

Бездемонтакный способ оценки достоверности показаний термоэлектрического преобразователя

ООО «ПК»Тесей» Белевцев А.В., Каржавин А.В., Каржавин В.А., Шевченко А.И.

Из физических основ термоэлектричества известен один из основных законов термоэлектрических цепей - закон аддитивности показаний по температуре. Термо-э.д.с. цепи, состоящей из двух проводников А и В, спаи которых находятся при температурах T_1 и T_N , а вдоль проводников имеется возрастающая последовательность температур изотермических участков $T_1 > T_2 > \dots > T_n$, равна алгебраической сумме термо-э.д.с. развиваемой между этими участками:

$$E_{AB}(T_1, T_N) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3) + \dots + E_{AB}(T_{N-1}, T_N) \quad (1)$$

Математически зависимость термо-э.д.с. от температуры, называемая статической характеристикой термопары, представляется в интегральном виде как:

$$E_{AB}(T) = \int_{T_1}^{T_2} S_{AB}(T) dT \quad (2)$$

также может быть выражена в виде зависимости:

$$E_{AB}(X) = \int_{X_1(T_1)}^{X_2(T_2)} S_{AB}(T) \frac{dT}{dX} dX \quad (3)$$

из которой видно, что термо-э.д.с. по длине термоэлектродов ($X_2 - X_1$) генерируется на каждом участке термоэлектродов dX , и ее значение пропорционально градиенту температуры на данном участке и дифференциальной термо-э.д.с. (чувствительности или коэффициенту термо-э.д.с.) S_{AB} на данном участке

$$S_{AB} = S_A - S_B \quad (4)$$

S_A и S_B – представляют собой коэффициенты термо-э.д.с. материала А и материала В, равные разности потенциалов, возникающей на концах проводника А и проводника В при их размещении в температурном поле с градиентом температуры, равным единице (при разности температур на концах проводника в один кельвин). Коэффициент термо-э.д.с. является характеристикой конкретного материала и зависит от температуры и состава материала.

В начальный период эксплуатации термопара имеет однородные термоэлектроды ($S_{AB} = S_{НОМ}$) и, соответственно, дает достоверные результаты в пределах погрешности своей градуировки. Со временем чувствительность $S_{НОМ}$ участков термопары, расположенных в зоне воздействия внешних факторов, изменяется в следствии физико-химических изменений происходящих в термоэлектродах под воздействием температуры и окружающей среды (рис.1), термоэлектроды становятся термоэлектрически неоднородны, что в свою очередь приводит к отклонению статической характеристики от начальной. Причем чем выше измеряемая температура, тем большие происходят изменения и больше изменяется характеристика.

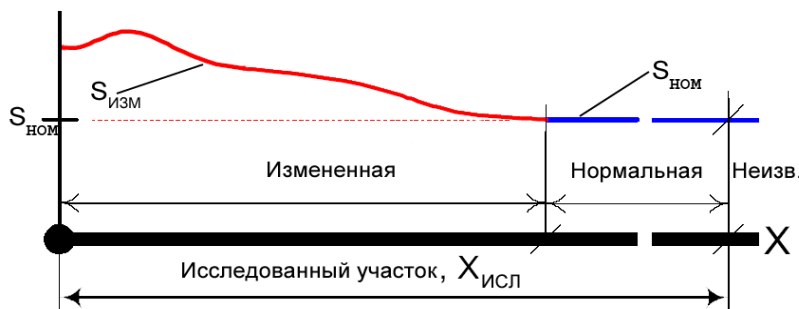


Рисунок 1. График зависимости чувствительности от координаты X.

Для контроля величины отклонения статической характеристики от её номинального значения ГОСТ 8.338-2002 предусматривает проведение периодической поверки в условиях измерительной лаборатории. Причём методически описанные в ГОСТе процедуры фактически реализуют часть, одного из известных [1] способов оценки неоднородности тер-

тически реализуют часть, одного из известных [1] способов оценки неоднородности тер-

мопары и степени её пригодности к дальнейшей эксплуатации – способа малого погружения, но проводятся для одной глубины погружения. Суть способа в том, что глубина погружения рабочего конца термопары в печь при поверке много меньше глубины погружения в условиях эксплуатации. Это обеспечивает попадание участка термоэлектродов с возникшей при эксплуатации термоэлектрической неоднородностью (ТЭН) в область больших градиентов температуры. Температуру рабочего конца термопары в этом методе определяют по точкам затвердевания чистых металлов или сличением с эталонной термопарой. Описанный способ не даёт достоверной информации о величине погрешности измерения температуры в реальных условиях эксплуатации, поскольку условия поверки в лабораторных условиях, в первую очередь глубина погружения термопары в печь и профиль температуры вдоль неё, не соответствуют реальным условиям. Кроме того, он требует снятия термопары с объекта. Периодическую поверку или оценку достоверности показаний термоэлектрического преобразователя необходимо проводить непосредственно на термометрируемом объекте при реальных условиях эксплуатации.

Известные способы поверки термопар без их демонтажа с термометрируемого объекта наряду с очевидными достоинствами не лишены недостатков. Так в одном из них [2] предлагается устанавливать два дополнительных контрольных термопреобразователя, первый из которых монтируется вместе с поверяемым, а второй – вне зоны возмущения температурного поля изучаемого объекта поверяемым и первым контрольным термопреобразователем. В другом способе [3] для обеспечения бездемонтажной периодической поверки термопары, её устанавливают в составе многоточечного (до 5 термопар) зонда и оснащают поверочным устройством. Устройство представляет собой ампулу с электрическим нагревателем внутри которой размещён металлический теплоноситель. Упомянутые способы обладают общим недостатком – необходимость размещения на объекте дополнительных устройств. Ещё один известный способ [4] предусматривает оценку погрешности измерения температуры по температуре затвердевания жидкометаллического теплоносителя, что возможно только для узкого класса конкретных объектов.

Ниже описан бездемонтажный способ оценки достоверности показаний термоэлектрического преобразователя, основанный на использовании явления Пельтье и лишённый вышеуказанных недостатков.

1. Основы метода

Данный метод основан на сравнении чувствительности участка термопары непосредственно прилегающего к спаю, с его начальной чувствительностью. Данный метод способен диагностировать термопару, без её снятия с объекта использования, непосредственно на термометрируемом объекте.

Для описания реализации способа, рассмотрим физические процессы, возникающие при протекании тока через термопару.

Явление Пельтье (1834 г., рис.2а) заключается в том, что в зависимости от направления электрического тока при его протекании через цепь, составленную из разнородных проводников, в месте контакта проводников происходит выделение или поглощение тепла. Количество выделившейся или поглотившейся в спае теплоты Q_{AB} пропорционально заряду q , прошедшему через спай:

$$Q_{\Pi} = \pi q = \pi I \tau \quad (5)$$

где $\pi = ST$ – коэффициент Пельтье, В; I – сила тока, А; τ – время, с; S – чувствительность термопары в зоне горячего спаю.

Эффект Пельтье проявляется именно в спае термопары.

Резистивный нагрев – теплота Джоуля-Ленца (1842 г.) выделяется в проводнике при пропускании через него электрического тока, вне зависимости от направления тока. Количество теплоты, выделяемое проводником, определяется по закону Джоуля-Ленца:

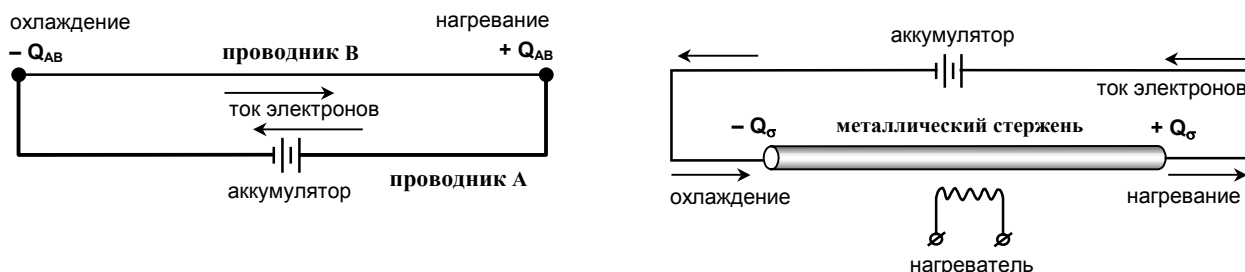
$$Q_{Дж} = I^2 R \tau \quad (6)$$

где $Q_{Дж}$ – количество теплоты Джоуля; R – сопротивление проводника; τ – время, с.

Явление Томсона (1856 г., рис.2б) заключается в том, что в зависимости от направления тока при его прохождении по однородному проводнику, вдоль которого имеется градиент температуры, в проводнике выделяется или поглощается тепло. Эта теплота выделяется (поглощается) в дополнение к выделяющейся теплоте Джоуля-Ленца (резистивный нагрев). Количество теплоты Томсона Q_σ пропорционально силе тока I и градиенту температуры ΔT :

$$Q_\sigma = \sigma I \Delta T \tau \quad (7)$$

где σ - коэффициент Томсона, В/К⁻¹.



а) Явление Пельтье

б) Явление Томсона

Рис. 2. Схемы, поясняющие явления Пельтье и Томсона.

Теплопроводность - величина подвода (отвода) тепла по термоэлектродам зависит от величины и знака градиента температуры:

$$Q_T = \Delta T \left(\frac{\lambda F}{\delta} \right) = \Delta T k \quad (8)$$

где Q_T – количество теплоты подводимое (отводимое) за счет теплопроводности, Дж;

ΔT – перепад температур, К;

λ - теплопроводность материала термоэлектродов, (В/мК);

δ - длина участка с перепадом температур, м.

F - сечение проводников, м²;

2. Описание способа.

Термопара находится на термометрируемом объекте. Глубина погружения достаточно большая, то есть район спая находится при постоянном уровне температуры. Градиент температуры приложен к участку термопары, удалённому от спая. Именно на этом участке термопары вырабатывается термо-э.д.с.

При пропускании тока через термопару, в районе спая возникают одновременно описанные выше тепловые процессы.

Здесь важно отметить, следующий факт, мы не рассматриваем эффект Томпсона, как самостоятельный тепловой процесс так как теплота Томпсона, как уже было сказано выше, выделяется или поглощается как дополнение к теплоте Джоуля, практически не изменяя её величины.

При пропускании через термопару тока прямой полярности («+» источника тока подсоединен к «+» термопары) выделившееся количество тепла будет равно:

$$Q_{ПР} = Q_{П} + Q_{ДЖ} + Q_T \quad (9)$$

где, $Q_{ПР}$ - количество теплоты при прямом пропускании тока; $Q_{П}$ - количество теплоты Пельтье; $Q_{ДЖ}$ - теплоты Джоуля; Q_T - количество теплоты отведённой от (подведённой к) спая за счёт теплопроводности.

При пропускании через термопару тока обратной полярности («+» источника тока подсоединен к «-» термопары) выделившееся количество тепла будет равно:

$$Q_{ОБР} = -Q_{П} + Q_{ДЖ} + Q_T \quad (10)$$

Выбрав соответствующим образом силу тока I и длительность импульса тока τ . получим что, $Q_{ОБР} < 0; Q_{ПР} > 0$.

В эксперименте мы не можем напрямую измерить количество выделившегося тепла. После пропускания тока по электродам в спае выделяется или поглощается тепло и происходит изменение его температуры на величину:

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{ПР(ОБР)}}}{C} \quad (11)$$

где Q - количество выделившегося (поглотившегося) тепла; C - теплоемкость района спае.

В формулах (9)-(11) нет зависимости от времени, так как все процессы происходят за один и тот же период времени τ . Из уравнений теплового баланса и учитывая что $\pi = ST$, изменение температуры спае для прямого и обратного включения будет равно:

$$\Delta T_{\text{ОБР}} = \frac{I^2 R_{\text{СП}} - ST_H I}{C - k} \quad (12)$$

$$\Delta T_{\text{ПР}} = \frac{I^2 R_{\text{СП}} + ST_H I}{C - k} \quad (13)$$

Изменения температуры мы можем зафиксировать благодаря эффекту Зеебека, измерив дополнительную термо-э.д.с., возникающую на участке термопары расположенном в непосредственной близости к спае. На остальных участках дополнительной термо-э.д.с. не возникает, поскольку существующий градиент температуры не искажается, т.к. омический нагрев равномерно изменяет температуру по длине термоэлектродов, а опорные спае термопары термостабилизированы.

Вычтем из уравнения (13) уравнение (12):

$$\Delta T_{\text{ПР}} - \Delta T_{\text{ОБР}} = \frac{2ST_H I}{C - k} \quad (14)$$

Поскольку температура спае изменяется на небольшую величину по сравнению с общим уровнем температуры, для расчета дополнительной составляющей термо-э.д.с. формулу (3) можно заменить более простой: $E = TS$, где S чувствительность при данном уровне температуры. Учитывая эту замену, преобразуем формулу (14). Обозначим через $\Delta E_{\text{ПР}}$ дополнительную составляющую термо-э.д.с. при прямом включении, через $\Delta E_{\text{ОБР}}$ дополнительную составляющую термо-э.д.с. при обратном включении.

$$\frac{\Delta E_{\text{ПР}} - \Delta E_{\text{ОБР}}}{S} = \frac{2ST_H I}{C - k} \quad (15)$$

и выразим значение S :

$$S = \sqrt{\frac{(C - k)(\Delta E_{\text{ПР}} - \Delta E_{\text{ОБР}})}{2T_H I}} \quad (16)$$

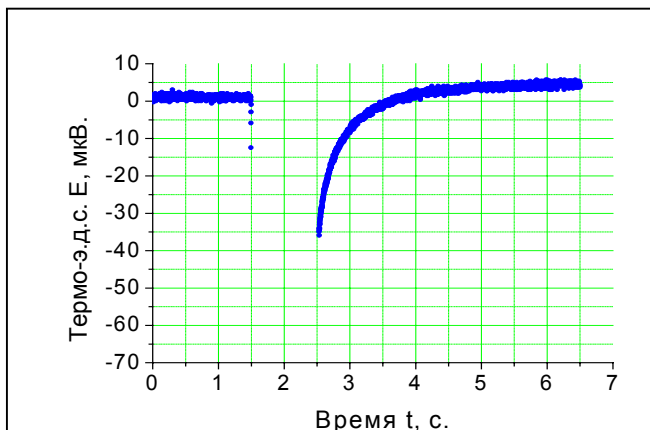


Рисунок 3а. Изменение температуры при пропускании тока в обратном направлении.

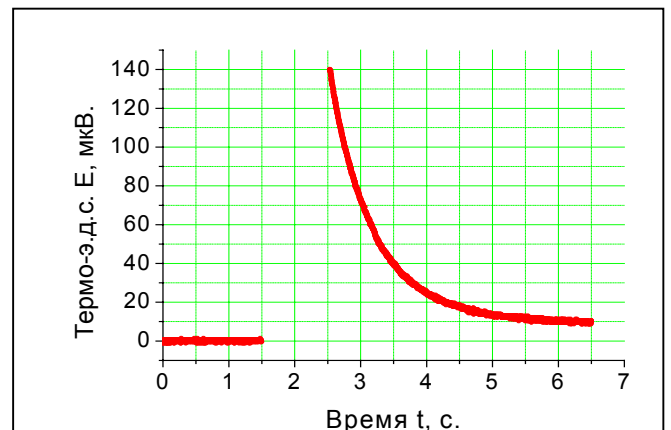


Рисунок 3б. Изменение температуры при пропускании тока в прямом направлении.

При вводе в эксплуатацию термопары мы проводим описанные измерения, непосредственно на термометрируемом объекте в рабочих условиях, и фиксируем значения $\Delta E_{ПР}$ и $\Delta E_{ОБР}$ (рис.3а, 3б)

В дальнейшем процессе эксплуатации мы периодически проводим такие же измерения и фиксируем текущие значения $\Delta E'_{ПР}$ и $\Delta E'_{ОБР}$.

Значение чувствительности будет соответственно равно:

$$S' = \sqrt{\frac{(C - k)(\Delta E'_{ПР} - \Delta E'_{ОБР})}{2T_H I}} \quad (17)$$

Зная (16) и (17) легко вычислить изменение чувствительности участка термопары в районе спая, для этого поделим (17) на (16) и умножим на 100%.

$$\delta S = \sqrt{\frac{(\Delta E'_{ПР} - \Delta E'_{ОБР})}{(\Delta E_{ПР} - \Delta E_{ОБР})}} 100\% \quad (18)$$

По значению величины изменения чувствительности в районе спая (18), можно судить о достоверности показаний термопары.

Конечно, в общем случае, по величине изменения чувствительности в районе спая термопары нельзя точно определить величину дополнительной ошибки измерения температуры, вызванной ТЭН возникающей в процессе эксплуатации, поскольку, как мы уже подчёркивали, термо-э.д.с. генерируется на множестве участков термопары находящихся в градиенте температуры. Однако этот способ может служить индикатором достоверности показаний, т.к. если изменение чувствительности произошло в районе спая термопары, то оно, в той или иной мере, произошло и на других участках подвергшихся воздействию внешних факторов. Несомненным достоинством изложенного способа, является возможность оценки достоверности показаний термоэлектрического преобразователя без его демонтажа с термометрируемого объекта. Точную корреляцию дополнительной ошибки в зависимости от изменения чувствительности термопары в районе спая можно провести на основе статистической обработки экспериментальных данных по изучению неоднородности конкретных термопар, отработавших определённое время, в конкретных условиях.

Описанный способ прошёл первоначальную экспериментальную апробацию в измерительной лаборатории ПК «Тесей» и доказал свою работоспособность. На описанный способ подана заявка на изобретение.

1. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар. Справочник. М.: Металлургия, 1983
2. Авторское свидетельство СССР 1506300 кл. G 01K 15/00, 1989
3. Лысиков Б.В., Прозоров В.К. Реакторная термометрия. – М. : Атомиздат, 1980
4. Левин М.Н. Патент 2160433 G01K 15/00 Способ определения погрешности измерения температуры.