

Бездемонтакжный способ оценки достоверности показаний термоэлектрического преобразователя

А.В. Белевцев
А.В. Каржавин
В.А. Каржавин
А.И. Шевченко

ООО "ПК "Тесей", г. Обнинск Калужской обл.

Из физических основ термоэлектричества известен один из основных законов термоэлектрических цепей – закон аддитивности показаний по температуре. ТермоЭДС 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 термоЭДС, 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 термоЭДС от температуры, называемая статической характеристикой термопары, представляется в интегральном виде как:

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

Она 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 термоЭДС по длине термоэлектродов ($X_2 - X_1$) генерируется на каждом участке термоэлектродов dX , и ее значение про-

порционально градиенту температуры на данном участке и дифференциальной термоЭДС (чувствительности или коэффициенту термоЭДС) S_{AB} на данном участке:

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

S_A и S_B – представляют собой коэффициенты термоЭДС 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 термоЭДС 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 вследствие физико-химических процессов, происходящих в термоэлектродах под воздействием температуры и окружающей среды (рис. 1). Термоэлектроды становятся термоэлектрически неоднородными, что в свою очередь приводит к отклонению статической характеристики от начальной. Причем чем выше измеряемая температура, тем значительнее изменения в термоэлектродах и тем больше отклоняется характеристика.

Для контроля величины отклонения статической характеристики от ее номинального значения ГОСТ 8.338-2002 предусматривает проведение периодической поверки в условиях измерительной лаборатории. Описанные в ГОСТе процедуры фактически реализуют часть одного из известных способов оценки неоднородности термопары и степени ее пригодности к дальнейшей эксплуатации – способа малого погружения, но проводятся для одной глубины погружения. Глубина погружения рабочего конца термопары в печь при поверке много меньше глубины погружения в условиях эксплуатации. Тем самым участок термоэлектродов с возникшей при эксплуатации термоэлектрической неоднородностью (ТЭН) попадает в область больших градиентов температуры. Температуру рабочего конца термопары в этом методе определяют по точкам затвердевания чистых металлов или сличением с эталонной термопарой. Такой способ не дает достоверной информации о величине погрешности измерения температуры в реальных условиях эксплуатации, поскольку лабораторные условия поверки, в первую очередь глубина погружения термопары в печь и профиль температуры вдоль нее, не соответствуют реальным условиям. Кроме того, требуется снятие термопары с объекта. Периодическую поверку или оценку достоверности показаний термоэлектрического преобразователя необходимо проводить непосредственно на термометрируемом объекте при реальных условиях эксплуатации.

Известно несколько способов поверки термопар без их демонтажа с термометрируемого объекта. Так, в одном из них 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 для обеспечения бездемонтажной периодической поверки термопары ее устанавливают в составе многоточечного (до 5 термопар) зонда и оснащают поверочным устройством. Устройство представляет собой ампулу с электрическим нагревателем, внутри которой размещен металлический теплоноситель. Упомянутые способы обладают общим недостатком – необходимостью размещения на объекте дополнительных устройств. Еще один известный способ предусматривает оценку погрешности измерения

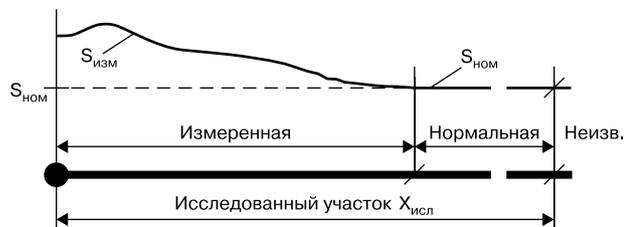


Рис. 1
Изменение чувствительности по длине термопары

температуры по температуре затвердевания жидкометаллического теплоносителя, что возможно только для узкого класса конкретных объектов.

Бездемонтажный способ оценки достоверности показаний термоэлектрического преобразователя, основанный на использовании явления Пельтье, лишен указанных недостатков. Он основан на сравнении чувствительности участка термопары, непосредственно прилегающего к спаю, с его начальной чувствительностью. Данный метод способен диагностировать термопару без ее снятия с объекта использования, непосредственно на термометрируемом объекте.

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

В спае термопары проявляется эффект Пельтье (рис. 2,а), заключающийся 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_{II} пропорционально заряду q , прошедшему через спай:

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

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

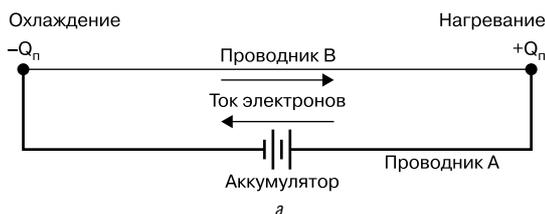
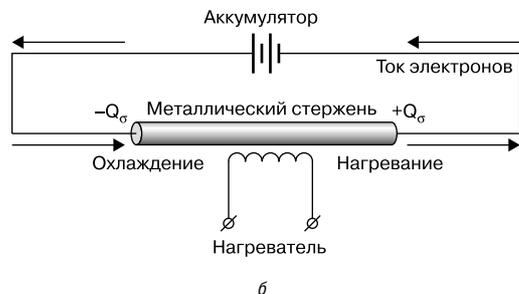


Рис. 2
Схемы, поясняющие явление Пельтье (а) и явление Томсона (б)



В проводнике при пропускании через него электрического тока (вне зависимости от его направления) выделяется теплота Джоуля–Ленца, то есть происходит резистивный нагрев. Количество выделяемой проводником теплоты определяется по закону Джоуля–Ленца:

$$Q_{\text{Дж}} = I^2 R \tau, \quad (6)$$

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

В зависимости от направления тока при его прохождении по однородному проводнику, вдоль которого имеется градиент температуры, в проводнике выделяется или поглощается тепло (рис. 2, б), то есть происходит так называемое явление Томсона. Теплота выделяется (поглощается) в дополнение к резистивному нагреву, практически не изменяя величину теплоты Джоуля–Ленца. Количество теплоты Томсона $Q_{\text{Т}}$ пропорционально силе тока I и градиенту температуры ΔT :

$$Q_{\text{Т}} = \sigma I \Delta T \tau, \quad (7)$$

где σ – коэффициент Томсона, В/К¹.

Величина подвода (отвода) тепла по термоэлектродам (теплопроводность) зависит от величины и знака градиента температуры:

$$Q_{\text{Т}} = \Delta T \left(\frac{\lambda F}{\delta} \right) = \Delta T k, \quad (8)$$

где $Q_{\text{Т}}$ – 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;
 k – тепловая проводимость стенки.

Предлагаемый способ бездемонтажной проверки термоэлектротрансформатора заключается в следующем. Термопара находится на термометрируемом объекте. Глубина погружения достаточна большая, то есть район спая находится

при постоянном уровне температуры. Градиент температуры приложен к участку термопары, удаленному от спая. Именно на этом участке термопары вырабатывается термоЭДС.

При пропускании тока через термопару в районе спая возникают одновременно явления Пельтье и Томсона.

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

$$Q_{\text{ПР}} = Q_{\text{П}} + Q_{\text{Дж}} + Q_{\text{Т}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{ПР}}$ – количество теплоты при прямом пропускании тока;

$Q_{\text{П}}$ – количество теплоты Пельтье;

$Q_{\text{Дж}}$ – количество теплоты Джоуля;

$Q_{\text{Т}}$ – количество теплоты, отведенной от спая (или подведенной к нему) за счет теплопроводности.

При пропускании через термопару тока обратной полярности (“+” источника тока подсоединен к “–” термопары) выделившееся количество тепла будет равно:

$$Q_{\text{ОБР}} = Q_{\text{П}} + Q_{\text{Дж}} + Q_{\text{Т}}. \quad (10)$$

При соответствующих силе тока I и длительности импульса тока τ $Q_{\text{ОБР}} < 0$; $Q_{\text{ПР}} > 0$.

Однако напрямую измерить количество выделившегося тепла невозможно.

После пропускания тока по электродам в спая 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 (поглощенного) тепла;

C – теплоемкость района спая.

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, учитывая, что $\pi = ST$, изменение температуры спая для прямого и обратного включения будет равно:

$$\Delta T_{\text{ПР}} = \frac{I^2 R_{\text{СП}} + ST_{\text{Н}} I}{C - k}, \quad (12)$$

$$\Delta T_{\text{ОБР}} = \frac{I^2 R_{\text{СП}} - ST_{\text{Н}} I}{C - k}. \quad (13)$$

Изменения температуры можно зафиксировать благодаря эффекту Зеебека, измерив дополнительную термоЭДС, возникающую на

участке термопары, расположенном в непосредственной близости к спаяю. На остальных участках дополнительной термоЭДС не возникает, поскольку существующий градиент температуры не искажается, так как резисторный нагрев равномерно изменяет температуру по длине термоэлектродов, а опорные спаи термопары термостабилизированы.

Разность $\Delta T_{\text{ПР}}$ и $\Delta T_{\text{ОБР}}$ (уравнения (13) и (12)) примет вид:

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

Поскольку температура спая изменяется на небольшую величину по сравнению с общим уровнем температуры, для расчета дополнительной составляющей термоЭДС формулу (3) можно заменить более простой: $E = TS$, где S – чувствительность при данном уровне температуры. С учетом этой замены формулу (14) можно преобразовать следующим образом. Если обозначить через $\Delta E_{\text{ПР}}$ дополнительную составляющую термоЭДС при прямом включении, а через $\Delta E_{\text{ОБР}}$ – дополнительную составляющую термоЭДС при обратном включении, то:

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

Тогда значение S можно выразить как:

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

При вводе в эксплуатацию термопары описанные измерения проводятся непосредственно на термометрируемом объекте в рабочих условиях и значения $\Delta E_{\text{ПР}}$ и $\Delta E_{\text{ОБР}}$ фиксируются (рис. 3).

В дальнейшем процессе эксплуатации периодически проводятся такие же измерения и фиксируются текущие значения $\Delta E'_{\text{ПР}}$ и $\Delta E'_{\text{ОБР}}$.

Значение чувствительности будет соответственно равно:

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

Зная S и S' , легко вычислить изменение чувствительности участка термопары в районе спая, для чего необходимо найти отношение (17) к (16) и умножить на 100%:

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

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

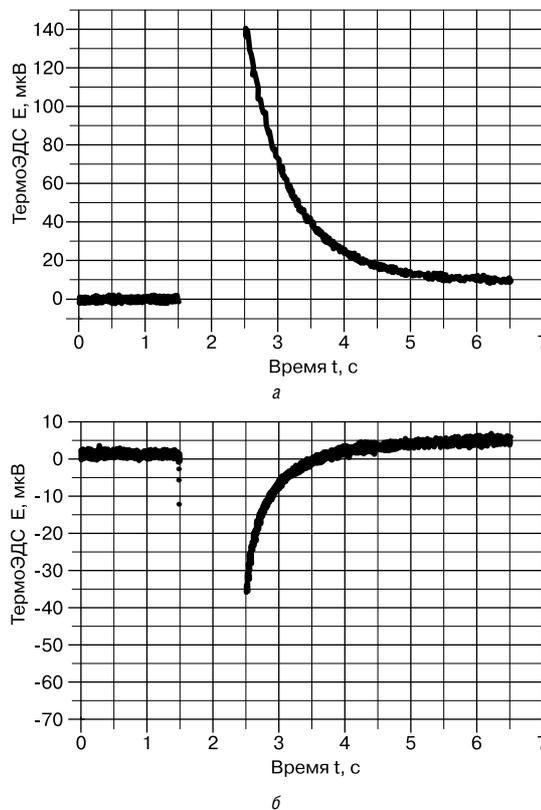


Рис. 3
Изменение температуры при пропускании тока в прямом (а) и обратном (б) направлении

Конечно, в общем случае по величине изменения чувствительности в районе спая термопары нельзя точно определить величину дополнительной ошибки измерения температуры в результате ТЭН, возникающей в процессе эксплуатации, поскольку термоЭДС генерируется на множестве участков термопары, находящихся в градиенте температуры. Однако этот способ может служить индикатором достоверности показаний, так как 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 предлагаемого 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 определенное время в конкретных условиях.

Предлагаемый способ заявлен в качестве изобретения.