

О ПОГРЕШНОСТИ АСИММЕТРИИ И ПЕРЕХОДА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Э. И. ЦИМБАЛИСТ

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

К настоящему времени основным элементом компараторов, производящих сравнение неизвестной величины переменного тока с эквивалентной ей по воздействию величиной постоянного тока, является электротепловой преобразователь, в частности, термоэлектрический (ТП).

Известно, что среди составляющих погрешности компарирования электротеплового преобразователя имеются погрешности, не зависящие от частоты и в пределе определяющие его свойства. Это погрешности вызваны проявлением эффектов Томсона и Пельтье. Речь идет о погрешности асимметрии вследствие зависимости выходной величины преобразователя от полярности постоянного тока и погрешности перехода при сравнении величин постоянного и переменного токов. Физическая сущность возникновения указанных погрешностей достаточно полно изложена в [1, 2], в [2] дается расчет погрешностей для однородной нити, отвод тепла от которой осуществляется только через токопроводящие выводы — траверсы.

Ниже излагается пример расчета погрешностей, учитывающий помимо потерь тепла из-за теплопроводности потери тепла от нагревателя за счет лучеиспускания.

Для установившегося во времени процесса баланс мощностей для элемента длины dl проводника, обтекаемого током i , можно записать следующее уравнение:

$$dP_1 + dP_2 + dP_3 + dP_4 + dP_5 = 0. \quad (1)$$

Здесь

$$dP_1 = \frac{i^2 \rho_0 (1 + \alpha \Theta)}{q} \cdot dl \quad \text{— мощность, выделяемая элементом } dl \text{ протекающим током;}$$

$$dP_2 = \lambda \cdot q \frac{d^2 \Theta}{dx^2} \cdot dl \quad \text{— мощность, получаемая элементом } dl \text{ от соседних участков (по оси);}$$

dP_3 — мощность, рассеиваемая элементом dl путем конвекции.
Для вакуумных ТП $dP_3 = 0$

$$dP_4 = -b \sigma p (T^4 - T_0^4) \cdot dl \approx -b \sigma p k \Theta dl,$$

dP_4 — мощность, отдаваемая элементом dl путем лучеиспускания;

$$dP_5 = \pm S \cdot i \frac{d\Theta}{dx} \cdot dl \quad \text{— мощность, выделяемая или поглощаемая эле-}$$

ментом dl нити в результате явления Томсона (только при протекании постоянного тока).

В указанных зависимостях:

ρ_0 — удельное сопротивление материала нити при температуре, равной T_0 °К; α — температурный коэффициент электрического сопротивления; q — сечение, p — периметр нити;

λ — коэффициент теплопроводности материала нити;

σ — постоянная Стефана — Больцмана;

b — коэффициент неполноты излучения (для ТП $b = 0,6$);

$\kappa = \frac{T_{\text{макс}}^4 - T_0^4}{T_{\text{макс}} - T_0}$ — коэффициент пропорциональности;

S — коэффициент Томсона, значение и знак которого зависят от материала;

T и T_0 — абсолютные температуры нити и окружающей среды;

$\Theta = T - T_0$ — температура перегрева участка нити.

На переменном токе уравнение (1) примет вид:

$$\Delta^2 \frac{d^2 \Theta}{dx^2} - \Theta + \Theta_\infty = 0, \quad (2)$$

где

$$\Delta^2 = \frac{\lambda \cdot q}{b\sigma p \kappa - i^2 \alpha \rho_0 / q}; \quad \Theta_\infty = \frac{i^2 \rho_0 / q}{b\sigma p \kappa - i^2 \alpha \rho_0 / q}.$$

Решение уравнения (2) при граничных условиях:

$$\Theta /_{x=0} = \Theta /_{x=l} = \Theta_1$$

равно

$$\Theta = \Theta_\infty \left\{ 1 - \frac{\text{ch} [(2x - l)/2\Delta]}{\text{ch} l/2\Delta} \right\} + \Theta_1$$

При этом температура в середине нити, где обычно закрепляется термомпара, достигает величины:

$$\Theta /_{x=l/2} = \Theta_\infty \left[1 - \frac{1}{\text{ch} l/2\Delta} \right] + \Theta_1. \quad (3)$$

На постоянном токе вследствие проявления эффектов Томсона и Пельтье имеем

$$\Delta^2 \cdot \frac{d^2 \Theta}{dx^2} \pm 2\delta \frac{d\Theta}{dx} - \Theta + \Theta_\infty = 0, \quad (4)$$

где

$$2\delta = \frac{S \cdot i}{b\sigma p \kappa - i^2 \alpha \rho_0 / q}.$$

Граничные условия (температура на концах нити) на постоянном токе будут отличаться от условий на переменном токе из-за проявления эффекта Пельтье в переходе нагреватель — траверса.

Пусть $\Theta /_{x=0} = \Theta_2 < \Theta_1$ и $\Theta /_{x=l} = \Theta_3 > \Theta_1$ для одного направления тока и $\Theta /_{x=0} = \Theta_3$, $\Theta /_{x=l} = \Theta_2$, при противоположном направлении.

С учетом граничных условий решения уравнения (4) имеют вид:

$$\Theta = \Theta_\infty - \frac{(\Theta_\infty - \Theta_1) \cdot l^{\frac{\delta x}{\Delta^2}} \cdot \text{sh} \left(\frac{l-x}{\Delta} \right) + (\Theta_\infty - \Theta_2) l^{-\frac{\delta(l-x)}{\Delta^2}} \cdot \text{sh} \left(\frac{x}{\Delta} \right)}{\text{sh} \frac{l}{\Delta}} \quad (5)$$

$$\Theta = \Theta_{\infty} - \frac{(\Theta_{\infty} - \Theta_2) l^{-\frac{\delta x}{\Delta^2}} \cdot \text{sh} \left(\frac{l-x}{\Delta} \right) + (\Theta_{\infty} - \Theta_1) l^{\frac{\delta(l-x)}{\Delta^2}} \cdot \text{sh} \left(\frac{x}{\Delta} \right)}{\text{sh} \frac{l}{\Delta}} \quad (6)$$

Подсчитав значения Θ при $x = \frac{l}{2}$ из (5) и (6), находим, что при изменении направления тока температура в середине нагревателя не меняется и равна

$$\Theta /_{x=\frac{l}{2}} = \Theta_{\infty} \left(\frac{\text{ch} \frac{\delta l}{2\Delta^2}}{\text{ch} l/2\Delta} \right) + \frac{1}{2} \frac{\Theta_1 l^{\frac{\delta l}{2\Delta^2}} + \Theta_2 \cdot l^{-\frac{\delta l}{2\Delta^2}}}{\text{ch} l/2\Delta}$$

Таким образом, наблюдающаяся у ТП погрешность асимметрии целиком определяется качеством их изготовления (отклонением установки термомпары от середины нагревателя и его неоднородностью по длине).

В отличие от переменного тока, на постоянном токе температурный максимум сдвинут относительно центра нагревателя на величину, пропорциональную коэффициенту Томсона, т. е. имеется погрешность перехода от постоянного к переменному току даже при правильном расположении термомпары ТП $\left(x = \frac{l}{2} \right)$:

$$\delta_n = \left(\frac{\Theta_{\sim} - \Theta_{=}}{\Theta_{=}} \right)_{x=l/2} \approx - \frac{\left(\frac{S \cdot i l}{4\lambda_{\text{и}q}} \right)^2}{2 (\text{ch} l/2\Delta - 1)} \quad (7)$$

Погрешность перехода, подсчитанная по (7), является максимально возможной. Действительно из-за конечных геометрических размеров термомпары погрешность перехода будет уменьшаться за счет усреднения температуры бусинкой термомпары. При этом должно наблюдаться и уменьшение погрешности асимметрии.

Наибольшего уменьшения погрешностей можно достичь при применении преобразователей, для которых эффект сдвига температуры относительно центра нити не играет существенной роли. К ним можно отнести многоэлементные ИП, эмиссионные и фотоэлектрические преобразователи на базе ламп накаливания. Выходная величина таких преобразователей, определяемая интегральным значением температуры нагревателя, а не температурой его средней точки, будет зависеть от паразитных сдвигов максимума температуры в значительно-меньшей степени. Последнее подтверждается рядом опытных данных; например, для многоэлементных ТП [1] и фотоэлектрических преобразователей погрешность асимметрии не превышает $\pm (0,01 \div 0,02)\%$, в то время как для обычных ТП эта величина достигает 1%.

В заключение автор благодарит доцента Ройтмана М. С. за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Б. Рождественская. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности. Издательство стандартов, 1964.
2. Hermach F. L. Thermal Converters as AC—DC Transfer Standards for Current and Voltage Measurements at Audio Frequencies. «Journal Research NBS», v. 48, No. 2, February, 1952.