжение Зеебека линейно пропорционально значению температуры: $e_{AB} = \alpha T$

В этой формуле α – это постоянный коэффициент Зеебека. (У реальных термопар коэффициент α изменяется вместе с температурой. Этот фактор будет обсуждаться в разделе «Преобразование температуры в напряжение» на с. 9.)

Измерение напряжения термопары

Мы не можем измерить напряжение Зеебека непосредственно, поскольку сначала мы должны включить в разрыв цепи термопары вольтметр, провода которого сами по себе создают новую термоэлектрическую цепь.

Подключим вольтметр к выводам термопары медь-константан (тип T) и рассмотрим выходное напряжение (рис. 4).

Нам бы хотелось, чтобы вольтметр измерял только напряжение V_1 , но подключая вольтметр для измерения напряжения на выходе спаия J_1 мы создаем еще два спаия, J_2 и J_3 . Поскольку J_3 является спаем медь-медь, то он не создает термоЭДС ($V_3 = 0$), но J_2 является спаем медь-константан и создает дополнительную ЭДС (V_2), противоположную V_1 . В результате показание вольтметра V будет пропорционально разности температур между J_1 и J_2 . Это означает, что мы не можем найти температуру спаия J_1 , пока не найдем сначала температуру спаия J_2 .

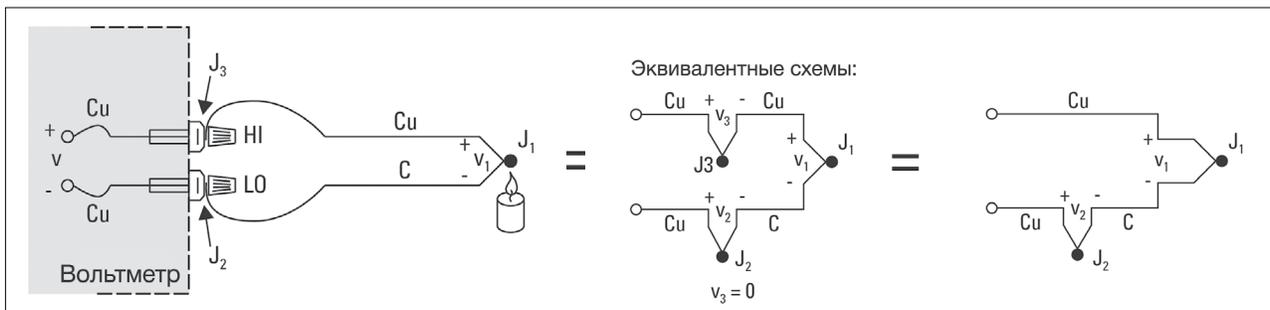


Рисунок 4. Измерение напряжения спаия цифровым вольтметром

Холодный спай

Один из способов измерения температуры J_2 заключается в том, что один спай помещают в водяную баню со льдом, в которой поддерживается температура 0°C , чтобы сделать J_2 холодным (опорным) спаем. Поскольку оба спая вольтметра теперь типа медь-медь, они не создают термоЭДС, и показание вольтметра V будет пропорционально разности температур между J_1 и J_2 .

Теперь показание вольтметра будет следующим (см. рис. 5):

$$V = (V_1 - V_2) \cong \alpha(t_{J1} - t_{J2})$$

Если мы укажем, что T_{J1} измеряется в градусах Цельсия

$$T_{J1}(^\circ\text{C}) + 273,15 = t_{J1}(\text{K}),$$

то V станет равным:

$$\begin{aligned} V = V_1 - V_2 &= \alpha[(T_{J1} + 273,15) - (T_{J2} + 273,150)] \\ &= \alpha(T_{J1} - T_{J2}) = \alpha(T_{J1} - 0) \end{aligned}$$

$$V = \alpha T_{J1}$$

Мы использовали эту цепочку формул, чтобы показать, что напряжение на спае в водяной бане со льдом V_2 не равно нулю, а является функцией абсолютной температуры.

Прибавив напряжение на спае в водяной бане со льдом, мы теперь привели показание V к 0°C . Этот метод очень точен, поскольку температура таяния льда поддерживается с высокой точностью. Температура таяния льда используется Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST) как основная реперная точка для его таблиц характеристик термопар. Вы можете заглянуть в таблицы NIST и непосредственно преобразовать напряжение V в температуру T_{J1} .

Показанный на рис. 5 пример является уникальным, поскольку медный провод термопары изготовлен из того же материала, что и зажимы вольтметра. Давайте возьмем термопару железо-константан (тип J) вместо термопары медь-константан. Железный провод (рис. 6) увеличивает количество спаев разнородных металлов в цепи, поскольку оба зажима вольтметра становятся термопарными спаями Cu-Fe.

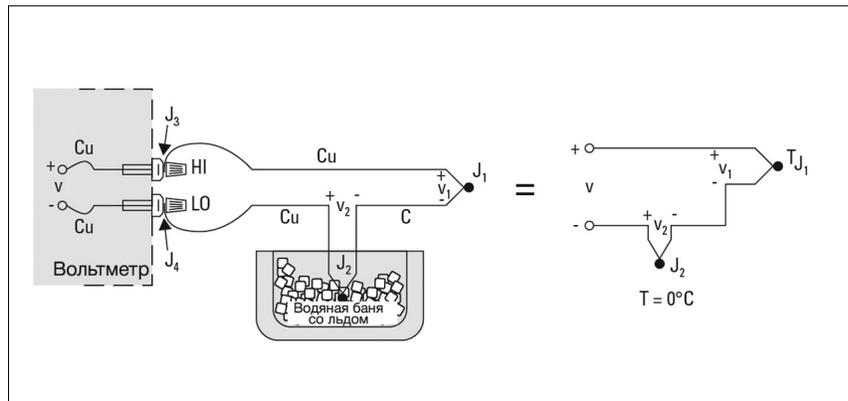


Рисунок 5. Внешний холодный спай

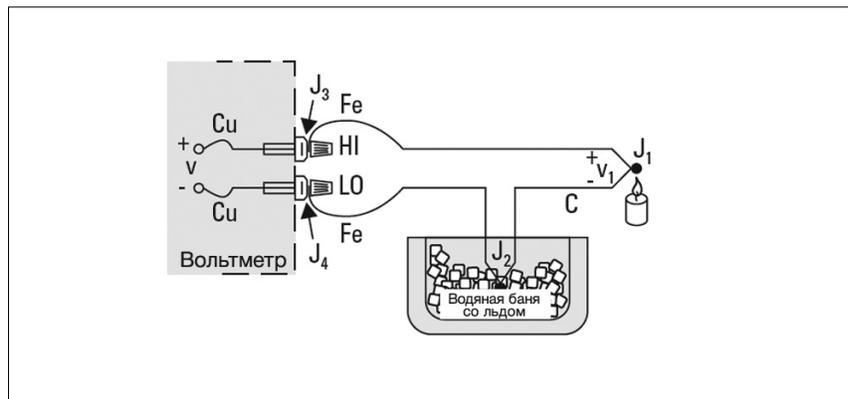


Рисунок 6. Термопара железо-константан

Эта схема будет обеспечивать умеренно точные измерения, пока положительный и отрицательный зажимы вольтметра (J_3 и J_4) представляют собой термопары, создающие противоположные термоЭДС (рис. 7).

Если зажимы на передней панели вольтметра имеют разную температуру, то возникает ошибка. Для более точного измерения медные подводящие провода вольтметра следует соединить с проводами термопары через изотермический (равнотемпературный) клеммный блок (рис. 8).

Изотермический клеммный блок является электрическим изолятором с хорошей теплопроводностью, благодаря которой поддерживается одинаковая температура J_3 и J_4 . Абсолютная температура клеммного блока неважна, поскольку два контакта Cu-Fe представляют собой термопары, создающие противоположно направленные термоЭДС. Мы продолжаем иметь:

$$V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$$

Опорная цепь

Показанная на рис. 8 цепь обеспечивает точные результаты, но было бы лучше отказаться от водяной бани со льдом.

Давайте заменим ее другим изотермическим клеммным блоком (рис. 9а и 9б).

Новый блок имеет опорную температуру T_{REF} , а поскольку контакты J_3 и J_4 продолжают иметь одинаковую температуру, то мы снова получаем:

$$V = \alpha(T_1 - T_{REF})$$

Эта схема всё ещё неудобна, поскольку нам нужно соединить две термопары. Давайте попробуем исключить железный провод, подведенный к отрицательному (LO) зажиму, объединив контакт Cu-Fe (J_4) с контактом Fe-Cu (J_{REF}).

Мы можем сделать это, соединив два изотермических клеммных блока (рис. 9б).

Мы не изменили выходное напряжение V . Оно остается равным:

$$V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$$

Теперь применим закон промежуточных металлов (см. Приложение А), чтобы устранить лишний контакт. Эмпирический закон гласит, что третий металл (в данном случае, железо),

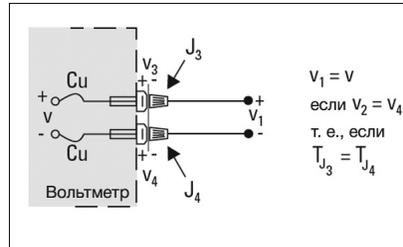


Рисунок 7. Взаимная компенсация напряжений контактов

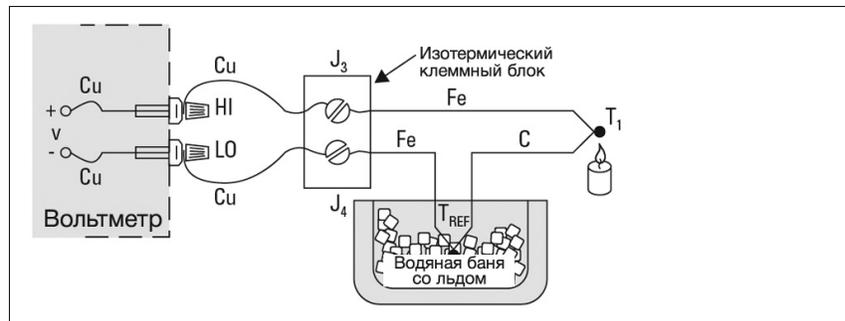


Рисунок 8. Подключение цифрового вольтметра через изотермический клеммный блок

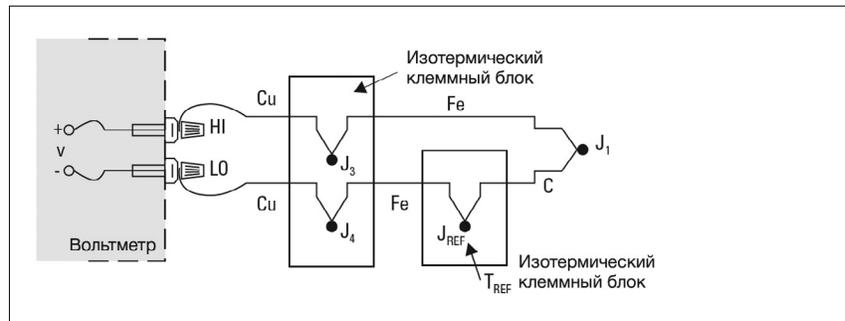


Рисунок 9а. Исключение водяной бани со льдом

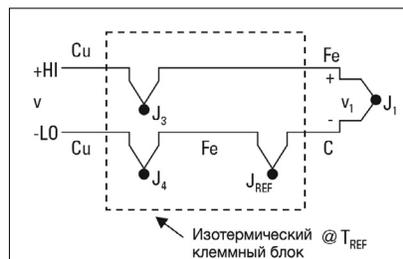


Рисунок 9б. Объединение изотермических клеммных блоков

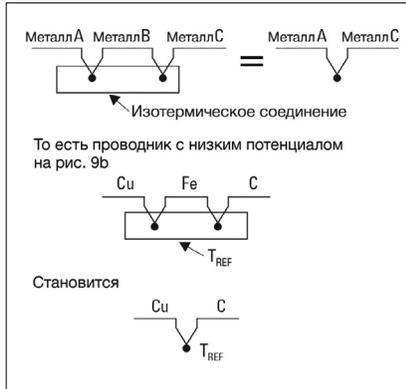


Рисунок 10. Закон промежуточного металла

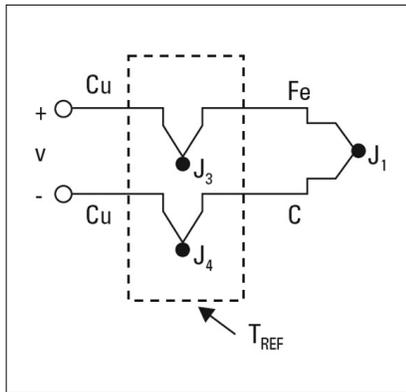


Рисунок 11. Эквивалентная схема

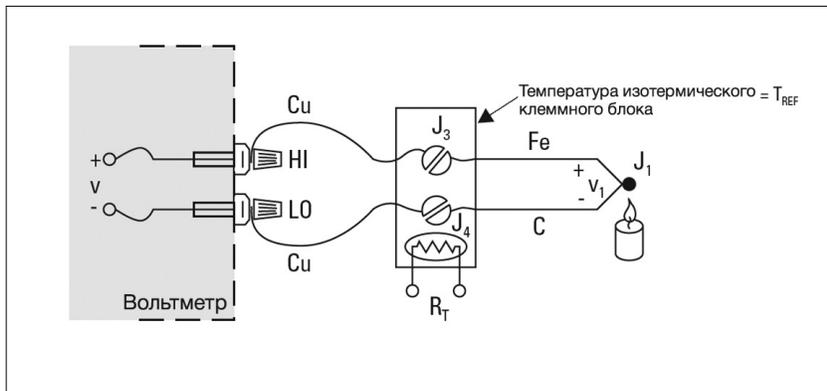


Рис. 12. Внешний холодный спай – водяная баня со льдом отсутствует

включенный между двумя разнородными металлами, образующими термопару, не оказывает влияния на выходное напряжение, пока его контакты с этими металлами имеют одинаковую температуру (рис. 10).

Это утверждение очень полезно, поскольку оно полностью устраняет потребность в железном (Fe) проводе, подключенном к зажиму LO (рис. 11).

$V = \alpha(T_1 - T_{REF})$, где α – это коэффициент Зеебека для термопары Fe-Cu.

Контакты J₃ и J₄ заменяют водяную баню со льдом. Теперь эти два контакта становятся холодным спаем.

Далее можно сделать следующий логический шаг: непосредственно измерить температуру изотермического клеммного блока (холодного спаю) и использовать эту информацию для вычисления неизвестной температуры T_{J1} (рис. 12).

Термистор, сопротивление которого R_T является функцией от температуры, предоставляет нам способ измерить абсолютную температуру холодного спаю. Предполагается, что контакты J₃, J₄ и термистор имеют одинаковую температуру, что обусловлено конструкцией изотермического клеммного блока. С помощью цифрового мультиметра мы можем:

1. Измерить R_T, чтобы найти T_{REF} и преобразовать T_{REF} в эквивалентное напряжение холодного спаю V_{REF}.
2. Измерить напряжение V и прибавить V_{REF}, чтобы найти V₁ и преобразовать V₁ в температуру T_{J1}.

Эта процедура известна как программная компенсация, поскольку выполняется программным обеспечением в приборе или на компьютере для компенсации холодного спаю. Температурный датчик изотермического клеммного блока может быть любым устройством, характеристика которого пропорциональная абсолютной температуре: резистивным датчиком температуры, термистором или интегральным датчиком.

Возникает логичный вопрос: если у нас уже есть устройство, способное измерять абсолютную температуру (например резистивный датчик температуры или термистор), то почему мы до сих пор возимся с термопарой, требующей компенсации холодного спая? Главный ответ заключается в том, что термистор, резистивный датчик температуры и интегральный датчик могут работать только в определенном температурном диапазоне. А термопары, в свою очередь, можно использовать в более широких температурных диапазонах в разных по составу средах. Они намного прочнее термисторов, о чем свидетельствует тот факт, что термопары часто припаивают к металлической детали или прижимают винтом. Они могут быть изготовлены на месте путем спайки или сварки. Короче говоря, термопары являются наиболее универсальными датчиками температуры, а поскольку всю задачу компенсации холодного спая и программного преобразования напряжения в температуру выполняет измерительная система, то использование термопары становится таким же простым, как подключение двух проводов.

Измерение с помощью термопары становится особенно удобным, когда нужно отслеживать большое количество точек данных.

Это выполняется путём использования изотермического холодного спая для более чем одной термопары (рис. 13). Вольтметр подключается к различным термопарам в заданной последовательности с помощью специального коммутатора. Вне зависимости от выбранного типа термопары, все провода вольтметра и коммутатора медные. Фактически, если нам известен тип каждой термопары, то мы можем использовать разные типы термопар в одном изотермическом клеммном блоке (называемом также блоком холодных спаев) и изменять соответствующие настройки в программном обеспечении. Датчик температуры R_T расположен в центре изотермического клеммного блока для минимизации ошибки, вызванной перепадом температур.

Программная компенсация является наиболее универсальным способом работы с измерительными термопарами. Когда к одному клеммному блоку подключено много термопар и в коммутаторе используются только медные провода, программная компенсация не зависит от выбранных типов термопар. Кроме того, при использовании системы сбора данных со встроенным блоком холодных спаев, мы подключаем термопару так же просто, как пару измерительных кабелей. Все преобразования выполняются программным обеспечением прибора. Единственным недостатком является необходимость потратить немного времени на вычисление температуры холодного спая. Для максимального ускорения мы можем воспользоваться аппаратной компенсацией.

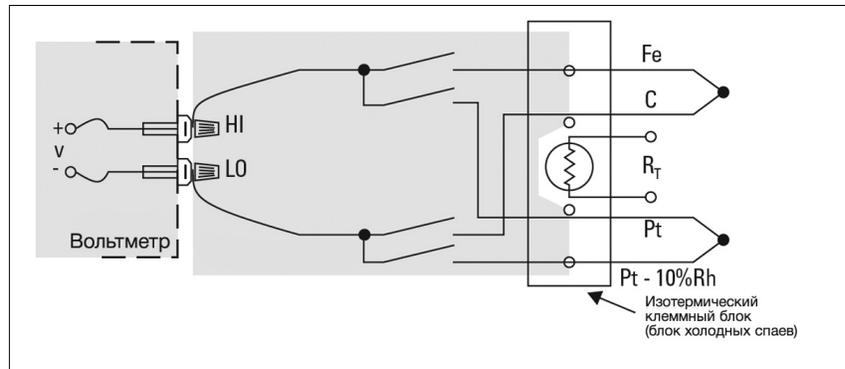


Рисунок 13. Подключение термопар разных типов

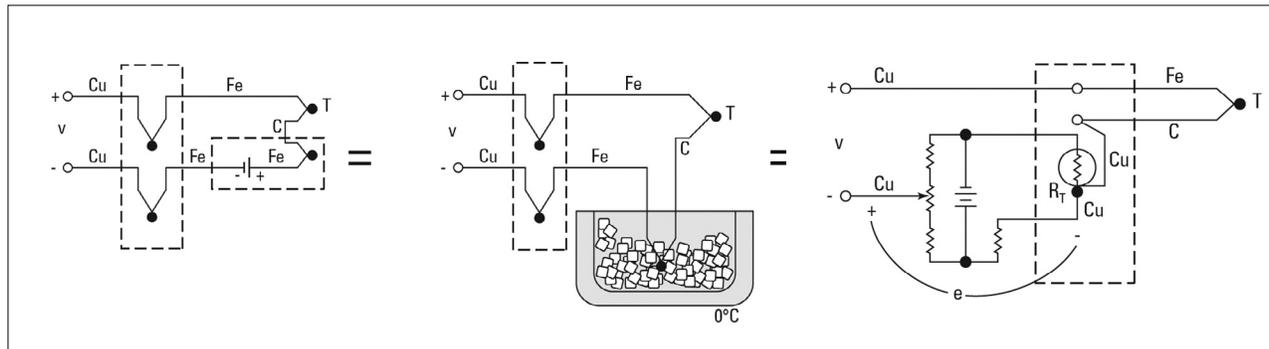


Рисунок 14. Схема аппаратной компенсации

Аппаратная компенсация

Вместо того, чтобы измерять температуру холодного спая и вычислять эквивалентное напряжение, как мы делали при программной компенсации, мы можем включить в цепь источник ЭДС для компенсации напряжения смещения холодного спая. Сумма этого напряжения аппаратной компенсации и напряжения холодного спая равна напряжению спая при 0 °C (рис. 14).

Напряжение компенсации «e» является функцией от сопротивления терморезистора R_T . Напряжение V теперь приведено к 0 °C; его можно считать непосредственно и преобразовывать в температуру по таблицам NIST.

Также эта схема называется электронной моделью водяной бани со льдом⁶. В продаже имеются такие схемы для использования с любым вольтметром и широкой номенклатурой термопар. Главным недостатком является то, что для каждого типа термопары требуется своя схема компенсации.

На рис. 15 показан пример использования такой схемы вместе с коммутатором для компенсации всего клеммного блока с входами термопар. Все термопары в клеммном блоке должны быть одного типа, но для перехода на другой тип термопар нужно просто заменить резистор, определяющий коэффициент усиления.

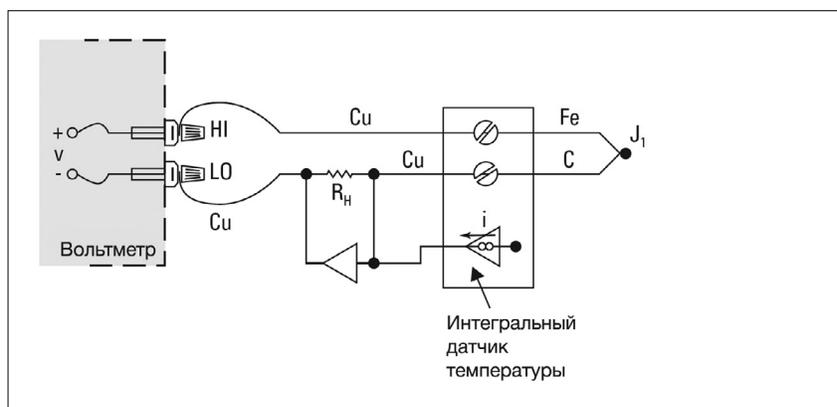


Рисунок 15. Практическая схема аппаратной компенсации

Преимущество схемы аппаратной компенсации, или электронной модели водяной бани со льдом, заключается в том, что мы устраняем необходимость вычисления температуры холодного спая. Это позволяет отказаться от выполнения двух вычислительных операций, благодаря чему аппаратная компенсация становится быстрее программной. Однако благодаря более быстрым современным микропроцессорам и более совершенным системам сбора данных, это различие стирается, и программные методы компенсации на практике стали догонять аппаратные (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение программной компенсации с аппаратной

Аппаратная компенсация	Программная компенсация
Быстродействующая	Требуется больше времени для программной обработки
Ограничена одним типом термопары на каждый холодный спай	Универсальная – подходит для любых термопар
Сложность перехода на новый тип термопары – требует изменения аппаратной конфигурации	Простое изменение конфигурации

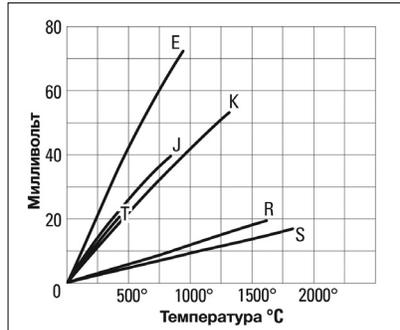
Преобразование напряжения в температуру

Мы использовали аппаратную и программную компенсацию, чтобы синтезировать реперную температуру водяной бани со льдом. Теперь сделаем это для считывания показания вольтметра и преобразования этого показания в температуру. К сожалению, зависимость температуры от напряжения для термопары нелинейна. Графики этой зависимости для некоторых распространенных термопар представлены на рис. 16. На рис. 17 представлены графики зависимостей коэффициента Зеебека от температуры, по которым видно, что термопары являются нелинейными устройствами.

Горизонтальные участки графиков соответствуют постоянному значению α , то есть температурам, при которых термопара является линейным устройством. Обратите внимание на то, что кривая термопары типа К близка к горизонтальной линии в диапазоне температур от 0 °C до 1000 °C.

Следовательно, термопару типа К можно использовать с цифровым вольтметром и синтезированной температурой водяной бани со льдом для умеренно точного прямого считывания измеренной температуры. Таким образом, для отображения температуры нужно только умножить показание на коэффициент.

Рассматривая отклонения коэффициента Зеебека, можно легко заметить, что использование только одного постоянного коэффициента может ограничить диапазон измеряемых температур и точность системы. Лучшей точности преобразования можно достичь, считывая показания вольтметра и сверяя их с выпущенными NIST таблицами⁴ для термопар (Монография NIST 175, см. таблицу 3).



Тип Металлы

	+	-
E	Хромель	и Константан
J	Железо	и Константан
K	Хромель	и Алюмель
R	Платина	и Платина + 13 % Родия
S	Платина	и Платина + 10% Родия
T	Медь	и Константан

Рисунок 16. Зависимость напряжения термопары от температуры

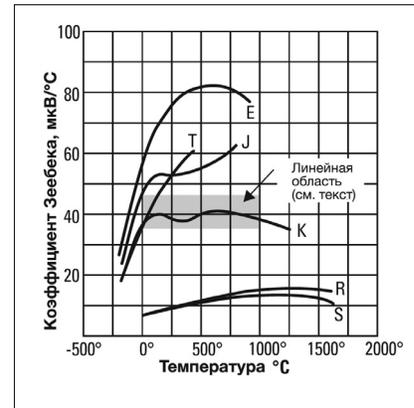


Рисунок 17. Зависимость коэффициента Зеебека от температуры

Таблица 3. Термопара типа E

Температура, °C (МКШ-90)												
mV	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	mV
0,00	0,00	0,17	0,34	0,51	0,68	0,85	1,02	1,19	1,36	1,53	1,70	0,00
0,10	1,70	1,87	2,04	2,21	2,38	2,55	2,72	2,89	3,06	3,23	3,40	0,10
0,20	3,40	3,57	3,74	3,91	4,08	4,25	4,42	4,59	4,76	4,92	5,09	0,20
0,30	5,09	5,26	5,43	5,60	5,77	5,94	6,11	6,28	6,45	6,61	6,78	0,30
0,40	6,78	6,95	7,12	7,29	7,46	7,63	7,79	7,96	8,13	8,30	8,47	0,40
0,50	8,47	8,64	8,80	8,97	9,14	9,31	9,48	9,64	9,81	9,98	10,15	0,50
0,60	10,15	10,32	10,48	10,65	10,82	10,99	11,15	11,32	11,49	11,66	11,82	0,60
0,70	11,82	11,99	12,16	12,33	12,49	12,66	12,83	12,99	13,16	13,33	13,50	0,70
0,80	13,50	13,66	13,83	14,00	14,16	14,33	14,50	14,66	14,83	15,00	15,16	0,80
0,90	15,16	15,33	15,50	15,66	15,83	16,00	16,16	16,33	16,49	16,66	16,83	0,90
1,00	16,83	16,99	17,16	17,32	17,49	17,66	17,82	17,99	18,15	18,32	18,49	1,00
1,10	18,49	18,65	18,82	18,98	19,15	19,31	19,48	19,64	19,81	19,98	20,14	1,10
1,20	20,14	20,31	20,47	20,64	20,80	20,97	21,13	21,30	21,46	21,63	21,79	1,20
1,30	21,79	21,96	22,12	22,29	22,45	22,61	22,78	22,94	23,11	23,27	23,44	1,30
1,40	23,44	23,60	23,77	23,93	24,10	24,26	24,42	24,59	24,75	24,92	25,08	1,40

Мы могли бы сохранить эти взятые из таблицы значения в компьютере, но для этого понадобится много памяти. Более разумным подходом будет аппроксимация табличных значений с помощью степенного ряда:

$$t_{90} = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + \dots + c_nx^n,$$

где

t_{90} = температура

x = напряжение термопары

c = коэффициенты многочлена, уникальные для каждой термопары

n = максимальная степень многочлена.

Чем больше n , тем выше точность многочлена. Многочлены низшей степени можно использовать в узких температурных диапазонах для получения большей скорости системы. В таблице 4 приведен пример многочленов, используемых совместно с программной компенсацией для системы сбора данных. Вместо прямого вычисления экспоненциальной функции программа использует формулу вложенного многочлена, чтобы уменьшить время выполнения. Точность вычислений с помощью многочлена быстро ухудшается вне указанного в таблице 4 диапазона температур, и поэтому результаты вычислений нельзя экстраполировать за его пределы.

Вычисление многочленов более высокой степени занимает много времени даже для мощных современных микропроцессоров. Как было замечено ранее, можно сэкономить время, используя многочлены более низкой степени для узкого диапазона температур. В программном обеспечении системы сбора данных кривая характеристики поделена на восемь участков, каждый из которых аппроксимирован многочленом третьей степени (рис. 18).

Таблица 4. Коэффициенты многочлена NIST для МТШ-90

Тип термопары	Тип J		Тип K	
	от -210 до 0 °C	от 0 до +760 °C	от -200 до 0 °C	от 0 до +500 °C
Диапазон температур	от -210 до 0 °C	от 0 до +760 °C	от -200 до 0 °C	от 0 до +500 °C
Погрешность	± 0,05 °C	± 0,04 °C	± 0,04 °C	± 0,05 °C
Степень многочлена	8-я	7-я	8-я	9-я
C_0	0	0	0	0
C_2	$1,9528268 \times 10^{-2}$	$1,978425 \times 10^{-2}$	$2,5173462 \times 10^{-2}$	$2,508355 \times 10^{-2}$
C_1	$-1,2286185 \times 10^{-6}$	$-2,001204 \times 10^{-7}$	$-0,1662878 \times 10^{-6}$	$7,860106 \times 10^{-8}$
C_3	$-1,0752178 \times 10^{-9}$	$1,036969 \times 10^{-11}$	$1,0833638 \times 10^{-9}$	$-2,503131 \times 10^{-10}$
C_4	$-5,9086933 \times 10^{-13}$	$-2,549687 \times 10^{-16}$	$-8,9773540 \times 10^{-13}$	$8,315270 \times 10^{-14}$
C_5	$-1,7256713 \times 10^{-16}$	$3,585153 \times 10^{-21}$	$-3,7342377 \times 10^{-16}$	$-1,228034 \times 10^{-17}$
C_6	$-2,8131513 \times 10^{-20}$	$-5,344285 \times 10^{-26}$	$-8,6632643 \times 10^{-20}$	$9,804036 \times 10^{-22}$
C_7	$-2,3963370 \times 10^{-24}$	$5,099890 \times 10^{-31}$	$-1,0450598 \times 10^{-23}$	$-4,413030 \times 10^{-26}$
C_8	$-8,3823321 \times 10^{-29}$		$-5,1920577 \times 10^{-28}$	$-1,057734 \times 10^{-30}$
C_9				$-1,052755 \times 10^{-35}$

Формула преобразования температуры: $t_{90} = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_9x^9$

Формула вложенного многочлена (пример с 4-й степенью): $t_{90} = c_0 + x(c_1 + x(c_2 + x(c_3 + c_4x)))$

Таблица 5. Требуемая чувствительность вольтметра

Тип термопары	Коэффициент Зеебека при +25 °C (мкВ/°C)	Чувствительность вольтметра для 0,1 °C (мкВ)
E	61	6,1
J	52	5,2
K	40	4,0
R	6	0,6
S	6	0,6
T	41	4,1

Система сбора данных измеряет выходное напряжение, относит его к одному из восьми участков и выбирает соответствующий коэффициент для этого участка. Подобная методика быстрее и точнее вычисления многочлена более высокой степени.

Во многих новых системах сбора данных применяется еще более быстрый алгоритм. Используя гораздо больше участков и серий из уравнений первой степени, они могут выполнять сотни и даже тысячи внутренних вычислений в секунду.

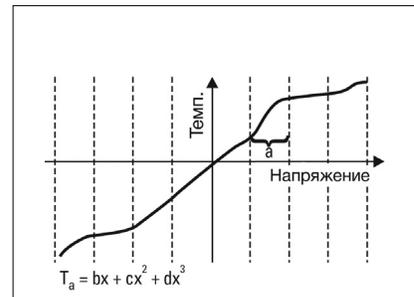


Рисунок 18. Кривая поделена на участки

Для всех описанных выше процедур предполагалось, что напряжение термопары можно измерить легко и точно, однако по таблице 5 сразу видно, что выходные напряжения термопар очень малы. Изучим требования к вольтметру.

Даже для распространенной термопары типа К вольтметр должен иметь разрешение 4 мкВ, чтобы обнаружить изменение температуры на 0,1 °С. Это предъявляет высокие требования к разрешению цифрового мультиметра (чем больше разрядность его АЦП, тем лучше). Амплитуда этого сигнала настолько мала, что вместе с ним в систему могут проникнуть шумы. По этой причине в приборе должны быть реализованы основные меры подавления шумов: древовидная коммутация, аналоговая фильтрация, интегрирование и гальваническая развязка.

Выполнение измерений с помощью термопар

Подавление шумов

Древовидная коммутация. Каналы коммутатора организуются в группы, для каждой из которых имеется собственный коммутирующий элемент.

Без древовидной коммутации каждый канал будет вносить шум непосредственно в систему через паразитную емкость. При использовании древовидной коммутации группы параллельных паразитных емкостей каналов включены последовательно с емкостью одного коммутирующего элемента группы.

Таким образом, в большой системе сбора данных значительно уменьшаются перекрестные помехи из-за снижения емкости между каналами (рис. 19).

Аналоговый фильтр. Чтобы уменьшить шум, фильтр можно включить непосредственно на входе вольтметра. Он значительно уменьшает помехи, но замедляет реакцию вольтметра на крутые перепады входного сигнала (рис. 20).

Интегрирование. Применение интегрирования в аналого-цифровом преобразовании существенно усредняет шум в течение периода частоты сети питания. Поэтому шумы от линии питания и их гармоники устраняются практически полностью. Но если выбранный период интегрирования существенно меньше целого периода частоты сети питания, то никакого шумоподавления не будет.

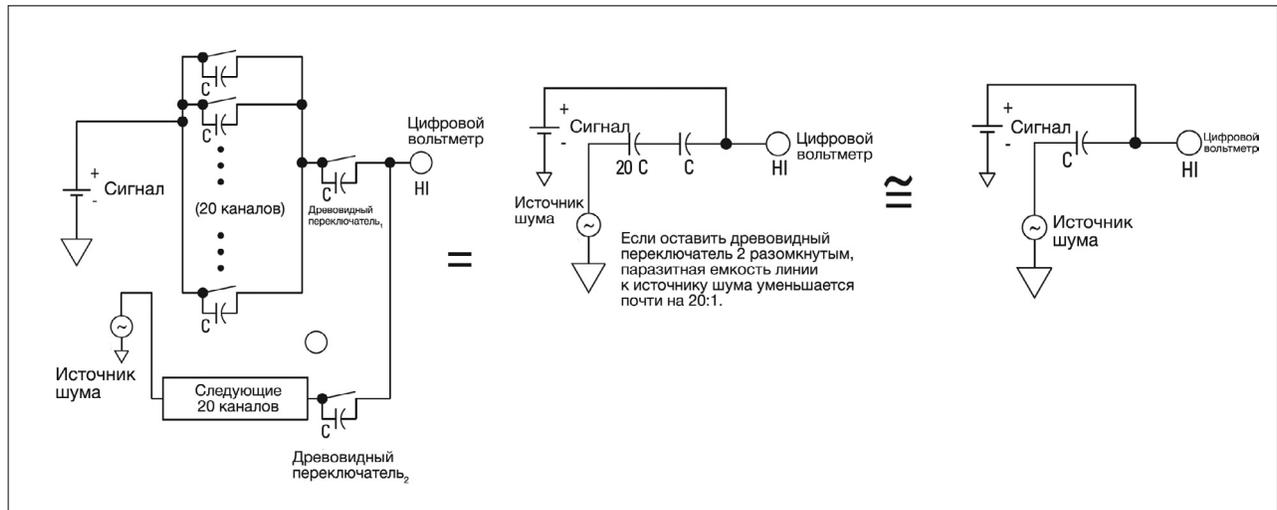


Рисунок 19. Древовидная коммутация

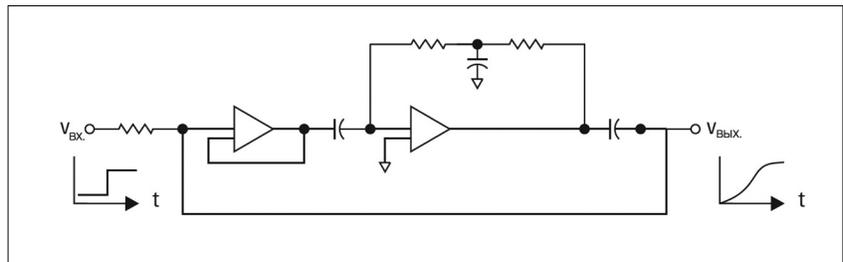


Рисунок 20. Аналоговый фильтр

Поскольку цепи термопар очень протяженны, они особенно восприимчивы к наводкам от линии питания. Поэтому для измерения напряжения термопары рекомендуется использовать интегрирующий АЦП. Интегрирование становится всё более распространенным, поскольку развитие технологий привело к удешевлению интегрирующих АЦП.

Гальваническая развязка. Синфазными помехами называют шумы, одинаковые в измерительных кабелях, подключенных к «плюсовому» и «минусовому» входам вольтметра. Гальванически развязанные входы помогают уменьшить этот шум и защитить измерительную систему от переходных процессов и образования паразитных контуров с замыканием через землю (рис. 21).

Предположим, что провода термопары проложены в одном кабельном канале с линией питания 220 В перем. тока. За счёт ёмкости между проводами линии питания и термопары в каждом из проводов термопары создаётся сигнал переменного тока примерно равной амплитуды. Это не является проблемой в идеальной цепи, но вольтметр не идеален. У него имеется некоторая ёмкость между его «минусовым» входом и защитным заземлением (землей). Токи, протекающие через эту ёмкость и через выводы термопары, создают сигнал синфазной помехи, который проявляется в виде погрешности измерения.

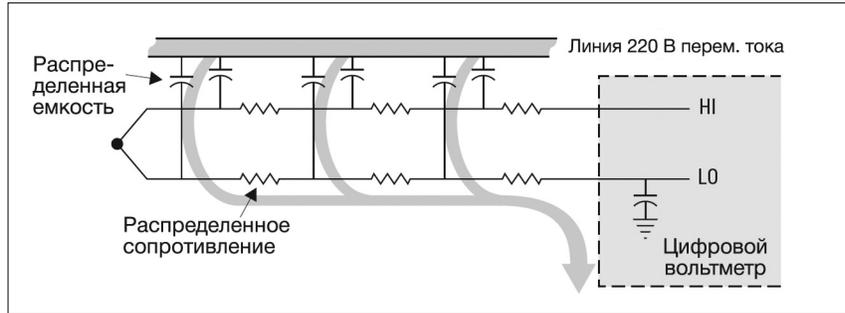


Рисунок 21. Гальваническая развязка минимизирует синфазный ток

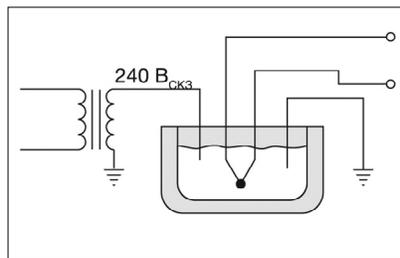


Рисунок 22. Термопара в ванне с расплавленным металлом

Ее можно уменьшить, гальванически развязав входные зажимы вольтметра от защитного заземления и разработав для них конструкцию, минимизирующую ёмкость между «минусом» и землей. Входы без гальванической развязки и входы, предназначенные для измерения сигналов относительно земли (последние часто являются несимметричными), не защищены от синфазных помех. Ток синфазной помехи протекает через кабель «минус» прямо в землю, вызывая значительные ошибки в показаниях.

Гальванически развязанные входы особенно полезны для устранения паразитных контуров с замыканием через землю, возникающих при прямом контакте спая термопары с источником синфазной помехи.

На рис. 22 показано измерение температуры в центре ванны с расплавленным металлом, нагреваемым электрическим током. Напряжение в центре ванны составляет 120 В_{сскз}. Эквивалентная схема показана на рис. 23.

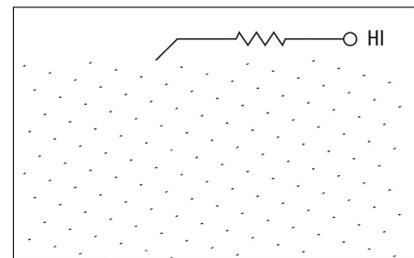


Рисунок 23. Термопара замыкается на жидкость

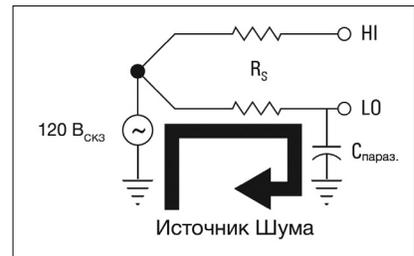


Рисунок 24. Протекание тока помехи через термопару

Гальванически развязанные входы подавляют ток помехи благодаря высокому полному сопротивлению между зажимом «минус» (LO) и заземлением. На рис. 24 показана система без гальванической развязки, в которой через паразитную ёмкость между этим зажимом и заземлением возникает паразитный контур с замыканием на землю.

Результирующие токи могут быть опасно большими и представлять угрозу для прибора и оператора. Для выполнения измерений с сильными синфазными помехами требуется гальваническая развязка входов.

Иногда гальванически развязанных входов бывает недостаточно. На рис. 23 входы вольтметра развязаны от источника синфазной помехи $120 \text{ V}_{\text{СКЗ}}$. Они должны выдерживать пиковое смещение $\pm 170 \text{ В}$ относительно потенциала земли и при этом обеспечивать точные измерения. В гальванически развязанной системе входы с электронными ключами на полевых транзисторах выдерживают смещение от потенциала земли не более $\pm 12 \text{ В}$. Если использовать их в нашем случае, то входы будут повреждены.

Выходом станет применение коммерчески доступных средств внешней обработки сигнала (разделительных трансформаторов и усилителей) для подавления синфазной помехи и усиления входного сигнала. Простой альтернативой станет использование системы сбора данных с гальванической развязкой на сотни вольт.

Заметим, что для уменьшения помех можно также минимизировать R_S . Для этого выводы термопары должны иметь большее сечение и, следовательно, меньшее последовательное сопротивление. Для уменьшения электромагнитных наводок проводники термопары должны быть равномерно скручены. В качестве удлиняющих проводов для термопары используют витую пару.

Практические меры предосторожности

Мы обсудили понятие холодного спая, использование многочлена для получения абсолютного значения температуры и рассмотрели способы минимизации помех в системе сбора данных. Теперь рассмотрим сами провода термопары. При использовании термопары не имеют дефектов и в ходе выполнения измерений температуры их калибровочная характеристика не меняется. Теперь давайте обсудим проблемы, снижающие точность измерения температуры с помощью термопар.

Помимо оговоренных значений погрешностей системы сбора данных и ее изотермического холодного спая, погрешности измерения могут быть вызваны следующими основными источниками:

1. Дефекты рабочего спая термопары
2. Изменение градуировочной характеристики термопары
3. Электрическое шунтирование проводников и возникновение гальванического эффекта
4. Тепловое шунтирование
5. Электрические шумы и утечки
6. Калибровка
7. Документирование

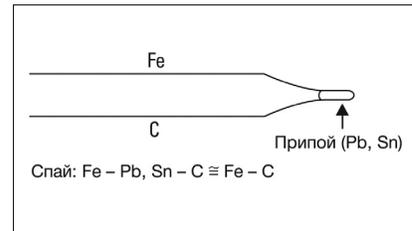


Рисунок 25. Спаянная термопара

Изменение градуировочной характеристики

Дефекты рабочего спая термопары
Существует много способов формирования соединения проводов термопары: низкотемпературная пайка, высокотемпературная пайка серебром, сварка и т. д. При пайке в спай добавляется третий металл (припой). Пока температуры проводников, исходящих из спая, одинаковы, это не может привести к какой-либо погрешности. Но из-за небольшой температуры плавления припоя снижается температура, которую мы можем измерить (рис. 25). Для увеличения измеряемой температуры провода следует сваривать. Но сварка – это далеко не простой процесс.⁵ Перегрев может повредить проводники, а защитный газ, используемый при сварке, может диффундировать в металл и изменить его характеристики. Сложность усугубляется очень разной природой двух соединяемых металлов.

Имеющиеся на рынке термопары сварены с помощью дорогих аппаратов точечной сварки, обеспечивающих однородный шов.

Дефектная сварка может привести к разрыву соединения, который можно обнаружить тестированием на обрыв спая. Данная функция имеется во многих регистраторах данных и системах сбора данных.

Изменение градуировочной характеристики

Это наиболее серьезный и трудно диагностируемый источник погрешности, поскольку результат отсчета измерения температуры может показаться вполне приемлемым и в то же время быть ошибочным. Изменение градуировочной характеристики вызывается непреднамеренным изменением состава проводников термопары, который перестает соответствовать многочлену NIST в указанных границах. Изменение градуировочной характеристики может произойти вследствие диффузии в металл частиц из окружающей среды при высоких температурах. Также оно может быть вызвано высокотемпературным отжигом или холодной обработкой металла, протягиванием провода через трубку, ударами и вибрациями. Изменение состава сплава может наблюдаться на отдельном участке проводника, находящегося длительное время в зоне резкого температурного градиента.

В своей работе «Градиентный подход к термопарной термометрии» Роберт Моффэт объяснил, что напряжение термопары возникает в участке проволоки, который подвергается температурному градиенту, и это не обязательно будет спай⁹. Например, если датчик находится в ванне с расплавленным металлом, то два участка будут практически изотермическими, а один иметь большой градиент.

На рис. 26 спай термопары не участвует в формировании выходного напряжения. Напряжение практически полностью формируют участки, выделенные серой заливкой. Если вследствие отжига или старения обнаружится дрейф выходного напряжения этой термопарного спая проблему не решит. Понадобится заменить все выделенные участки, поскольку именно они формируют выходное напряжение.

Вполне очевидно, что нельзя изготовить проводники термопары без дефектов (неоднородностей), вызывающих погрешность выходного напряжения. Эти неоднородности могут быть особенно вредны, если они находятся в зоне резкого температурного градиента.

Поскольку нам неизвестны места дефектов в проводе, то лучше всего будет сделать так, чтобы изменение температуры по длине проводов термопары было как можно более плавным. Для этого используют металлические трубки или располагают провода термопары более продуманным образом.

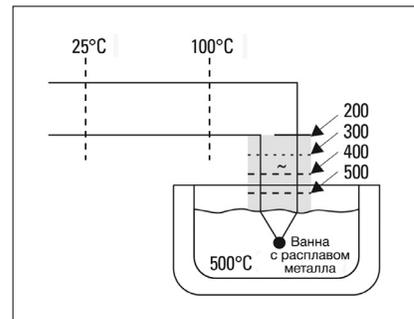


Рисунок 26. Температурный градиент формирует напряжение термопары

Электрическое шунтирование проводников

Высокая температура оказывает влияние на изоляцию проводов термопары. С увеличением температуры сопротивление изоляции уменьшается по экспоненциальному закону, что может привести к образованию так называемого «виртуального» спая (замыканию проводов в средней точке термопары). Предположим, что мы полностью разорвали цепь термопары при высокой температуре.

Сопротивление току утечки R_L может быть достаточно низким, чтобы цепь замкнулась, и мы получили неверный результат измерения. Теперь предположим, что цепь термопары не разорвана, но мы используем очень длинный провод малого сечения (рис. 28).

Если сечение мало, то последовательное сопротивление R_S будет довольно велико, и в экстремальных условиях $R_L \ll R_S$. Это означает, что сопротивление спая термопары будет ближе к R_L , и выходное напряжение будет пропорционально T_1 , а не T_2 .

Высокие температуры оказывают и другие вредные воздействия на провод термопары. Примеси и химические вещества изоляции могут проникнуть в металл термопары и изменить в худшую сторону ее заявленные технические характеристики. Поэтому для работы при высоких температурах следует очень тщательно подбирать материал изоляции. Влияние окружающей среды можно минимизировать, выбрав подходящую металлическую или керамическую оболочку.

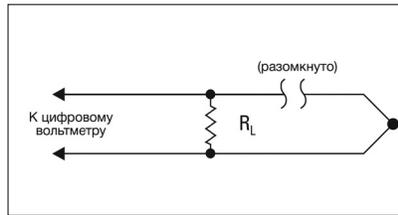


Рисунок 27. Сопротивление току утечки

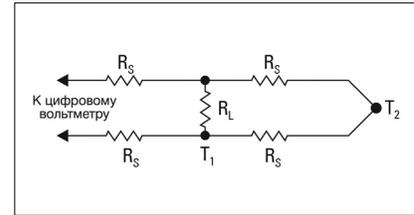


Рисунок 28. Виртуальный спай

Гальванический эффект

Красящие вещества, применяемые в некоторых видах изоляции, могут вызвать образование электролита при попадании воды. Это может привести к гальваническому эффекту, который по силе превышает эффект Зеебека. Необходимо принимать меры для защиты проводников термопары от вредной атмосферы, проникновения воды и других жидкостей.

Тепловое шунтирование

Термопара имеет некоторую массу, которая поглощает энергию. Необходимо помнить, что термопара, как и любой другой контактный датчик, при введении в объект измерения меняет его температуру. Поэтому, если объект мал, термопара тоже должна иметь малые размеры. Однако термопара, изготовленная из тонких проводников, более подвержена эффектам загрязнения, отжига, возникновения напряжений, электрическому шунтированию.⁷ Чтобы минимизировать эти эффекты, применяют удлиняющие провода, которые соединяют выводы термопары с измерительным вольтметром и имеют коэффициент Зеебека, близкий к коэффициенту термопары данного типа.

Обычно удлиняющий провод имеет большее сечение, а его сопротивление не вызывает потерь при передаче сигнала на большие расстояния. Кроме того, удлиняющий провод проще протянуть через кабельный канал, чем тонкие выводы термопары. По сравнению с термопарами, требования к допускам удлиняющих проводов установлены только в узком интервале температур. Помимо преимуществ за счет большего сечения, удлиняющий провод дешевле стандартных термопарных проводов. Это особенно справедливо для термопар на основе платины.

Поскольку требования к допускам удлиняющих проводов установлены только в узком интервале температур, и сам провод может быть подвержен механическим повреждениям и натяжению, следует обеспечить минимальный температурный градиент вдоль провода. В соответствии с теорией температурных градиентов это обеспечит отсутствие искажения выходного сигнала в удлиняющем проводе.

Электрические шумы

Мы уже обсуждали шумы от сети питания, поскольку они влияют на систему сбора данных. Такие помехи практически полностью подавляются с помощью древовидной коммутации, интегрирования и гальванической развязки. Широкополосный шум может быть подавлен аналоговым фильтром.

Единственный шум, который не может подавить система сбора данных – это смещение, обусловленное утечкой постоянного тока в системе. Хотя обычно такие утечки не вызывают больших погрешностей, вероятность их возникновения должна всегда приниматься во внимание и, по-возможности, предотвращаться, особенно если выводы термопары очень малы и их сопротивление велико.

Калибровка

Провода термопар изготавливаются в соответствии с определенной спецификацией, обеспечивающей соответствие таблицам NIST. Спецификацию можно улучшить путем калибровки проводов (тестированием при определенных температурах). Куски провода, последовательно отрезанные от одной сертифицированной бухты, обычно имеют более близкое совпадение в значениях термоЭДС, чем куски из разных бухт, хотя абсолютное отклонение от номинальной термоЭДС может быть значительным.

Если термопара изготавливается с целью получения большей точности, чем установлена спецификацией, то необходима проверка на термoeлектрическую неоднородность проводов и последующие меры для снижения вероятности возникновения неоднородности.

Документирование

Может показаться неуместным говорить о документировании как об источнике погрешности измерения напряжения, но факт заключается в том, что измерительные системы, благодаря простоте использования термопар, предполагают большое количество данных с множества точек измерения. Значительный объем данных может вызвать некоторые неудобства. При большом количестве датчиков увеличивается вероятность ошибки из-за неправильной маркировки измерительных каналов, использования неправильной характеристики NIST и т. д.

Поскольку номера каналов могут меняться, то данные следует классифицировать по самому измерению, а не только по номеру канала¹⁰. Информацию по любой измеряемой величине, такую как тип и местоположение датчика, выходное напряжение и типичное значение, можно сохранить в специальном файле. Вы можете сделать это на компьютере или просто заполнить распечатанную таблицу. Вне зависимости от того, как сохраняются данные, важность их системного хранения нельзя недооценивать, особенно на начальном этапе сложного проекта.

Диагностика

Влияние большинства упомянутых источников погрешности усиливается при использовании термопары вблизи границ ее температурного диапазона. В большинстве применений такие условия встречаются нечасто. Но как быть в ситуации, когда мы используем миниатюрные термопары в агрессивной среде при высоких температурах? Как определить, в какой момент термопара выдаёт ошибочные результаты? Для этого нужен проверенный набор диагностических процедур.

Такой набор диагностических тестов для определения неисправных термопар и измерительных каналов был разработан Р.П. Ридом.¹⁰ Тремя составляющими предлагаемой системы являются: запись всех событий (event record), тест блока холодных спаев (the zone box test) и отслеживание изменения сопротивления термопары (resistance history).

Запись всех событий подразумевает не тестирование, а регистрацию всех событий, способных даже отдаленно повлиять на измерения.

Пример.

Запись событий 18 марта	
10:43	Сбой электропитания
10:47	Восстановление электропитания
11:05	Изменение типа термопары для M821 на тип K
13:51	Новая программа сбора данных
16:07	Подозрения в неправильных показаниях M821

Рисунок 29. Пример записей в журнале событий

Просматривая листинг программы, мы обнаружили, что для измерения параметра #M821 используется термопара типа J, и новая программа сбора данных относит ее к типу J. Но по журналу событий видно, что тип термопары для #M821 был изменен на K, но это изменение не было внесено в программу. Поскольку анализ других источников погрешностей не позволяет это обнаружить, то именно электронная запись всех событий позволяет найти причины необъяснимых изменений в результатах измерений. Это особенно важно, когда на объекте установлены сотни датчиков.

Тест блока холодных спаев. Блок холодных спаев является изотермическим клеммным блоком с известной температурой. Он используется вместо калибровочной водяной бани со льдом. Если мы временно накоротко замкнем термопару внутри этого блока, то система получит температуру, близкую к температуре блока холодных спаев, то есть к температуре в помещении (рис. 30).

Если сопротивление провода термопары значительно выше сопротивления этой медной перемычки, то на выходе получим $V = 0$ В. В нормальных (без короткого замыкания) условиях мы хотим измерить T_J , и на входе вольтметра будет напряжение

$$V = \alpha(T_J - T_{REF})$$

Но для теста мы замкнули зажимы, поэтому $V = 0$ В. Таким образом, отображаемая температура T_J составит

$$0 = \alpha(T_J - T_{REF})$$

$$T_J = T_{REF}$$

Таким образом, при нулевом напряжении на входе вольтметра система будет отображать температуру блока холодных спаев. Сначала мы запишем температуру T_J (которую следует установить отличной от T_{REF}), затем замкнем термопару медной перемычкой и удостоверимся, что система показывает температуру блока холодных спаев вместо T_J .

Этот простой тест позволяет убедиться в правильной работе контроллера, коммутатора, вольтметра и блока холодных спаев. Фактически, таким образом легко проверяется всё, кроме самой термопары.

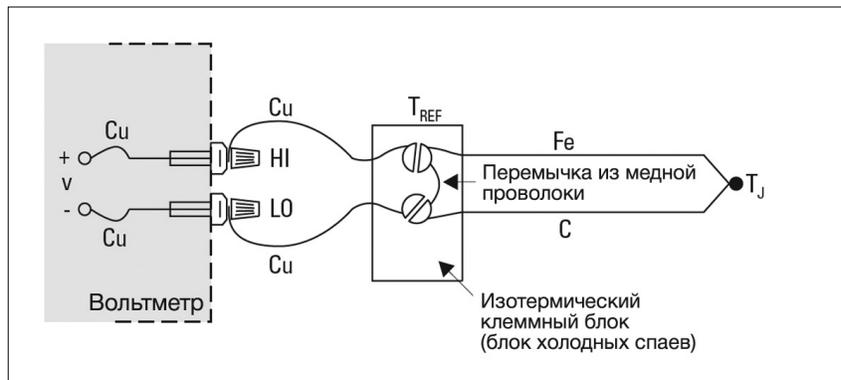


Рисунок 30. Замыкание накоротко зажимов термопары

Сопротивление термопары. Внезапное изменение сопротивления термопары – это симптом неисправности. Построив график зависимости сопротивления от времени, мы немедленно обнаруживаем резкое изменение сопротивления, которое может указывать на обрыв, короткое замыкание вследствие нарушения изоляции, а также изменения, вызванные усталостью металла вследствие вибрации и другие причины неисправности.

Рассмотрим пример измерения с помощью термопары, показанный на рис. 31.

Мы хотим измерить температурный профиль загоревшегося угольного пласта. Провода термопары проходят через область высокой температуры в область более низкой температуры. Внезапно измеряемая температура увеличивается с $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чем это вызвано – перемещением горящего участка пласта или коротким замыканием термопары вследствие нарушения изоляции?

Располагая графиком временной зависимости сопротивления провода термопары (рис. 32), мы можем выяснить, что случилось.

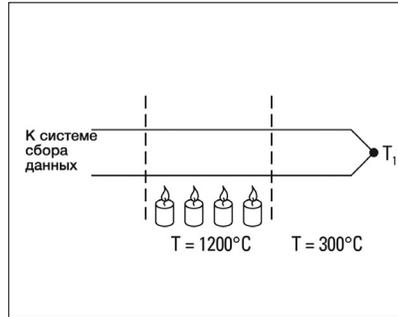


Рисунок 31. Горящий угольный пласт

Сопротивление термопары меняется в зависимости от температуры. Но внезапное резкое изменение указывает на проблему. В нашем случае сопротивление резко упало, показывая, что нарушение изоляции вызвало короткое замыкание цепи термопары (рис. 33).

Образовавшийся вследствие него новый спай будет измерять температуру T_S , а не T_1 . Сопротивление изоляции предоставляет дополнительную информацию о произошедшем физическом явлении. Эта неисправность не может быть обнаружена обычной проверкой на обрыв термопары.

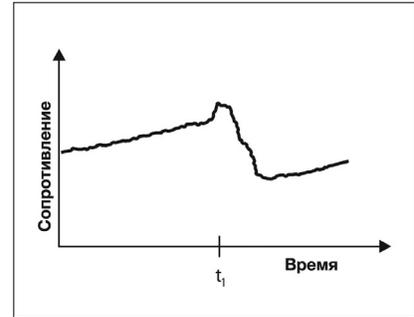


Рисунок 32. Зависимость сопротивления термопары от времени

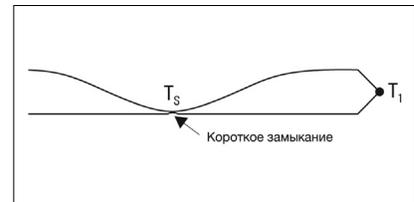


Рисунок 33. Причина изменения сопротивления

Измерение сопротивления. Мы вскользь упомянули об измерении сопротивления провода термопары, словно это рядовое измерение. Но имейте в виду, что когда термопара генерирует напряжение, то это напряжение может вызвать большую погрешность измерения сопротивления. Измерение сопротивления термопары похоже на измерение внутреннего сопротивления батареи. Эту проблему решают с помощью технологии компенсации термоЭДС.

Вольтметр сначала измеряет напряжение, генерируемое термопарой без включения источника измерительного тока, используемого при измерении сопротивления. Затем оно измеряется с включенным источником тока. Микропрограммное обеспечение прибора вычитает напряжение, генерируемое термопарой, из напряжения, измеренного при включенном источнике, и вычисляет истинное сопротивление термопары.

Специальные термопары.

В экстремальных условиях мы можем использовать специальные схемы тестирования термопар. Термопары с разветвлением от спая и разветвлением от вывода представляют собой четырехпроводные цепи, обеспечивающие резервирование измерений температуры, напряжения шума и сопротивления для проверки целостности провода термопары (рис. 34). Их достоинства обсуждаются в документе⁸ из списка литературы.

Такая обширная диагностика требуется только в специальных применениях, но важно знать, что существуют процедуры проверки достоверности измерений с помощью термопар.

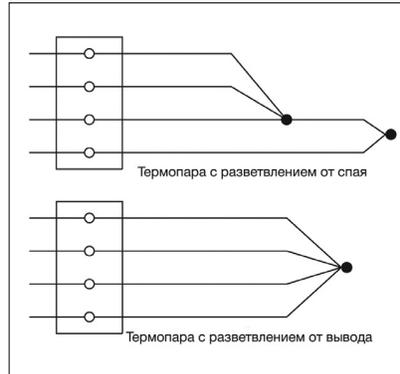


Рисунок 34. Четырехпроводные термопары

Заключение

Таким образом, надежность измерительной системы с термопарами можно повысить с помощью следующих мер:

- Используйте провод термопары наибольшего сечения, чтобы избежать теплового шунтирования зоны измерений.
- Если требуется провод малого сечения, то используйте его только в зоне измерения, а через зону без температурного градиента прокладывайте удлиняющие провода.
- Предотвращайте натяжение и вибрации, вызывающие механическое напряжение проводов.

- Для получения длинных линий подключайте к термопарам удлиняющие провода в виде экранированной витой пары.
- Не допускайте резких температурных градиентов.
- Старайтесь использовать термопару в диапазоне температур, на который она рассчитана.
- АЦП вольтметра должен иметь высокое разрешение и точность.
- Входы вольтметра должны иметь гальваническую развязку и выдерживать достаточное смещение относительно потенциала земли.
- В агрессивной среде следует защитить термопару оболочкой из соответствующего материала.
- Удлиняющие провода следует использовать только при низких температурах и только в зонах с небольшими температурными градиентами.
- Сохраняйте журнал событий и непрерывно регистрируйте сопротивление термопары.

Резистивный датчик температуры

История

В тот же год, когда Зеебек открыл термоэлектрический эффект, сэр Гемфри Дэви заявил, что сопротивление металлов демонстрирует явную зависимость от температуры. Через пятьдесят лет сэр Уильям Сименс предложил использовать платину в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) в резистивном датчике температуры. Его выбор оказался очень удачным, поскольку платина по сей день является первичным измерительным элементом во всех высокоточных резистивных датчиках температуры. Поэтому в соответствии с МТШ-90 температура в диапазоне от $-259,3467^{\circ}\text{C}$ (тройная точка водорода) до $+961,78^{\circ}\text{C}$ (точка затвердевания серебра) определяется именно с помощью эталонного платинового резистивного датчика температуры.

Платина особенно хорошо подходит для этой цели, поскольку она способна выдерживать высокие температуры, сохраняя стабильные характеристики. Как благородный металл, она практически не деградирует.

Классическая конструкция платинового резистивного датчика температуры была предложена К. Г. Майерсом в 1932 г.¹² Он намотал спираль из платиновой проволоки на скрещенные полоски слюды и поместил ее в стеклянную трубку. Такая конструкция минимизировала механические напряжения проволоки и обеспечила максимальное сопротивление (рис. 35).

Хотя характеристики ЧЭ были очень стабильными, тепловой контакт между платиной и измеряемым объектом оказался довольно плохим. Это привело к большой термической инертности. Хрупкость конструкции ограничила ее применение рамками эталонного средства измерений для лабораторий.

На смену резистивному датчику температуры Майера пришел прибор новой конструкции. Чувствительный элемент в виде клетки был предложен Эвансом и Бёрнсом.¹⁶ В нём платиновый элемент остается в большой степени незакрепленным, что позволяет ему свободно расширяться или сжиматься при колебаниях температуры (рис. 36).

Таким образом, изменения сопротивления, вызванные деформацией во время нагрева и охлаждения, сводятся к минимуму, что делает резистивный датчик температуры с ЧЭ в виде клетки образцовым средством измерений. Из-за незакрепленной конструкции и, следовательно, чувствительности к вибрации, ЧЭ в виде клетки остается по-прежнему слишком хрупким для применения в промышленности.

Более прочная конструкция показана на рис. 37. Платиновая проволока двумя нитями намотана на стеклянный или керамический сердечник. Намотка в две нити уменьшает площадь, занятую обмоткой, что минимизирует помехи вследствие электромагнитных наводок. После намотки проволоки на сердечник сборка заливается расплавленным стеклом. Заливка гарантирует защиту ЧЭ от сильных вибраций, но при этом ограничивает тепловое расширение платины при высоких температурах. Если коэффициенты расширения проволоки и сердечника не совпадают полностью, то при изменениях температуры проволока испытывает механические напряжения, вызывающие изменения сопротивления. Это может привести к постоянному изменению сопротивления проволоки.

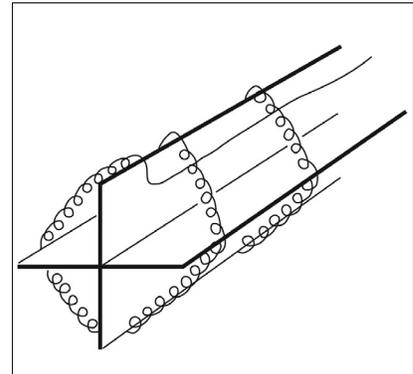


Рисунок 35. Конструкция резистивного датчика температуры Майера

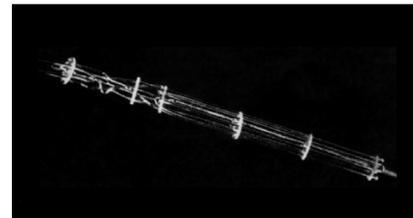


Рисунок 36. Платиновый резистивный датчик температуры в виде клетки



Рисунок 37. Резистивный датчик температуры повышенной прочности

Существуют версии резистивного датчика температуры с частично закрепленным ЧЭ, занимающие промежуточное положение между залитой стеклом обмоткой и клеткой. В одной из них платиновая спираль продета через керамический цилиндр и зафиксирована стеклянной глазурью. Такой датчик сохраняет отличную стабильность и обладает средней стойкостью к вибрациям.

Металлопленочные резистивные датчики температуры

Новейшая технология предусматривает нанесение платиновой или стекло-металлической пленки путем осаждения или напыления на небольшую плоскую керамическую подложку с последующей лазерной подгонкой и заливкой эпоксидным или стеклянным изоляционным слоем. Преимущество пленочных резистивных датчиков температуры заключается в значительном сокращении времени сборки, а также в большем сопротивлении при тех размерах. Благодаря отлаженной технологии производства размер резистивного датчика температуры очень мал, что означает быструю реакцию на резкие изменения температуры. Пленочные резистивные датчики температуры менее стабильны, чем проволочные, но они более популярны благодаря своей компактности, низкой стоимости производства и прочности.

Металлы. Сопротивление всех металлов возрастает при увеличении температуры. На этом и основан принцип работы резистивного датчика температуры. Скоро мы увидим, что при большом номинальном сопротивлении датчика погрешность измерения будет минимальной. Для этого нужна металлическая проволока с высоким удельным сопротивлением. Чем ниже удельное сопротивление, тем больше проволоки понадобится.

В таблице 6 перечислены наиболее распространенные материалы для резистивных датчиков температуры.

В силу низкого удельного сопротивления золото и серебро редко используются для изготовления резистивных датчиков температуры. Вольфрам обладает относительно высоким удельным сопротивлением, но он предназначен для применений с очень высокой температурой, поскольку он чрезвычайно хрупок и сложен в обработке.

Таблица 6. Проводимость различных металлов

Металл		Удельное сопротивление, Ом*мм ² /м
Золото	Au	0,023
Серебро	Ag	0,015
Медь	Cu	0,0175
Платина	Pt	0,107
Вольфрам	W	0,05
Никель	Ni	0,087

Медь используется в резистивных датчиках температуры не очень часто. Из-за низкого удельного сопротивления медный резистивный датчик температуры длиннее платинового, но благодаря линейности характеристики и дешевизне он является экономичной альтернативой. Максимальная измеряемая температура медного резистивного датчика температуры составляет 120 °C.

Наиболее распространены резистивные датчики температуры из платины, никеля или никелевых сплавов. Недорогие резистивные датчики температуры из сплавов никеля используются в ограниченном диапазоне температур. Они довольно нелинейны и склонны к дрейфу с течением времени. С точки зрения целостности измерений, очевидным выбором является платина.

Измерение сопротивления

Значения сопротивления платинового резистивного датчика температуры варьируются от 10 Ом для датчиков в виде клетки до нескольких тысяч Ом для пленочных резистивных датчиков температуры. Единим общепринятым значением является 100 Ом при 0 °С. Стандарт DIN 43760 устанавливает температурный коэффициент платиновой проволоки $\alpha = 0,00385$. Для 100-омной проволоки это соответствует $+0,385 \Omega/^\circ\text{C}$ при 0 °С. Это значение α фактически представляет собой средний наклон температурной характеристики в диапазоне от 0 °С до +100 °С. Более химически чистая платиновая проволока, используемая в эталонных платиновых резистивных датчиках температуры, имеет $\alpha = +0,00392 \Omega/^\circ\text{C}$ при 0 °С.

И коэффициент α , и абсолютное значение сопротивления невелики, особенно если учитывать тот факт, что сопротивление подводящих проводов датчика может составлять единицы и даже десятки Ом. Даже небольшое сопротивление проводов датчика может привести к большой погрешности измерения температуры (рис. 38).

Сопротивление подводящего провода 10 Ом вызовет ошибку измерения, составляющую $10/0,385 \approx 26 \text{ }^\circ\text{C}$. В погрешность измерения вносит вклад даже температурный коэффициент материала подводящего провода. Классический метод решения этой проблемы заключается в использовании мостовой схемы (рис. 39).

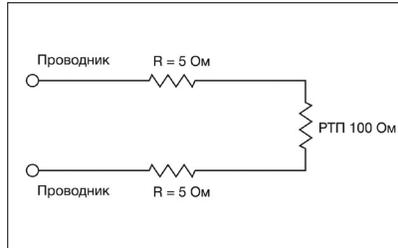


Рисунок 38. Влияние сопротивления проводов

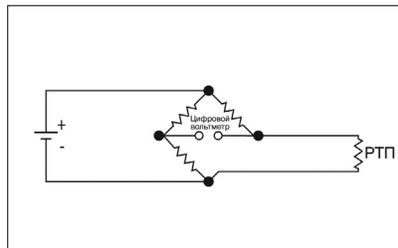


Рисунок 40. Резистивный датчик температуры подключен удлиняющими проводами

Выходное напряжение моста косвенно выражает сопротивление резистивного датчика температуры. Для создания моста требуются четыре соединительных провода, внешний источник напряжения и три дополняющих резистора с нулевым температурным коэффициентом. Во избежание воздействия на три дополняющих резистора температуры, которую измеряет резистивный датчик температуры, он отделен от моста парой удлиняющих проводов.

Но удлиняющие провода возвращают старую проблему: их сопротивление влияет на показания температуры. Для минимизации этого эффекта используют трехпроводную мостовую схему (рис. 41).

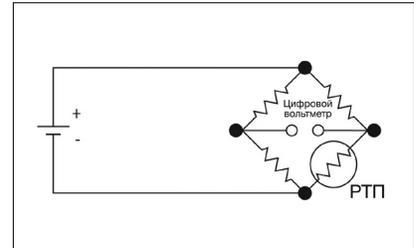


Рисунок 39. Мост Уитстона

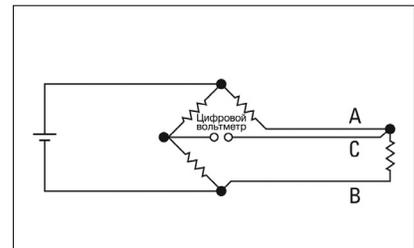


Рисунок 41. Трехпроводная мостовая схема

Если провода А и В имеют строго одинаковую длину, то влияние их сопротивления взаимно компенсируется, поскольку они подключены к выводам противоположной полярности. По третьему проводу С протекает только очень малый измерительный ток.

Показанная на рис. 41 мостовая схема Уитстона характеризуется нелинейной зависимостью изменения напряжения моста в зависимости от сопротивления. Это требует применить к нелинейной температурной характеристике резистивного датчика температуры дополнительное уравнение, преобразующее выходное напряжение моста в эквивалентное сопротивление датчика.

Четырехпроводная схема измерения сопротивления. Многие проблемы, связанные с мостом, устраняет использование источника тока и отдельных измерительных линий, подключенных к цифровому вольтметру. Поскольку через провода измерения напряжения ток не протекает, то на них нет падения напряжения ($I \times R$), поэтому в результатах измерения нет погрешности, связанной с сопротивлением этих проводов.

Считываемое цифровым вольтметром выходное напряжение прямо пропорционально сопротивлению датчика, поэтому потребуется только одно уравнение преобразования. Вместо моста в измерительной схеме остался всего один резистор. Цифровой вольтметр измеряет только падение напряжения через резистивный датчик температуры и не чувствителен к длине подводящих проводов.

Единственный недостаток четырёхпроводной схемы измерения сопротивления заключается в том, что в ней на один удлиняющий провод больше, чем в трёхпроводной. Это небольшая цена, которую придется заплатить за лучшую точность измерения температуры.

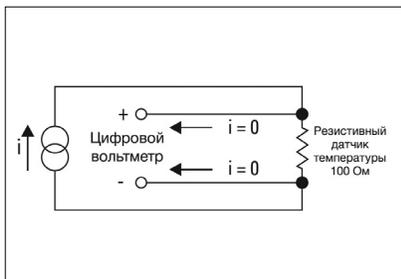


Рисунок 42. Измерение сопротивления по 4-проводной схеме

Преобразование сопротивления в температуру

Резистивный датчик температуры является более линейным по сравнению с термопарой, но тоже требует аппроксимации температурной характеристики. В течение многих лет для аппроксимации температурной характеристики резистивного датчика температуры использовали уравнение Каллендара-Ван Дюзена.^{11, 13}

$$R_T - R_0 = R_0 \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right]$$

где

R_T = сопротивление при температуре T

R_0 = сопротивление при $T = 0^\circ\text{C}$

α = температурный коэффициент при $T = 0^\circ\text{C}$
(обычно $+0,00392 \text{ Ом/Ом/}^\circ\text{C}$)

δ = 1,49 (типичное значение для платины 0,00392)

β = $0 \text{ T} > 0$
 $0,11 \text{ (тип) T} < 0$

Точные значения коэффициентов α , δ и β определяются тестированием резистивного датчика температуры при четырех температурах и решением полученных уравнений. Это известное уравнение в 1968 г. было заменено многочленом 20-й степени для более точной аппроксимации кривой.

Графическое представление этого уравнения показывает, что резистивный датчик температуры является более линейным устройством, чем термопара (рис. 43).

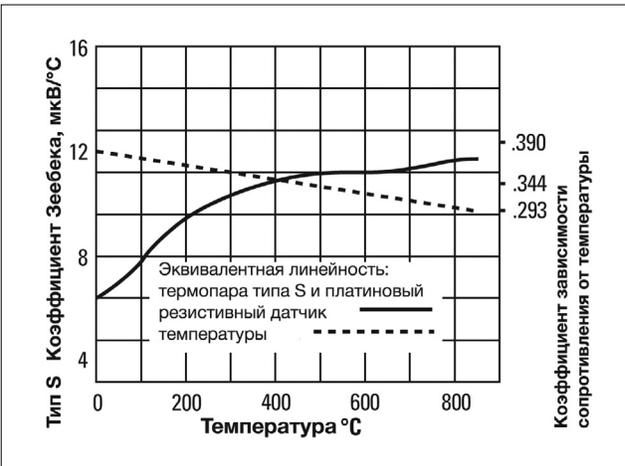


Рисунок 43. Графическое сравнение характеристик резистивного датчика температуры и термопары

Практические меры предосторожности

В случае с резистивным датчиком температуры следует предпринимать те же меры предосторожности, что и для термопар: использовать экраны и витую пару, избегать механического напряжения и резких температурных градиентов, применять специальные удлиняющие провода, тщательно документировать события и значения и использовать цифровой мультиметр с интегрирующим АЦП. В дополнение к этому следует предпринять следующие меры.

Резистивный датчик температуры малого размера	Резистивный датчик температуры большого размера
Быстрая реакция на изменение температуры	Медленная реакция на изменение температуры
Слабое тепловое шунтирование	Сильное тепловое шунтирование
Большая погрешность из-за самонагрева	Небольшая погрешность из-за самонагрева

Конструкция. В силу своей конструкции резистивные датчики температуры более хрупки, чем термопары, и нуждаются в дополнительной защите.

Самонагрев. В отличие от термопары, резистивный датчик температуры нуждается во внешнем источнике питания.

Чтобы измерить падение напряжения, через датчик должен протекать ток. Вызванный протеканием тока эффект Джоуля (I^2R) приводит к увеличению температуры резистивного датчика температуры. Этот самонагрев приводит к увеличению погрешности измерения. Следовательно, нужно обратить внимание на величину тока, поступающего в измерительную схему. Типичное значение погрешности, вызванной самонагревом в воздушной среде, составляет $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ на милливатт при нормальных условиях. Очевидно, что резистивный датчик температуры, погруженный в теплопроводящую среду, будет отдавать ей Джоулево тепло, и погрешность из-за самонагрева будет меньше. Резистивный датчик температуры, который в воздушной среде при нормальных условиях имеет погрешность $1\text{ }^\circ\text{C}$ на милливатт, при скорости воздушного потока 1 м/с в тех же условиях будет иметь погрешность всего $0,1\text{ }^\circ\text{C}$.⁶

Для уменьшения погрешности, вызванной самонагревом, подавайте минимальный измерительный ток, способный обеспечить нужное разрешение, и используйте как можно более крупный резистивный датчик температуры, размер которого обеспечивает приемлемое время реагирования. Очевидно, что здесь придется пойти на определенные компромиссы.

Тепловое шунтирование. Тепловое шунтирование проявляется как изменение температуры измеряемого объекта при введении датчика. Для резистивного датчика температуры оно является большей проблемой, чем для термопары, поскольку оно значительно больше по размеру.

ТермоЭДС. Соединение платина-медь в резистивном датчике температуры может вызвать термоэлектрический эффект. Для его устранения используют специальную технологию компенсации термоЭДС.

Термистор

Подобно резистивному датчику температуры, термистор также представляет собой термочувствительный резистор. В то время как термопара является наиболее универсальным датчиком температуры, а платиновый резистивный датчик температуры – самым стабильным, термистор является наиболее чувствительным. Из трех основных видов датчиков термистор демонстрирует наибольшую зависимость своего основного параметра от температуры.

Термисторы обычно изготавливаются из полупроводниковых материалов. Хотя существуют термисторы с положительным температурным коэффициентом (PTC), наиболее распространенными являются термисторы с отрицательным температурным коэффициентом (NTC), сопротивление которых уменьшается с ростом температуры. Отрицательный температурный коэффициент может быть очень большим и достигать нескольких процентов на градус Цельсия. Это позволяет термистору обнаруживать очень малые изменения температуры, которые нельзя наблюдать с помощью резистивного датчика температуры или термопары.

Но за повышенную чувствительность приходится платить потерей линейности. Термистор характеризуется сильной нелинейностью, величина которой зависит от параметров контролируемой технологической среды.

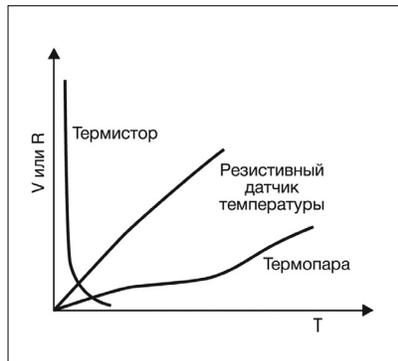


Рисунок 44. Графики чувствительности датчиков температуры

Следовательно, для термисторов нет стандартизованных температурных характеристик, которые имеются для резистивных датчиков температуры и термопар (рис. 44).

Математическая модель, описывающая сопротивление отдельного термистора в зависимости от температуры, определяется уравнением Стейнхарта - Харта:¹⁸

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3$$

где

T = температура в Кельвинах,

R = сопротивление термистора,

A, B, C = калибровочные константы.

Чтобы найти A, B, и C, нужно выбрать по паспортным данным значение сопротивления (R) при трех температурах (T) и подставить каждый набор данных (R и T) в уравнение Стейнхарта-Харта для определения трех неизвестных. Если эти три точки данных выбраны в диапазоне ± 50 °C от середины номинального диапазона температур термистора, то решения данного уравнения будут отличаться от значений реальной характеристики не более чем на $\pm 0,02$ °C.

Для ускорения компьютерных вычислений используют упрощенное уравнение:

$$T = \frac{1}{(\ln R) - A} - C$$

где A, B, и C снова находят, выбрав три точки данных (R, T) на температурной характеристике и решив уравнение для определения трех неизвестных. Точность решения этого уравнения приближается к точности уравнения Стейнхарта-Харта в более узком диапазоне температур.

Измерение

Высокое удельное сопротивление термистора является существенным преимуществом для измерений. Поэтому, в отличие от резистивного датчика температуры, четырехпроводная схема измерения сопротивления для него, как правило, не требуется. Например, типичное сопротивление термистора составляет 5000 Ом при 25 °C. При типичном температурном коэффициенте 4%/°C сопротивление измерительного кабеля 10 Ом даст погрешность измерения всего 0,05 °C, что в 500 раз меньше, чем погрешность резистивного датчика температуры того же диапазона.

Недостатки. Поскольку термисторы являются полупроводниковыми приборами, они более склонны к изменению градуировочной характеристики при высоких температурах, чем резистивные датчики температуры. Рабочий диапазон термисторов ограничен несколькими сотнями градусов Цельсия, и производители предупреждают, что при длительном воздействии температур, пусть даже меньших максимальной допустимой, градуировочная характеристика термистора выйдет за установленный допуск.

Термисторы могут иметь очень малые размеры. Из этого следует, что они могут быстро реагировать на изменения температуры. Это также означает, что небольшая тепловая масса делает их особенно склонными к погрешности из-за самонагрева.

Термисторы являются намного более хрупкими, чем резистивные датчики температуры или термопары, поэтому их необходимо монтировать с осторожностью, чтобы не разбить или не оборвать соединения.

Интегральный датчик

Инновационным решением в термометрии стали интегральные датчики температуры (на основе интегральной схемы). Они выпускаются с выходами, подающими аналоговые сигналы тока или напряжения. Уровень выходного сигнала в обоих случаях линейно зависит от абсолютной температуры. Типичными значениями являются 1 мкА/К и 10 мВ/К F (рис. 45).

Некоторые интегральные датчики выдают значение температуры в цифровом формате, который может непосредственно считываться микропроцессором.

За исключением преимуществ, заключающегося в высокой линейности выходного сигнала, интегральным датчикам присущи все недостатки термисторов. Они являются полупроводниковыми устройствами, следовательно, имеют ограниченный диапазон температур. Им свойственны проблемы, связанные с самонагревом и хрупкостью, им также необходим внешний источник питания.

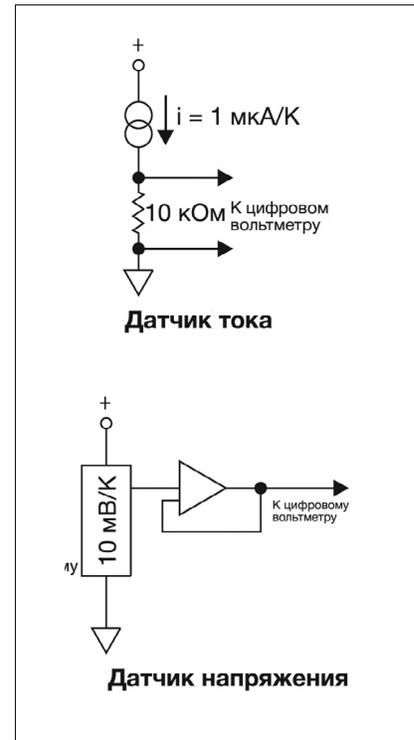


Рисунок 45. Два типа выходов интегральных датчиков

Но эти устройства предлагают легко обрабатываемый выходной сигнал, пропорциональный температуре. Интегральные датчики всё чаще используются в качестве устройств, обеспечивающих компенсацию холодного спая для термопар.

Измерительная система

На рис. 46 показан практический способ реализации холодного спая термопары. Стрелка указывает на интегральный датчик, используемый для программной компенсации термопары.

Микропрограммное обеспечение систем сбора данных и коммутации Keysight 34970A и 34972A от Keysight поддерживает термопары типа В, Е, J, К, N, R, S и Т, термисторы 2,2 кОм, 5 кОм и 10 кОм, а также широкую номенклатуру резистивных датчиков температуры. Результаты отображаются непосредственно в °С, °F или К.

Системы сбора данных и коммутации Keysight 34970A и 34972A имеют весь необходимый функционал, описанный в этом документе:

- Встроенный 6½-разрядный цифровой мультиметр
- Интегрирующий АЦП для подавления шумов
- Термостабильный коммутатор со встроенными холодными спаями термопар
- Проверка термопары на обрыв
- Встроенная функция линеаризации характеристики термопары, термистора и резистивного датчика температуры в соответствии с МТШ-90
- Измерение сопротивления по четырехпроводной схеме для компенсации смещения
- Выходы с гальванической развязкой от земли, выдерживающей до 300 В.

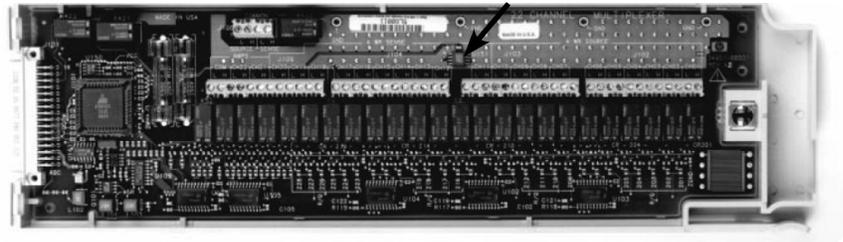


Рисунок 46. Модуль мультиплексора общего назначения для системы сбора данных и коммутации Keysight 34970A или 4972A



Рисунок 47. Системы сбора данных и коммутации 34970A и 34972A

Для приложений автоматического тестирования в стандартную конфигурацию 34970A входят интерфейсы GPIB и RS-232, а в стандартную конфигурацию 34972A – интерфейсы USB и LAN. Оба поддерживают энергонезависимую память на 50 000 измерений для автономного сохранения данных. 34972A также поддерживает внешний USB-накопитель, поэтому данные сканирования можно сохранять прямо во флеш-память. 34972A также имеет встроенный веб-сервер, позволяющий настраивать и контролировать систему через локальную сеть.

Энергонезависимая флеш-память служит для сохранения показаний, переноса настроек и результатов измерений.

Программное обеспечение Keysight Benchlink Data Logger позволяет легко выполнять измерения под управлением ПК. Кроме того, системы 34970A и 34972A поддерживают до трех сменных модулей коммутации и управления, что позволяет легко наращивать число каналов для различных приложений.

Многофункциональная коммутационно-измерительная система Keysight 34980A (рис. 48) обеспечивает высокоскоростные измерения температуры по большому количеству точек измерения. Она предлагает тот же полезный функционал, что и система сбора данных Keysight 34970A. Некоторые из функций перечислены ниже:

- До 560 двухпроводных или 640 однопроводных каналов измерения температуры на систему со скоростью сканирования до 1000 показаний в секунду.
- Поддержка термопар типа В, Е, J, К, N, R, S и Т, термисторов 2,2 кОм, 5 кОм, 10 кОм и широкой номенклатуры резистивных датчиков температуры.
- Внешний клеммный блок со встроенным холодным спаем термопары и зажимами для подключения датчиков температуры.
- Сменный модуль для измерения сопротивления по четырехпроводной схеме с компенсацией смещения при измерениях с помощью резистивных датчиков температуры и термисторов.
- Встроенный алгоритм преобразования единиц измерения для измерений с помощью термопар, термисторов и резистивных датчиков температуры.



Рисунок 48. Система Keysight 34980A

Эта система на основе LXI предлагает гораздо больше, чем просто измерения температуры. Она предоставляет различные комбинации аналоговых и цифровых входов и выходов, требуемые для разработчиков электромеханического оборудования и производителей, которым нужно точно контролировать физические процессы. Система 34980A состоит из базового блока в формате LXI с восемью гнездами, интерфейсов GPIB, USB и LAN, системы сигнализации и аналоговой шины. В комплект входит ПО BenchLink Data Logger для ПК. Это ПО является мощным инструментом, позволяющим настраивать, проверять и контролировать процедуры сбора данных.

В дополнение базовому блоку 34980A на восемь гнезд компания Keysight предлагает приборы коммутации и управления серии L4400. Эти приборы в формате LXI имеют одно гнездо и предлагают те же функции и возможности, что 34980A.

Заключение

Надежные измерения температуры требуют взвешенного подхода при выборе и использовании датчика, а также при выборе правильной измерительной системы. При соблюдении надлежащих мер по предотвращению теплового шунтирования, изменения градуировочной характеристики, ухода характеристик, а также при правильном шумоподавлении можно получить надежные и воспроизводимые данные даже в самом сложном проекте температурных измерений. Современные системы сбора данных берут большую часть этой нагрузки на себя, позволяя инженерам сконцентрироваться на значимых результатах тестирования.

Чтобы узнать больше, посетите страницу www.Keysight.com/find/daq

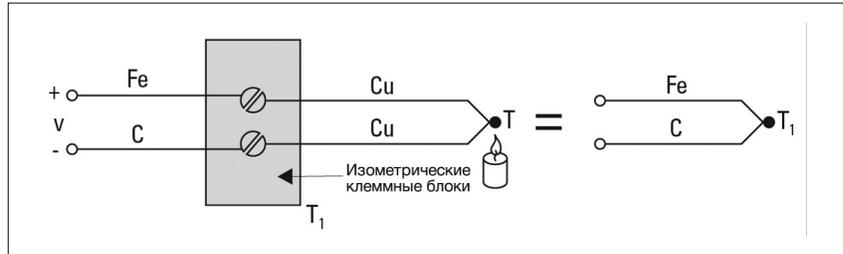
Приложение А

Эмпирические законы для термопар

Приведенные ниже примеры показывают эмпирически выведенные законы для термопар, которые полезны для понимания диагностики термопарных цепей.

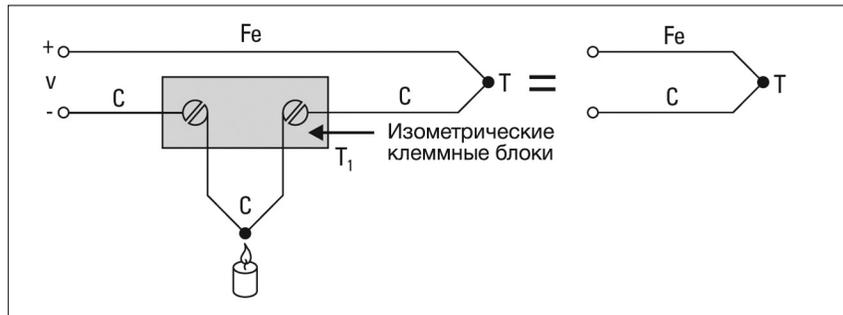
Во всех примерах предполагается, что измерительные провода однородны, то есть не имеют дефектов и примесей.

Закон промежуточных металлов



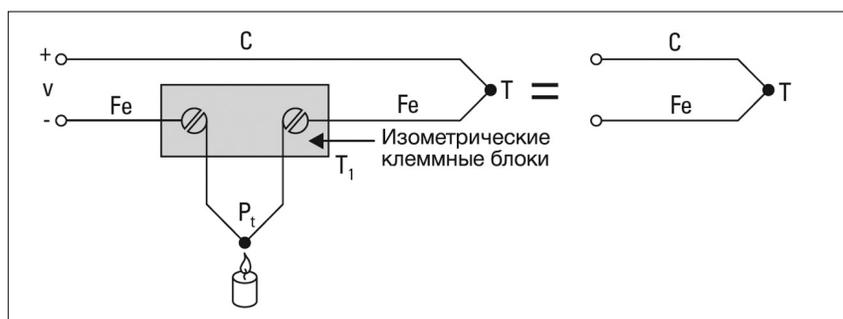
Если между проводами из железа и константана вставить медный провод, то это не изменит выходного напряжения V вне зависимости от температуры этого медного провода. Выходное напряжение V термопары Fe-C соответствует температуре T_1 .

Закон внутренних температур



Напряжение V на выходе термопары Fe-C соответствует температуре T , даже если любой из измерительных проводов подвергается тепловому воздействию извне.

Закон вставленных металлов



Напряжение V будет соответствовать напряжению, подаваемому термопарой Fe-C при температуре T , при условии, что оба конца платиновой проволоки имеют одинаковую температуру. Две термопары, созданные с помощью платиновой проволоки (Fe-Pt и Pt-Fe), генерируют термоЭДС противоположных направлений.

Во всех приведенных выше примерах считается, что измерительные провода не имеют неоднородностей и примесей.

Приложение Б

Характеристики термопар

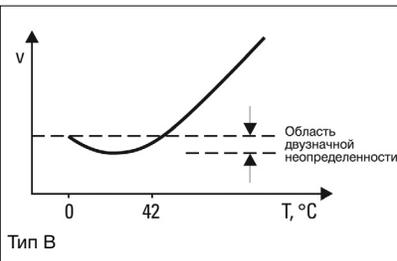
За прошедшие годы были разработаны специальные пары термопарных сплавов для решения уникальных задач измерения. Ниже мы поговорим об особенностях наиболее распространенных термопар.

Мы будем использовать термин «стандартная погрешность измерения» из общей коммерческой спецификации, опубликованной в ежегодном сборнике стандартов Американского общества по испытанию материалов (ASTM). Эта характеристика представляет собой допустимое отклонение фактического выходного напряжения термопары от табличного значения напряжения из Монографии 175 NIST.

Термопары из благородных металлов. Термопары из благородных металлов относятся к типам В, R и S. Это платинородий-платиновые и платинородий-платинородиевые термопары, и поэтому многие их характеристики аналогичны.

Диффузия. Диффузия металлических паров при высоких температурах может значительно изменить градуировочную характеристику платиновой проволоки, поэтому проволоку всегда помещают в неметаллическую оболочку, например, из оксида алюминия высокой чистоты. Единственным исключением из этого правила является оболочка из платины, но она непозволительно дорогая.

Стабильность. Термопары на основе платины на сегодняшний день являются наиболее стабильными из всех общераспространенных термопар. Термопары типа S настолько стабильны, что используются в качестве калибровочного стандарта температурной шкалы между точками плавления сурьмы (+630,4 °C) и золота (+1064,43 °C).



Тип В Термопара типа В из всех типов термопар единственная характеризуется двузначной неопределенностью.

В силу температурной характеристики с двузначной неопределенностью и очень малого коэффициента Зеебека при низких температурах термопары типа В практически бесполезны при температурах ниже +50 °C. Но поскольку выходное напряжение термопары типа В при температуре от 0 °C до +42 °C практически нулевое, то ее уникальное преимущество заключается в том, что температура холодного спая не играет роли, пока она находится в диапазоне от 0 °C до +40 °C. Естественно, что температура горячего спая обычно бывает очень велика.

Термопары из неблагородных металлов

В отличие от термопар из благородных металлов, термопары из неблагородных металлов не имеют определенных требований к химическому составу. Можно комбинировать любые металлы. Главное, чтобы полученная зависимость напряжения от температуры не выходила за пределы, установленные погрешностью измерения. Это приводит к появлению ряда очень интересных комбинаций. К примеру, константан – это вовсе не конкретный металлический сплав, а общее название группы медно-никелевых сплавов. Невероятно, но константан, используемый в термопаре типа Т (медь-константан), это совсем не тот сплав, что используется в паре типа J (железо-константан).³

Тип Е. Хотя для термопар этого типа стандартная погрешность измерения не оговорена для температур ниже 0 °C, они идеально подходят для низкотемпературных измерений благодаря высокому коэффициенту Зеебека (58 В/°C), низкой теплопроводности и высокой стойкости к коррозии.

Коэффициент Зеебека термопар типа Е выше, чем у других стандартных термопар, что очень полезно для обнаружения небольших изменений температуры.

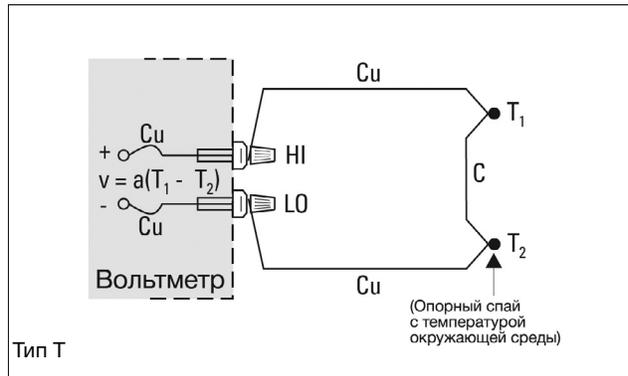
Тип J. Железо, являющее «положительным» электродом термопары типа J, – недорогой металл, который редко выплавляют в чистом виде. Из-за наличия примесей в железе температурные характеристики термопар типа J плохо соответствуют стандартным характеристикам. Несмотря на это, такие термопары широко применяются благодаря высокому коэффициенту Зеебека и низкой цене.

Термопары типа J не следует использовать при температуре более +760 °С, поскольку при температуре происходит резкое изменение магнитных свойств железа, приводящее к нарушению градуировочной характеристики даже при возвращении к более низким температурам.

Тип Т. Это единственный тип термопары, для которого указана стандартная погрешность при температурах ниже 0 °С; однако в реальности тип Е более удобен для применения при очень низких температурах из-за большего коэффициента Зеебека и меньшей теплопроводности.

Уникальным отличием термопары типа Т является то, что одна из ее проволок медная. Это является преимуществом при выполнении специальных исследований, когда нужно контролировать только разность температур.

Преимущество медной проволоки заключается и в том, что зажимы цифрового вольтметра тоже изготавливают из меди, что делает компенсацию влияния соединительного провода ненужной.



Типы К и N. Термопары типа К долгое время были очень распространены. Благодаря высокой стойкости к окислению они очень хорошо подходили для высокотемпературных измерений.

В настоящее время термопары типа N становятся всё более популярной заменой типу К. Из-за меньшего коэффициента Зеебека их выходной сигнал ниже, но они более стойки к окислению. Выходная характеристика термопары типа N зависит от сечения проволоки, поэтому в монографии 175 NIST опубликованы две разные характеристики этих нихросил-нисиловых термопар для разных сечений и диапазонов температур.¹⁴

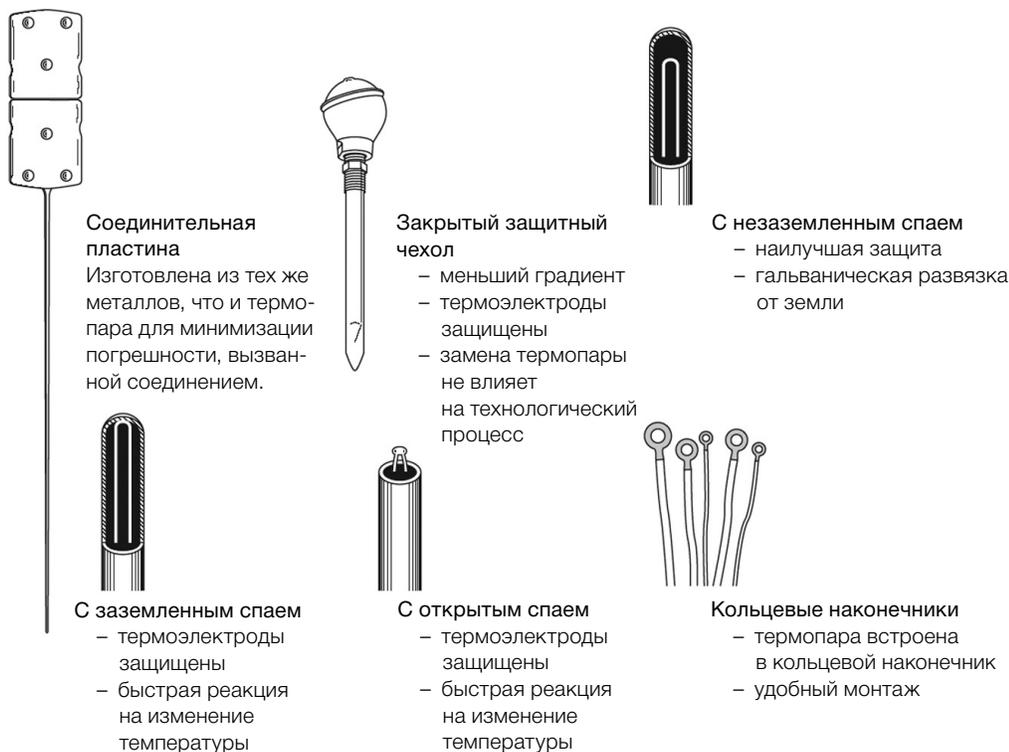
Вольфрам. Существуют три распространенных типа вольфрамовых термопар. В них вольфрам сплавлен с рением, чтобы сделать металл более пластичным.

Тип G* W и W с 26 % Re
 Тип C* W с 5 % Re и W с 26 % Re
 Тип D* W с 3% Re и W с 25% Re

Вольфрамовые термопары используются для измерения очень высоких температур в вакууме или инертной атмосфере.

* Не соответствует обозначениям Американского института стали и сплавов (ANSI)

Конструкция термопар



Тип	Металл		Стандартный цветовой код США		Сопротивление, Ом/2 фута при +20 °C 20 AWG	Кэф-фициент Зеебека S (мкВ/°C) при T (°C)	Погрешность измерения, °C	Диапазон температур NIST*		
	+	-	+	-				Диапазон температур, °C	Допустимое отклонение	Специальные допуски
B	Платина с 30 % Родия	Платина с 6% Родия	Серый	Красный	0,22	5,96 600	от +870 до +1700	± 0,5 %	± 0,25%	от 0 до +1820
E	Никель с 10 % Хрома	Константан	Фиолетовый	Красный	0,71	58,67 0	от 0 до +900	± 1,7 или ± 0,5 %	± 1 или ± 0,4%	от -270 до +1000
J	Железо	Константан	Белый	Красный	0,36	50,38 0	от 0 до +750	± 2,2 или ± 0,75%	± 1,1 или ± 0,4%	от -210 до +1200
K	Никель с 10 % Хрома	Никель	Желтый	Красный	0,59	39,45 0	от 0 до +1250	± 2,2 или ± 0,75%	± 1,1 или ± ,4%	от -270 до +1372
N	Нихросил	Нисил	Оранжевый	Красный	0,78	25,93 0	от 0 до +1250	± 2,2 или ± 0,75%	± 1,1 или ± 0,4%	от -270 до +1300
R	Платина с 13% Родия	Платина	Черный	Красный	0,19	11,36 600	от 0 до +1450	± 1,5 или ± 0,25%	± 0,6 или ± 0,1%	от -50 до +1768
S	Платина с 10% Родия	Платина	Черный	Красный	0,19	10,21 600	от 0 до +1450	± 1,5 или ± 0,25%	± 0,6 или ± 0,1%	от -50 до +1768
T	Медь	Константан	Синий	Красный	0,30	38,75 0	от 0 до +350	± 1 или ± 0,75%	± 0,5 или ± 0,4%	от -270 до +400

* Диапазон температур указан для проволоки сечением 8 AWG. При уменьшении сечения он сужается.

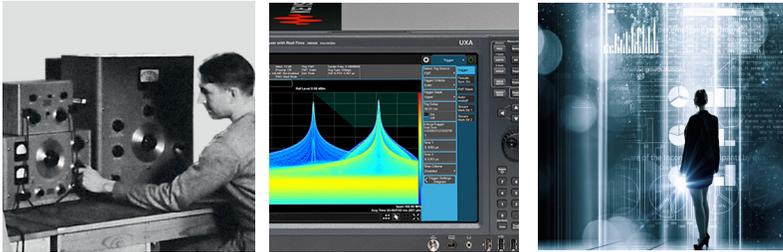
Список литературы

1. Charles Herzfeld, F.G. Brick wedde: *Temperature - Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 3, Part 1, Reinhold, New York, 1962.
2. Robert P. Benedict: *Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.
3. *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, Fourth Edition*, Revision of ASTM Special Publication 470B, Philadelphia, PA., 1993.
4. *Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90*, NIST Monograph 175, National Institute of Standards and Technology, Washington, D.C., 1993
5. H. Dean Baker, E.A. Ryder, N.H. Baker: *Temperature Measurement in Engineering*, Omega Press, Division of Omega Engineering Inc.
6. *Temperature Measurement Handbook 1983*, Omega Engineering, Stamford, Connecticut, 06907.
7. R.L. Anderson: *Accuracy of Small Diameter Sheathed Thermo-couples for the Core Flow Test Loop*, Oak Ridge National Laboratories, ORNL-5401, (available from National Information Service), April, 1979.
8. R.P. Reed: *Branched Thermo- couple Circuits in Underground Coal Gasification Experiments*, Proceedings of the 22nd ISA International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, 1976.
9. R.J. Moffat: *The Gradient Approach to Thermocouple Circuitry, from Temperature- Its Measurement and Control in Science and Industry*, Reinhold, New York, 1962.
10. R.P. Reed: *A Diagnostics- oriented System for Thermocouple Thermometry*, Proceedings of 24th ISA International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, 1978.
11. Harry R. Norton: *Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems*, Prentice- Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
12. C.H. Meyers: *Coiled Filament Resistance Thermometers*, NBS Journal of Research, Vol. 9, 1932.
13. Bulletin 9612, Rev. B: *Platinum Resistance Temperature Sensors*, Rosemount Engineering Co., 1962.
14. Burley, Powell, Burns, & Scroger: *The Nicrosil vs. Nisil Thermo-couple: Properties and Thermoelectric Reference Data*, NBS Monograph 161, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 1978.
15. J.P. Tavener: *Platinum Resistance Temperature Detectors - State of the Art, Measurements & Control*, Measurements & Data Corporation, Pittsburgh, PA., April 1974.
16. J.P. Evans and G.W. Burns: *A Study of Stability of High Temperature Platinum Resistance Thermometers, in Temperature - Its Measurement and Control on Science and Industry*, Reinhold, New York, 1962.
17. D.D. Pollock: *The Theory and Properties of Thermocouple Elements*, ASTM STP 492, Omega Press, Ithaca, New York, 1979.
18. *YSI Precision Thermistors*, Yellow Springs Instruments, Inc., Yellow Springs, Ohio, 1977.
19. R.P. Reed: *Thermoelectric Thermometry. A Functional Model, from Temperature - Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 5, American Institute of Physics, N.Y. 1982.

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От HewlettPackard и Agilent к Keysight.



Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительств приведен на сайте:

www.keysight.com/find/contactus

Российское отделение Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954;

8 800 500 9286

(звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-9-7-17)

DEKRA Certified
ISO 9001 Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

Система управления качеством Keysight Technologies, Inc. сертифицирована DEKRA по ISO 9001:2015

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Индивидуальная подборка наиболее важной для вас информации.

www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомления о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES Accelerate Technology Adoption. Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.

Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

