

Обзор источников и причин погрешностей измерений температуры с помощью термопреобразователей



Возможные погрешности при использовании термоэлектрических преобразователей в измерениях температуры

Данный обзор посвящен описанию возможных причин погрешностей при измерении температуры с использованием термопреобразователей температуры (ТП). Обзор не претендует на полноту исследования рассматриваемых вопросов.

Источники погрешностей показаний ТП

1. Погрешность, вызванная фактическим отклонением сигнала чувствительного элемента термодпары от номинальных статических характеристик (НСХ)

Международные и национальные нормы предписывают предельно допустимые отклонения от НСХ термодпары в зависимости от класса точности. В качестве примера рассмотрим термодпару типа К (хромель алюмель), калиброванную по 2-му классу допуска согласно МЭК 60584 (IEC 60584). Согласно части второй данной нормы термодпара типа К, 2-го класса точности может иметь погрешность $\pm 2,5$ К или $\pm 0,75$ % температуры рабочего конца. Отсюда следует максимальная погрешность измерения равная $\pm 2,5$ К в температурном диапазоне от -40 °С до $333,3$ °С. В диапазоне от $333,3$ до 1200 °С максимально допустимая погрешность измерения будет равняться $\pm 0,75$ %, что при температуре рабочего конца 500 °С составит $3,75$ К, а при температуре рабочего конца 1000 °С - $7,5$ °С. Важно помнить, что фактическая погрешность может быть значительно ниже предельно допустимой.

2. Погрешность, вызванная использованием термоэлектродных (т.е. удлинительных и компенсационных) проводов

2.1 Использование термоэлектродного провода вне диапазона его рабочих температур

Удлинительный как и компенсационный провод, в зависимости от типа, можно эксплуатировать в пределах температурного диапазона от -25 до $+200$ °С. При использовании термоэлектродных проводов вне пределов этого диапазона могут наблюдаться значительные отклонения от НСХ измерительной цепи по сравнению с нормированными показателями. Величина значения погрешности при этом может достигать двузначных значений диапазона по шкале Кельвина. Таким образом, необходимо контролировать, чтобы температура в месте соединения термоэлемента с удлинительными и компенсационными проводами не выходила за пределы допустимой температуры использования этих проводов.

2.2 Фактическое отклонение сигнала термоэлектродного провода от номинальных статических характеристик (НСХ)

Норма МЭК 60584 часть 3 (IEC 605484-3) предусматривает предельно допустимые отклонения от НСХ для термоэлектродных проводов. Погрешности, указанные в μV выводятся из коэффициента Зеебека, соотнесенного с названной в норме температурой рабочего конца, умноженного на показатель допустимой погрешности в Кельвинах. Для того чтобы рассчитать общую погрешность последовательности измерений температуры термоэлемента и термоэлектродного провода необходимо обратиться к закону линейной суперпозиции. Согласно этому закону, коэффициент общего термонапряжения измерительной цепи выводится из суммы термонапряжений её отдельных участков и разности температур этих участков. Для расчета данной погрешности имеется следующее уравнение:

$$\sigma = \frac{E_{\text{nom.}t_h} - ((E_{TC_{\text{nom.}t_h}} + \Delta E_{TC.t_h}) - (E_{TC_{\text{nom.}t_e}} + \Delta E_{TC.t_e})) + (E_{EX_{\text{nom.}t_e}} + \Delta E_{EX.t_e})}{EMF_h}$$

где,

σ = абсолютная погрешность измерительной цепи в К/°С/°F

E_{TC} = термонапряжение чувствительного элемента термодпары

E_{EX} = термонапряжение термоэлектродного провода (удлинительный или компенсационный)

EMF_h = термоэлектродвижущая сила (ТЭДС) при заданной температуре рабочего конца в мВ/К

t°_h = температура рабочего конца /горячего спая термопары в °C/°F

t°_e = температура свободных концов чувствительного элемента термопары и термоэлектродного провода в месте их соединения.в °C/°F

Δ = фактическая погрешность пары термоэлектродов

ном. = номинальная величина

2.3. Разность температур на свободных концах положительного и отрицательного термоэлектродов термопары при их соединении с термоэлектродным проводом

В данном случае удлинительный провод имеет преимущество перед компенсационным. Токопроводящие жилы удлинительных проводов выполнены из тех же сплавов, что и токопроводящие жилы термопарных проводов. Следовательно, при использовании удлинительных проводов происходит позлектродная компенсация ТЭДС, а между чувствительным элементом термопары и удлинительным проводом не возникает либо возникает, но крайне слабое термонапряжение. В компенсационных проводах напротив, используются материалы, при использовании которых между компенсационным проводом и термопарой может возникать высокое термонапряжение. В данном случае нужно непременно следить за тем, чтобы между свободными концами термопары не возникло разницы температур, которая в свою очередь может быть вызвана радиоактивным излучением, односторонней близостью термопары к источнику температуры и пр. Погрешность в данном случае может достигать двузначных значений. Современные термопарные разъемы имеют, как правило, крайне низкий температурный градиент. Для примера рассмотрим элемент типа К (хромель-алюмель) используемый с компенсационным проводом типа КСА, температура мест соединения положительного термоэлектрода термопары и компенсационного провода составляет 95 ° С, отрицательного термоэлектрода термопары и компенсационного провода – 100 ° С. В этом случае погрешность измерения составит + 1,6 К.

Рассчитать её можно по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{E_{ном} \cdot t^{\circ}_h - (E_{ptc} \cdot t^{\circ}_h / t^{\circ}_e + E_{rex} \cdot t^{\circ}_e / t^{\circ}_c + E_{ntc} \cdot t^{\circ}_h / t^{\circ}_e + E_{nex} \cdot t^{\circ}_e / t^{\circ}_c)}{EMF_h}$$

где,

σ = общая погрешность в K/C°/F°

E_{ptc} = термонапряжение положительного термоэлектрода чувствительного элемента термопары в mV

E_{ntc} = термонапряжение отрицательного термоэлектрода чувствительного элемента термопары в mV

E_{rex} = термонапряжение положительного термоэлектрода термоэлектродного провода в mV

E_{ntc} = термонапряжение отрицательного термоэлектрода термоэлектродного провода в mV

EMF_h = ТЭДС при заданной температуре рабочего конца в mV/K

t°_h = температура рабочего конца / горячего спая термопары в °C/°F

t°_e = температура свободных концов чувствительного элемента термопары и термоэлектродного провода в месте их соединения.в °C/°F

t°_c = температура холодного спая.в °C/°F

Δ = фактическая погрешность пары термоэлектродов

ном. = номинальная величина

2.4 Несоблюдение полярности при подсоединении термоэлектродного провода к чувствительному элементу термопары

Данный вид погрешности в зависимости от типа термоэлемента и используемого удлинительного и компенсационного провода может составлять порядка 400 К. Данную погрешность легко обнаружить, если известна измеряемая температура. Погрешность можно рассчитать следующим образом:

$$\sigma = \frac{E_{TC_{nom.t^{\circ}_h}} - (E_{TC_{nom.t^{\circ}_h}} - (E_{TC_{t^{\circ}_h}} - E_{TC_{t^{\circ}_e}}) + E_{EX_{t^{\circ}_e}}))}{EMF_h}$$

Для условных обозначений: см. пункт 2.2.

2.5 Выбор термоэлектродного провода неверной градуировки

В данном случае также может иметь место значительная погрешность в измерении. Величина погрешности зависит главным образом от комбинации материалов из которой изготовлен используемый удлинительный или компенсационный провод.

Погрешность может быть рассчитана следующим образом:

$$\sigma = \frac{E_{TC_{nom.t^{\circ}_h}} - (E_{TC_{t^{\circ}_h}} - E_{TC_{t^{\circ}_e}} + E_{EX_{t^{\circ}_e}})}{EMF_h}$$

Для условных обозначений: см. пункт 2.2.

3. Погрешность, вызванная выбором ТП несоответствующей градуировки при его подключении к первичному измерительному преобразователю

Данная погрешность также может быть относительно большой и зависит от комбинации материалов, использованных в производстве первичного измерительного преобразователя. При анализе погрешности необходимо выяснить её первопричину, так как последняя может лежать как в сенсоре, так и в преобразователе.

Данный вид погрешности можно рассчитать следующим образом:

$$\sigma = \frac{E_{TC_{t^{\circ}_h}} - E_{M_{nom.t^{\circ}_h}}}{EMF_h}$$

где,

$R_{M_{nom.t^{\circ}_h}}$ = термонапряжение сопоставленное первичным измерительным преобразователем с заданной температурой рабочего конца / горячего спая термопары.

Для прочих условных обозначений: см. пункт 2.2.

4. Погрешность, вызванная наличием гальванических токов

При недостаточной изоляции друг от друга термоэлектродов чувствительного элемента термопары или включённого в измерительную цепь термоэлектродного провода либо при попадании на термоэлектроды жидкости возможно образование гальванического элемента, лежащего параллельно к паре термоэлектродов. По причине имеющего в таком случае место гораздо более высокого по сравнению с термопарой напряжения может возникать значительная погрешность измерений. Данная погрешность зависит короткозамкнутого сопротивления, т.е. увеличивается с отдалением от горячего спая. Подобные погрешности могут возникать также при использовании кислотосодержащих жидкостей. Это необходимо учитывать и следить за тем, чтобы места спая термоэлектродов после пайки хорошо зачищались и были защищены впоследствии от загрязнений.

5. Погрешность, вызванная старением металла

На качество передаваемых термопарой сигналов могут влиять многие факторы старения.

5.1 Окисление

В результате окисления может проявиться частичное изменение химического состава

термоэлектродов. В результате этого возникает термоэлектрод с измененными характеристиками ТЭДС, а также с лучшей проводимостью. Величина погрешности в данном случае зависит от степени окисления и может составлять более 100 К. На термоэлектродах, изготовленных из хромосодержащих материалов, зачастую появляется зеленоватый налет. Налет возникает ввиду присутствия незначительного количества кислорода вследствие невысокого парциального давления кислорода в окружающей атмосфере при температуре превышающей 500 С°. Присутствующего в воздухе количества кислорода достаточно для частичного окисления хрома, но не хватает для окисления никеля, что приводит к образованию неоднородного материала. Равным образом сплавы с высоким содержанием никеля очень чутко реагируют на серосодержащие газы. На границах зерна образуются сульфиды, приводящие к охрупчиванию материалов. Термоэлектроды с большим диаметром имеют больший срок службы, так как они имеют большую площадь в сечении, а процессы окисления происходят по направлению от краёв к центру

5.2 Диффузия и примеси

Погрешности, вызванные диффузией, проявляются чаще всего в термопарах, термоэлектроды которых состоят из чистого металла и подвергаются воздействию высоких температур (более 600°C). К таким термопарам относятся, прежде всего, термопары типов S и R. Примеси возникают в результате контакта с чужеродными металлами при высоких температурах. Кроме того причиной появления примесей могут стать органические материалы, содержащие такие элементы как сера, фосфор, углерод. Сера и фосфор напрямую воздействуют на термоэлектрод, в то время как углерод выступает как раскислитель. Например, при высоких температурах углерод может раскислять такие соединения как SiO₂, Al₂O₃ или MgO до соответственно Si, Al и Mg. Далее эти элементы могут диффундировать в термоэлектрод и изменить его состав и ТЭДС.

5.3 Изменения в кристаллической решетке

Структура кристаллической решетки материалов, из которых изготовлены термоэлектроды является основополагающим фактором, влияющим на количество свободных электронов. Изменение данных структур естественным образом влияет на ТЭДС различных материалов, используемых для изготовления термоэлектродов. Особенно подвержен подобному влиянию хромель. Если быстро охлаждать проволоку из хромеля в диапазоне свыше 450°C, у структуры не будет достаточно времени, чтобы перейти в упорядоченное состояние. Возникнет структура с различными типами упорядоченности кристаллической решётки и характеризующаяся вследствие этого неопределенным с точки зрения ТЭДС состоянием. При различных условиях эксплуатации термоэлектрод из хромеля по всей длине будет иметь неоднородные характеристики ТЭДС. Погрешность может достигать при этом 10 К. Термоэлектроды других типов также претерпевают изменения в структуре кристаллической решетки при воздействии на них различных температур, однако погрешности в измерениях при этом значительно меньше.

6. Погрешность, вызванная воздействием давления на термоэлектроды

Сигнал, передаваемый термоэлектродом при постоянной температуре, может меняться под воздействием давления. Величина погрешности в данном случае будет зависеть от выбранного материала термоэлектрода и силы давления.

7. Погрешность, вызванная током утечки и индуцированного напряжения

В электрических печах причиной возникновения погрешностей могут стать токи утечки и индуцированное напряжение, вызванные обмоткой накала. Избежать этого поможет использование заземленного токопроводящего чехла для термоэлектрода.

8. Погрешность, вызванная радиоактивным излучением

8.1 Поглощение тепловых нейтронов

В результате обстрела материала, используемого для изготовления термоэлектродов тепловыми нейтронами, состав материала может меняться, что в результате влияет на ТЭДС сплава. Величина погрешности при этом целиком зависит от используемого материала.

8.2 Гамма-излучение

Гамма-лучи вызывают нагревание термоэлектродов. В реакторах с высокой плотностью потока нейтронов, в зависимости от конструкции термопары и интенсивности излучения, погрешность может достигать 200 К.

9. Погрешность, вызванная механической деформацией термоэлектродов, образующих термопару

Механическая деформация также может быть причиной изменения структуры кристаллической решетки, что влияет на ТЭДС используемого материала. Даже легкие деформации способны стать причиной значительных погрешностей. При использовании термопары типа К (хромель-алюмель), разница температур твердого и мягкого состояния материала, при температуре рабочего конца 1000° С, составляет приблизительно 50 К.

10. Погрешность, вызванная недостаточным сцеплением с источником тепла

Различают два типа возникновения погрешности:

- погрешность, возникающая в тех случаях, когда чувствительный элемент находится в прямом тепловом контакте с местом измерения. Слишком кратковременное измерение может привести к плохому сцеплению, что, в конце концов, приводит к недостаточной теплопередаче.
- погрешность, возникающая в тех случаях, когда чувствительный элемент находится в опосредованном тепловом контакте с источником теплового излучения. Здесь результат напрямую зависит от возможности приема теплового излучения. Например, в случае, если сенсор находится в «теневой» области относительно источника теплового излучения, уровень сигнала будет слишком низким.

11. Погрешность, вызванная теплоотводом собственно чувствительного элемента термопары

Ввиду того, что любой температурный сенсор имеет свою собственную температуру, он за счёт одного своего присутствия уже оказывает влияние на измеряемую температуру. При использовании термопар с большим поперечным сечением следует иметь в виду, что большое сечение приведет к усиленному теплоотводу сенсора. Таким образом, то что, является преимуществом (толстый провод) при погрешностях, связанных с окислением в данной ситуации будет являться недостатком. Проще говоря: необходимо следить за тем, чтобы количество поступающей тепловой энергии было больше, чем количество отводимой.