

УДК 621.38

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОПАР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Подловкин Е.А., Лебедев В.В.

Научный руководитель – старший преподаватель Михальцевич Г.А.

Термопара является простым, широко используемым компонентом для измерения температуры.

Термопара, показанная на рисунке 1, состоит из двух проводников разнородных металлов, соединённых вместе на одном конце, называемом измерительным («горячим») спаем. Другой конец, где проводники не соединены, подключен к дорожкам схемы обработки сигнала, обычно сделанным из меди. Это переход между металлами термопары и медными дорожками называется эталонным («холодным») спаем.



Рисунок 1 – Устройство термопары

Напряжение, генерируемое эталонным спаем, зависит от температуры и на измерительном, и на эталонном спае. Поскольку термопара является дифференциальным устройством, а не прибором для измерения абсолютной температуры, температура эталонного спае должна быть известной, чтобы получить точные показания абсолютной температуры. Этот процесс известен как компенсация эталонного спае (компенсация холодного спае).

Термопары используются в стандартных промышленных методах экономически эффективного измерения температуры в широком диапазоне с приемлемой точностью. Они используются в разнообразных применениях вплоть до $+ 2500^{\circ}\text{C}$ в бойлерах, водонагревателях, печах и самолетных двигателях, и т.д. Наиболее популярной термопарой является термопара типа *K*, состоящая из хромеля и алюмели (марки сплава никеля, содержащие хром и алюминий, магний и кремний соответственно), с температурным диапазоном от $- 200$ до $+ 1250^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим преимущества от использования термопар.

- Температурный диапазон. Наиболее реальные температурные диапазоны – от криогеники до выхлопа реактивного двигателя – могут быть перекрыты при помощи термопар. В зависимости от использованного металла проводников, термопара способна измерять температуру в диапазоне от $- 200$ до $+ 2500^{\circ}\text{C}$.

- Высокая надёжность. Термопары являются прочными приборами, невосприимчивыми к удару и вибрации и подходящими для использования в опасных окружающих условиях.

- Быстрый отклик. Благодаря небольшим размерам и низкой теплоёмкости, термопары быстро откликаются на изменения температуры, особенно если воздействию подвергается измерительный спай. Они могут реагировать на быстро изменяющуюся температуру в пределах нескольких сотен миллисекунд.

- Отсутствие само разогрева. Поскольку термопары не требуют энергии питания, они не подвержены само разогреву и от природы безопасны.

Сейчас рассмотрим недостатки от использования термопар.

- Сложная обработка сигнала. Необходима существенная обработка сигнала, чтобы преобразовать напряжение термопары в полезные показания температуры. Традиционно обработка сигнала требовала больших затрат времени, чтобы избежать привнесённых погрешностей, которые снижали точность.

- Точность, кроме внутренних неточностей в термопарах, обусловленных их металлургическими свойствами, измерение при помощи термопары является настолько точным, насколько точно может быть измерена температура эталонного спая, традиционно в пределах $1...2^{\circ}\text{C}$.

- Подверженность коррозии. Поскольку термопары состоят из двух разнородных металлов, в некоторых окружающих условиях коррозия с течением времени может привести к ухудшению точности. Следовательно, им может потребоваться защита, а уход и техническое обслуживание являются неотъемлемыми процедурами.

- Подверженность помехам. При измерении изменений сигнала на уровне микровольт, помехи от паразитных электрических и магнитных полей могут быть проблемой. Скручивание пары проводов термопары может значительно снизить наводку от магнитного поля. Использование экранированного кабеля или укладка проводов в металлический лоток и защитный экран могут снизить наводку от электрического поля. Измерительное устройство должно обеспечивать фильтрацию сигнала либо на аппаратном, либо на программном уровне, с интенсивным подавлением частоты сети (50 или 60 Гц) и её гармоник.

Рассмотрим проблемы измерения при помощи термопар.

По многим причинам нелегко преобразовать напряжение, генерируемое термопарой, в точные показания температуры: сигнал напряжения является небольшим, взаимосвязь температура-напряжение является нелинейной, эталонный спай требует компенсации, а термопары могут создавать проблемы заземления.

Рассмотрим эти проблемы по очереди.

Сигнал напряжения мал. Большинство общеупотребительных термопар относятся к типам *J*, *K* и *T*. При комнатной температуре их напряжение изменяется на $52 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$, $41 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ и $41 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ соответственно. Другие, менее известные типы имеют даже меньший температурный коэффициент напряжения. Этот небольшой сигнал требует каскада с большим усилением перед аналого-цифровым преобразованием.

Таблица 1 сравнивает чувствительности различных типов термопар.

Таблица 1 – Изменение напряжения в зависимости от температуры (коэффициент термоЭДС) для различных типов термопар при 25°C

Тип термопары	Коэффициент термоЭДС мкВ/ $^{\circ}\text{C}$
<i>E</i>	61
<i>J</i>	52
<i>K</i>	41
<i>N</i>	27
<i>R</i>	9
<i>S</i>	6
<i>T</i>	41

Поскольку сигнал напряжения является небольшим, схема обработки сигнала обычно нуждается в усилении 100 В/В или около этого – фактически простое согласование сигнала.

Более трудным может быть распознавание истинного сигнала из помех, собираемых выводами термопары. Выводы термопары являются длинными и часто прокладываются в электрически зашумленном окружении. Помехи, считанные выводами, могут легко поглотить ничтожный сигнал термопары.

Чтобы выделить сигнал из помех, обычно сочетают два подхода. Первым является использование усилителя с дифференциальным входом, такого как измерительный усилитель, чтобы усилить сигнал. Поскольку большие помехи появляются на обоих проводах (синфазно), дифференциальное измерение их устраняет. Вторым является низкочастотная фильтрация, которая удаляет внеполосные помехи. Низкочастотный фильтр должен удалять и радиочастотные помехи (свыше 1 МГц), которые могут вызвать выпрямление в усилителе, и фон 50/60 Гц (источник питания). Важно расположить радиочастотный фильтр перед усилителем (или использовать усилитель с отфильтрованными входами). Расположение фильтра 50/60 Гц часто не критично – он может сочетаться с радиочастотным фильтром, располагаться между усилителем и АЦП, быть частью сигма-дельта-АЦП либо может быть заложен в программное обеспечение в качестве фильтра усреднения.

Компенсация эталонного спая. Температура эталонного спая термопары должна быть известной, чтобы получить точные показания абсолютной температуры. Когда термопары использовались впервые, это делали путём содержания эталонного спая в ванне со льдом, пример которой изображен на рисунке 2.

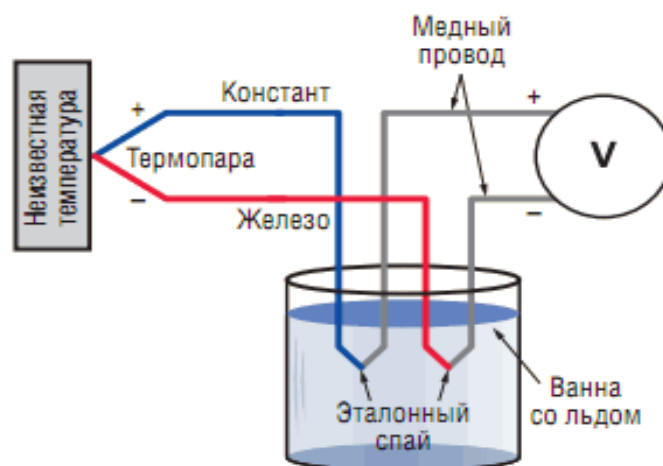


Рисунок 2 – Эталонный спай термопары находится в ванне со льдом

Рисунок 2 изображает цепь термопары с одним концом при неизвестной температуре и другим концом в ванне со льдом (0°C). Этот метод был использован для исчерпывающего исследования параметров различных типов термопар, следовательно, почти все таблицы термопар используют (0°C) в качестве эталонной температуры.

Однако содержание эталонного спая термопары в ванне со льдом является непрактичным для большинства систем измерения. Вместо этого большинство систем используют технологию, называемую компенсацией эталонного спая (также известную как компенсация холодного спая). Температуру эталонного спая измеряют при помощи другого термочувствительного прибора – обычно микросхемы, термистора, диода или RTD (резистивного датчика температуры).

Отсчёт напряжения термопары затем корректируют для отображения температуры эталонного спая. Важно, чтобы эталонный спай был считан как можно более точно – с точностью датчика температуры, содержащегося при той же самой температуре, что и

эталонный спай. Любая погрешность в определении температуры эталонного спая отразится на конечном отсчёте показаний термопары.

Интегрированный датчик температуры.

Интегрированный датчик температуры – автономная интегральная схема (ИС), которая считывает температуру локально, должна быть тщательно установлена вблизи эталонного спая и при этом может сочетать компенсацию эталонного спая и обработку сигнала (Рисунок 3). Достижимы точности в пределах малых долей 1°C .



Рисунок 3 – Интегрированный датчик температуры

Сигнал напряжения является нелинейным. Наклон графика характеристики термопары изменяется в зависимости от температуры. Например, при 0°C выход термопары T -типа изменяется на $39 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$, но при 100°C наклон возрастает до $47 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$.

Существуют три стандартных метода компенсации нелинейности термопары. Выбрать часть графика, которая является относительно плоской, и аппроксимировать наклон как линейный в данной области – подход, который работает особенно хорошо для измерений в ограниченном диапазоне температур. Он не требует сложных вычислений. Одной из причин, по которой термопары K - и J -типа являются популярными, является то, что они имеют большие промежутки температуры, для которых возрастающий наклон чувствительности (коэффициент термоЭДС) остаётся фактически постоянным.

Другим подходом является сохранение в памяти просмотровой таблицы, которая соотносит набор напряжений термопары с её относительной температурой. Затем используется линейная интерполяция между двумя ближайшими пунктами таблицы для получения других значений температуры.

Третьим подходом является использование уравнений высокого порядка, которые моделируют поведение термопары. Хотя этот метод имеет наибольшую точность, он также является самым затратным по вычислениям. Для каждой термопары существуют два набора уравнений. Один набор преобразовывает температуру в напряжение термопары (полезное для компенсации эталонного спая). Другой набор преобразовывает напряжение термопары в температуру. Все эти таблицы и уравнения основаны на температуре эталонного спая (0°C). Компенсация эталонного спая должна быть использована, если он находится при любой другой температуре.

Рассмотрим требования к заземлению.

Промышленность выпускает термопары и с изолированными, и с заземлёнными наконечниками для измерительного спая. Обработка сигнала термопары должны быть спроектирована так, чтобы избежать петель заземления при измерении заземлённой термопарой, а также иметь контур для входных токов усилителя, когда измерение производится изолированной термопарой. Кроме того, если наконечник термопары заземлён, входной диапазон усилителя должен выдерживать любые разности в потенциалах заземления между наконечником термопары и землёй системы измерения.

Система обработки с двойным питанием для неизолированных систем будет, как правило, более устойчивой для заземлённого наконечника и незащищённых типов наконечников. Из-за своего широкого диапазона синфазного входного напряжения, усилитель с двойным питанием может обрабатывать большое дифференциальное напряжение между заземлением печатной платы и землёй наконечника термопары.

Системы с одним источником питания могут работать удовлетворительно во всех трёх вариантах наконечников, если диапазон синфазного сигнала усилителя имеет некоторую возможность измерять потенциал ниже заземления в конфигурации с одним источником питания.

Для преодоления ограничения по синфазному сигналу, в системах с одним источником питания полезно сдвигать термопару к середине напряжения питания. Это хорошо работает для изолированных наконечников термопар либо если вся система измерения является изолированной. Однако это не рекомендуется для неизолированных систем, которые предназначены для измерения заземлённых или незащищённых термопар.

Литература

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Термопара>