

УДК 536.24



Микитюк П. Д.

Микитюк П. Д., канд. физ.-мат. наук^{1,2}
Микитюк О. Ю., канд. физ.-мат. наук,
доцент³



Микитюк О. Ю.

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029,
Украина, e-mail: anatyuch@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет им.
Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина,

³Высшее государственное учебное заведение Украины «Буковинский
государственный медицинский университет», Театральная площадь, 2,
Черновцы, 58002, Украина

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В НАГРЕВАТЕЛЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ПО ДЛИНЕ СОПРОТИВЛЕНИЕМ В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Исследовано распределение температуры в нагревателе со сменным сопротивлением по его длине, который используется в полупроводниковом термопреобразователе. Установлено, что максимальная локализация температуры в точке контакта нагревателя со спаем термопары позволяет увеличить температуру в его центре почти в два раза по сравнению с обычным вариантом нагревателя, что существенным образом увеличивает чувствительность термопреобразователя. Библ. 2, табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: нагреватель, термопреобразователь, распределение температуры.

Введение

В [1] указано, что целесообразным является рассмотрение возможности создания такого нагревателя для термоэлектрического измерительного термопреобразователя (ТП), который мог бы обеспечить максимальную температуру в его геометрическом центре, где, как правило, конструктивно располагают спаи ветвей термопары. Такой подход позволит существенно уменьшить тепловые потери в конструкции ТП, а, следовательно, повысить эффективность его работы.

Целью данной работы является оценка предельных возможностей такого варианта оптимизации конструкции ТП.

Модель нагревателя с переменным сопротивлением по его длине

Рассчитаем значение температуры в центре нагревателя при условии, что все тепло выделяется в нем. Расчеты проведем для марганцевого нагревателя в стеклянной изоляции с сопротивлением 16 Ом. Теплофизические свойства стекла учтем введением «эффективных» значений теплопроводности и других характеристик нагревателя.

В простейшем варианте потери тепла, которое выделяется в нагревателе, происходят

лишь вследствие теплопроводности нагревателя. Тогда для перепада температуры справедлива следующая формула [2]:

$$\Delta T_{\max} = \frac{U_H^2}{8\kappa_H \rho_H}, \quad (1)$$

где U_H – электрическое напряжение на нагревателе; κ_H , ρ_H , – теплопроводность и удельное сопротивление нагревателя, соответственно.

Подставив параметры для нагревателя, при токе $I_H = 5$ мА, получим, что максимальный перепад температуры в нагревателе $\Delta T_{\max} = 44$ °С.

В реальных ТП существенно проявляются и другие механизмы тепловых потерь. Учет тепловых потерь вследствие теплопроводности материала нагревателя и путем конвективного теплообмена, как показано в [1], может привести к уменьшению температуры в центре нагревателя в 1.5 раза. Поэтому следует ожидать, что максимальная концентрация тепла в центре нагревателя, где размещается спай ветвей термопары, может существенно повысить чувствительность ТП.

Такой вариант конструкции нагревателя может быть реализован в нагревателе с переменным сопротивлением по его длине, максимум которого приходится на точку теплового контакта термопары и нагревателя.

Для определения целесообразности такой конструкции нагревателя рассмотрим модель нагревателя, показанную на рис. 1, в которой изменение сопротивления нагревателя по его длине достигается за счет изменения его поперечного сечения.

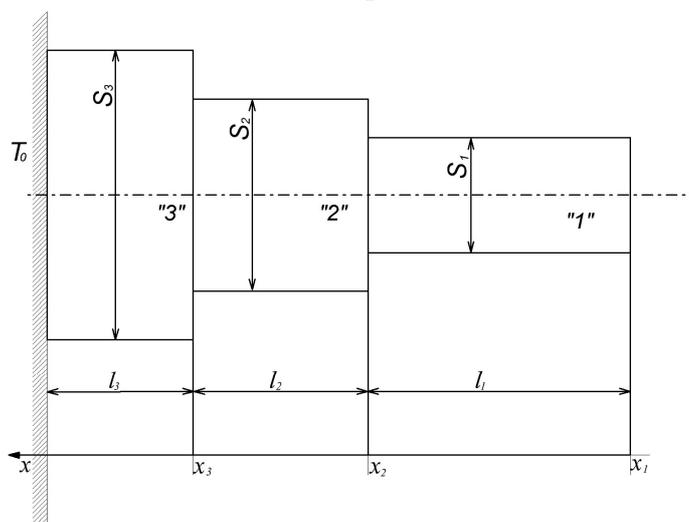


Рис. 1. Модель для расчетов распределения температуры в нагревателе со сменным поперечным сечением.

Расчеты теплового баланса нагревателя со сменным поперечным сечением

Обозначим

$$\theta_H = T(x_H) - T_0, \quad (2)$$

$$a_H = \frac{\pi d_H C_{0H}}{\chi_H S_H}, \quad (3)$$

$$b_H = \frac{\rho_H I_H^2}{\kappa_H S_H^2}, \quad (4)$$

где x_H – координата нагревателя по его длине,

$T_{x_H} - T_0$ – разность температуры на нагревателе,

d_H – диаметр нагревателя,

C_0 – коэффициент теплообмена с внешней средой,

ρ_H – удельное сопротивление нагревателя,

S_H – площадь поперечного сечения нагревателя,

I_H – ток, который проходит через нагреватель,

χ_H – теплопроводность материала нагревателя.

Тогда условие теплового баланса нагревателя можно записать следующим образом:

$$d^2\theta_i/dx_i^2 - a_i\theta_i + b_i = 0, \tag{5}$$

где $i = 1, 2, 3$.

Преобразуем выражение (5), введя новую переменную

$$X_i = x - x_i. \tag{6}$$

Так как

$$\frac{d}{dx} = \frac{dX_i}{dx} \cdot \frac{d}{dX_i} = \frac{d}{dX_i}, \tag{7}$$

то (5) приобретет следующий вид:

$$d^2\theta_i/dX_i^2 - a_i\theta_i + b_i = 0. \tag{8}$$

Решение (8) проведем для граничных условий, приведенных в таблице.

Таблица

Граничные условия для решения уравнения теплового баланса нагревателя ТП

№ п/п	x	X_i	θ_i
1.	0	$X_3 = \ell_3$	$\theta_3(x=0) = 0$; $\theta_3(x_3 - \ell_3) = 0$
2.	x_3	$X_3 = 0$ $X_2 = \ell_2$	$\theta_3(x_3) = \theta_2(x_3)$ $\theta_3(x_3) = \theta_2(x_3)$ $\theta_3(X_3 = 0) = \theta_2(X_2 = \ell_2)$ $\left[-\chi_3 S_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial X_3} \Big _{x_3=0} \cdot (+1) \right] + \left[-\chi_2 S_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial X_2} \Big _{x_2=\ell_2} \cdot (-1) \right] = 0$
3.	x_2	$X_2 = 0$ $X_1 = \ell_1$	$\theta_2(x_2) = \theta_1(x_2)$ $\theta_2(X_2 = 0) = \theta_1(X_2 = \ell_1)$ $\left[-\chi_2 S_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial X_2} \Big _{x_2=0} \cdot (+1) \right] + \left[-\chi_1 S_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial X_1} \Big _{x_1=\ell_1} \cdot (-1) \right] = 0$
4.	x_1	$X_1 = 0$	$\theta_1(x_1) = T_1 - T_0$ $\theta_1(x_1 = 0) = T_1 - T_0$ $-\chi_1 S_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial X_1} \Big _{x_1=0} = 0$

В результате сложных и громоздких преобразований, которые в данной работе не приводятся, получим формулу для максимального перепада температур в нагревателе со сменным поперечным сечением:

$$T_1 - T_0 = \frac{b_1}{a_1} - \frac{\frac{b_3}{a_2} + (\frac{b_1}{a_1} - \frac{b_2}{a_2})[chL_2 \cdot chL_3 + K_{23}shL_2 \cdot shL_3] + (\frac{b_2}{a_2} - \frac{b_3}{a_3})chL_3}{(chL_1 \cdot chL_2 + K_{12}shL_1 \cdot shL_2)chL_3 + (K_{13}shL_1 \cdot chL_2 + K_{23}chL_1 \cdot shL_2)shL_3}, \quad (9)$$

где: $L_i = \sqrt{a_i} \ell_i$, (10)

$$K_{12} = \frac{S_1 \kappa_1 \sqrt{a_1}}{S_2 \kappa_2 \sqrt{a_2}}, \quad (11)$$

$$K_{23} = \frac{S_2 \kappa_2 \sqrt{a_2}}{S_3 \kappa_3 \sqrt{a_3}}, \quad (12)$$

$$K_{13} = K_{12} \cdot K_{23} = \frac{S_1 \kappa_1 \sqrt{a_1}}{S_3 \kappa_3 \sqrt{a_3}}. \quad (13)$$

Для проверки теоретических выкладок в работе исследовался нагреватель ТП, изготовленный из двух отрезков медного микропровода и центрального отрезка, изготовленного из манганинового микропровода, соединенных между собой. Длина нагревателя не превышала 1.5 мм, причем длина его центральной части составляла 250 мкм. Диаметр микропровода равнялся 10 мкм. Выбор меди и манганина был обусловлен не только различием в удельном сопротивлении, но и возможностью сведения к минимуму паразитных эффектов, которые возникают в местах контакта разнородных материалов, поскольку манганин в паре с медью имеет наименьший коэффициент термоЭДС. Для снижения тепловых потерь боковая поверхность термопары в термопреобразователе была уменьшена. При сечении 225 мкм² ее длина не превышала 750 мкм.

Подставив в (9) вышеупомянутые числовые значения параметров и теплофизические характеристики материалов для расчетов на воздухе, получим, что в центре нагревателя с переменным поперечным сечением имеет место выигрыш по температуре почти в два раза, что подтверждается соответствующим возрастанием вольт-ваттной чувствительности ТП со сменным поперечным сопротивлением нагревателя при исследовании таких ТП.

Применение нагревателей со сменным сопротивлением по его длине дает хорошие результаты по увеличению вольт-ваттной чувствительности, однако такие существенные недостатки как нестабильность во времени, малая механическая прочность и необходимость защиты поверхности нагревателя от окисления несколько ограничивают практическое применение таких нагревателей. Более технологичным решением, могущим резко повысить качество ТП, может быть применение для нагревателей микропровода переменного сечения в стеклянной изоляции. Однако это является темой отдельных серьезных исследований.

Выводы

1. Чувствительность ТП можно существенным образом повысить путем максимальной концентрации тепла в точке контакта нагревателя и спая термопары.

2. Применение в конструкции ТП нагревателя со сменным поперечным сечением позволяет увеличить температуру в его центре почти в два раза.
3. Целесообразным является проведения исследований по созданию и применению в качестве нагревателя ТП микропровода в стеклянной изоляции со сменным поперечным сечением.

Литература

1. Микитюк П. Д. О влиянии термопары на распределение температуры в нагревателе измерительного термопреобразователя / П. Д. Микитюк, О. Ю. Микитюк. // Термоэлектричество. – 2018. – №1. – С. 78–81.
2. Анатичук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник /Л.И. Анатичук //К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.

Поступила в редакцию 05.04.2018

P.D. Mykytiuk^{1,2}, *Candidate Phys.-math. Sciences*
O.Yu. Mykytiuk³, *Candidate Phys.-math. Sciences, docent*

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine, *e-mail: anatyck@gmail.com*;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine,
e-mail: anatyck@gmail.com;

³Higher State Educational Institution of Ukraine “Bukovinian State
Medical University”, 2, Theatre Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A HEATER WITH A RESISTANCE VARIABLE ALONG ITS LENGTH IN A THERMOELECTRIC CONVERTER

This paper studies temperature distribution in a heater with variable resistance along its length which is used in a semiconductor thermal converter. It is established that maximum localization of temperature at point of contact between the heater and the thermocouple junction allows increasing the temperature in its centre almost twice as compared to conventional heater variant that significantly increases the sensitivity of thermal converter. Bibl. 2, Fig. 1, table 1.

Key words: heater, thermal converter, temperature distribution.

References

1. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Impact of thermocouple on temperature distribution in the heater of measuring thermal converter. *J. Thermoelectricity*, 1, 78-81
2. Anatyck L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva: Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].

Submitted 05.04.2018