

УДК 621.362.2



Микитюк П. Д.

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

¹Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина; e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина;
e-mail: anatysh@gmail.com

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАСКАДНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ТЭГ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Проведен анализ теплового режима работы полупроводникового термопреобразователя (ТП). Рассчитано распределение температуры в нагревателе ТП с учетом влияния окружающей среды. Предложен метод определения коэффициента теплообмена нагревателя ТП с окружающей средой. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании ТП с повышенными параметрами и характеристиками. Библ. 8, Рис. 2, Табл. 1.

Ключевые слова: термопреобразователь, нагреватель, термопара, окружающая среда.

Введение

Широкое внедрение энергосберегающих технологий во всех областях народного хозяйства требует все более качественного контроля энергетических величин переменного тока разной частоты и формы сигнала.

Несмотря на бурное развитие средств измерений, основанных на других принципах, приборы на основе термопреобразователей занимают видное место, и ведущие метрологические центры разных стран [1 – 3] проводят работы, направленные на разработку и усовершенствование термопреобразователей для государственных эталонов и образцовых средств измерения силы тока, напряжения, мощности и коэффициента мощности.

Отсутствие в Украине первичного государственного эталона электрического напряжения предопределяет необходимость пользования эталонами других стран (России) для метрологического обеспечения единицы электрического напряжения, в частности для диапазона частот, в котором работает значительная часть военной техники Вооруженных сил Украины. Отсутствие первичного эталона отрицательно влияет на качество работы такой техники.

Важным компонентом эталона является термоэлектрический преобразователь [4] переменного тока, от качества которого решающим образом зависит качество эталона в целом. При этом для создания государственных эталонов необходимы ТП повышенной точности.

Научные исследования и разработка ТП переменного тока для измерительной техники является традиционным направлением исследований Института термоэлектричества. В Институте создана теория термоэлектрических преобразователей и термоэлектрических материалов для приборов измерительной техники; разработаны и методом многофакторного

компьютерного моделирования исследованы физическая, математическая и компьютерная модели ТП [5]. Исследовано влияние физических эффектов, явлений и процессов на параметры и характеристики ТП на постоянном и переменном токах. В частности, исследовано влияние на точность ТП эффекта Томсона [6], который приводит к нарушению симметрии в распределении температур нагревателя и к смещению участка максимального нагрева в зависимости от направления тока через нагреватель. Изучено влияние эффекта Пельтье на спаях нагревателя с токоподводящими колодками. Этот эффект приводит к перераспределению температуры в нагревателе. Исследованы температурные зависимости свойств материалов термопар и нагревателя.

Однако на точность ТП существенно влияют многие другие факторы, обусловленные особенностями конструктивных элементов ТП, теплообменом между ними, теплообменом с окружающей средой, исследование которых является целью данной работы.

Тепловой режим работы ТП

Повышение чувствительности ТП $S_W = \alpha/\kappa^*$, где α – коэффициент термоЭДС термопары, а $\kappa^* = W/\Delta T$, где W – мощность на нагревателе при рабочем перепаде температур ΔT , может достигаться или за счет повышения термоэлектрической добротности материала термопар Z , или за счет улучшения эффективности использования тепла в ТП. Так как реального увеличения Z в ближайшее время не следует ожидать, проанализируем тепловой режим работы ТП. Для этого, прежде всего, необходимо знать распределение температуры вдоль нагревателя и ее значение в его центре с учетом при этом разных механизмов тепловых потерь, которые имеют место в ТП. Расчеты проводились для модели, показанной на рис. 1.

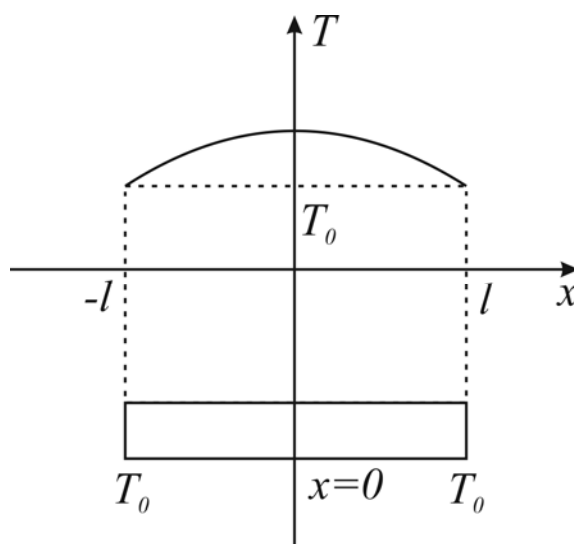


Рис. 1. Модель для расчетов распределения температуры в нагревателе ТП.

В стационарных условиях величина и распределение температур в нагревателе находятся из уравнения теплового баланса [1, 2].

$$\kappa_H S_H \frac{d^2 T}{dx^2} - C_0 P_H (T - T_0) - \varepsilon \sigma_6 P_H (T^4 - T_0^4) + \frac{\rho_0 I_H^2}{S_H} [1 + \beta(T - T_0)], \quad (1)$$

где: κ_n – коэффициент теплопроводности материала нагревателя;

S_n – поперечное сечение нагревателя;

T – абсолютная температура, определяемая текущей координатой x ;

C_0 – коэффициент теплообмена с окружающей средой;

P_n – периметр сечения S_n ;

ϵ – коэффициент излучения;

σ_6 – постоянная Стефана-Больцмана;

$\rho(\rho_0)$ – удельное сопротивление материала нагревателя при температуре $T_0(T)$;

I_n – ток, протекающий через нагреватель;

β – температурный коэффициент сопротивления (ТКО) материала нагревателя.

В уравнении (1) первый член описывает тепловой поток, обусловленный теплопроводностью материала; второй член учитывает наличие теплообмена поверхности нагревателя с окружающей средой; третий член – потери тепла на излучение; четвертый член – тепло Джоуля, выделяющееся при прохождении тока через нагреватель.

Предельные условия для уравнения (1) записывались с учетом того, что токоподводы нагревателя термостатированы при температуре окружающей среды T_0, K .

Решение уравнения (1) с учетом предельных условий приводит к выражению для разности температур в нагревателе длиной $2l$.

$$T_x - T_0 = \frac{\rho_0 I_n^2}{P_n S_n \left(C_0 + \epsilon \sigma_6 4T_0^3 - \rho_0 \beta I_n^2 / P_n S_n \right)} \cdot \left[1 - \frac{\text{ch}(Nal_x)}{\text{ch}(Nal)} \right], \quad (2)$$

где T_x – температура нагревателя в точке l_x , находящейся на расстоянии x от середины нагревателя, а

$$N = \sqrt{\frac{C_0 P_n + \epsilon \sigma_6 4T_0^3 P_n - \rho_0 \beta I_n^2 / S_n}{xS}}. \quad (3)$$

Проанализируем вклад разных механизмов теплопередачи, которые влияют на температуру в центре нагревателя, величиной которой определяется чувствительность ТП.

Расчеты проводились для марганцевого нагревателя в стеклянной изоляции. Сопротивление нагревателя составляло 16 Ом. Теплофизические свойства стекла учитывались введением "эффективных" значений теплопроводности и других характеристик нагревателя.

В простейшем случае потери тепла, которое выделяется в нагревателе, имеют место вследствие его теплопроводности. Тогда справедливой будет формула [4]

$$\Delta T_{max} = \frac{U_n^2}{8x_n \rho_n}, \quad (4)$$

где U_n – электрическое напряжение на нагревателе.

Подставив параметры для нагревателя, для тока $I_n = 5 \text{ mA}$, получаем, что максимальный перепад температур в нагревателе $\Delta T_{max} = 44^\circ$.

В реальных конструкциях ТП существенное влияние имеют и другие механизмы тепловых потерь. Учет тепловых потерь по теплопроводности материала и путем конвективного теплообмена дает следующее выражение:

$$\Delta T_{max} = \frac{\rho_0 I_H^2}{S_H P_H C_0} \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch}(Na'l)} \right], \quad (5)$$

$$\text{где } Na' = \sqrt{\frac{C_0 P_H}{\kappa_H S_H}}.$$

В формулу (5) входит коэффициент теплообмена C_0 , точное значение которого необходимо определить для каждого конкретного случая.

Определение коэффициента теплообмена с окружающей средой

Известно [7, 8] выражение для коэффициента теплообмена C_0 , с окружающей средой бесконечной тонкой нити диаметром d , размещенной в неограниченном пространстве, заполненном газом с теплопроводностью κ_r .

$$C_0 = \frac{\kappa_r}{2d}. \quad (6)$$

Однако выражение (6) для коэффициента теплообмена получено при предположениях, выполнение которых в реальных системах затруднительно. Кроме того, на коэффициент теплообмена значительное влияние оказывают конкретные условия (форма и геометрические размеры нагревателя и корпуса ТП, их взаимное расположение, ориентация относительно гравитационного поля, давление и температура окружающей среды и др.), которые трудно учесть при теоретических расчетах. Расчеты показывают, что на воздухе в вариантах конструкций ТП потери на излучение намного меньше потерь вследствие конвективного теплообмена, который составляет основную долю тепловых потерь. Поэтому был разработан метод определения коэффициента теплообмена с окружающей средой C_0 . Суть метода состоит в следующем: теоретически рассчитывается зависимость температуры нагревателя от величины коэффициента теплообмена C_0 и экспериментально определяется температура нагревателя (по температурной зависимости сопротивления). Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими расчетами дает числовое значение коэффициента C_0 .

Проверка действенности предложенного метода определения C_0 состояла в следующем.

При прохождении тока через проводник сопротивление линейного однородного нагревателя $2l$ с термостатированными концами может быть определено из выражения

$$R = \frac{1}{S_H} \int_0^{2l} \rho_0 [1 + \beta(T(x) - T_0)] dx, \quad (7)$$

а распределение температуры по длине нагревателя задается выражением (2). Если подставить (2) в (7) и провести определенные преобразования, то получим

$$\Delta R_H = \frac{I_H^2 R_0 \beta}{\kappa_H S_H} \cdot \frac{1}{y^2} \left[1 - \frac{\operatorname{th}(y)}{y} \right], \quad (8)$$

где $y = Na \cdot l$, $R_0 = \rho_0 \frac{2l}{S_H}$, $\Delta R_H = R_H - R_0$.

Выражение (8) представляет собой трансцендентное уравнение относительно неизвестной величины y . Определив экспериментально изменение сопротивления ΔR_H в зависимости от величины силы тока I_H и решив уравнение (8), можно определить величину y , а, следовательно, и C_0 .

На рис. 2 приведены экспериментально полученные зависимости ΔR_H от I_H^2 для трех нагревателей, параметры которых представлены в таблице.

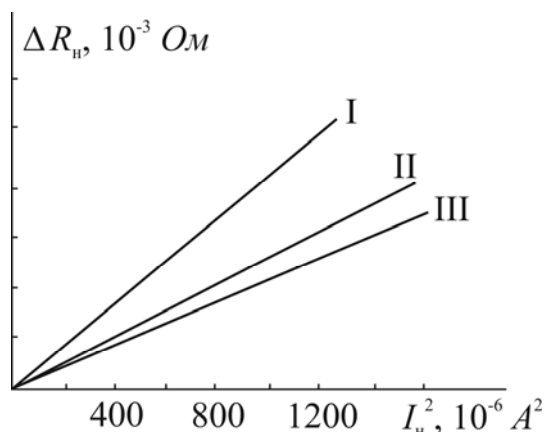


Рис. 2. Зависимость изменения сопротивления ΔR_H от квадрата силы тока
 I_H : I – серебряный микропровод, $R_H = 1$ Ом; II – медный микропровод, $R_H = 0.51$ Ом;
 III – медный микропровод, $R_H = 0.57$ Ом.

Как видно из рис. 2, ΔR_H зависит от I_H^2 линейно, что хорошо согласуется с выражением (8) при условии, что N_a от I_H не зависит, то есть вместо (3) справедливо следующее выражение

$$Na = \sqrt{\frac{C_0 P_H + \varepsilon \sigma_0 4T_0^3}{\kappa_H S_H}}. \quad (9)$$

Проведенные оценки подтверждают правильность предположения при выводе формулы (9). Отметим, что наличие линейной связи между ΔR_H и I_H^2 упрощает определение коэффициента теплообмена C_0 . Для этого можно использовать другое трансцендентное уравнение, а именно:

$$\frac{d(\Delta R_H)}{d(I_H^2)} = \frac{R_0 l \beta}{\kappa_H S_H} \cdot \frac{1}{y^2} \left[1 - \frac{\text{th}(y)}{y} \right]. \quad (10)$$

Полученные значения C_0 приведены в таблице.

Таблица

Параметры нагревателей

Тип нагревателя в стеклянной изоляции	Диаметр металлической жилы d , 10^{-6} м	Диаметр микропровода в изоляции d_c , 10^{-6} м	Электрическое сопротивление нагревателя R , Ом	ТКО 10^{-3} К $^{-1}$	Коэффициент теплообмена с окружающей средой, 10^{-3} Вт/м 2 ·К
Серебряный микропровод	7	18	1	4.033	1.8
Медный микропровод	10	20	0.51	4.033	2.3
Медный микропровод	9.6	20	0.57	4.033	2.4

Сравним полученные результаты с известным из [8] выражением (6), описывающим теплообмен бесконечно тонкой нити диаметром d , размещенной в неограниченном пространстве, заполненном газом с теплопроводностью κ_r :

$$C_0 = \frac{\kappa_r}{2d} = 0,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (11)$$

(числовое значение указано для воздуха).

Более высокое значение C_0 , полученное для ограниченного линейного нагревателя, свидетельствует о влиянии близко размещенных токоподводящих выводов и малых размеров корпуса ТП на процесс теплообмена нагревателя с окружающей средой. Различия в значениях C_0 для разных нагревателей находится в пределах погрешности эксперимента.

Выводы

1. Существенного повышения чувствительности ТП можно достичь за счет минимизации тепловых потерь между его конструктивными элементами.
2. Среди ряда факторов, которые влияют на параметры ТП, важное место занимает влияние окружающей среды.
3. Предложен эффективный метод определения коэффициента теплообмена нагревателя ТП с окружающей средой.
4. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании конкретных конструкций ТП.

Литература

1. H. Sasaki, N. Fujiki, K. Shimizume, S. Hidaka. Development of a Thermal Voltage Converter With Calculable High - Frequency Characteristics // IEEJ Trans 2011; 6: 293 – 298.
2. Lee Y.H., Kwon S.W., Kim K.J., Park S.I., Ihm Y.E. Performance improving of KRISS Micromachined Multijunction Thermal Converter // Conference of Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2004.
3. Klonz M., Laiz H., Kessler E. Development of Thin - Film Multijunction Thermal Converters at PTB/IPHT // IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 6, December, 2001.
4. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Л.И.Анатычук.- К.: Наук.

думка, 1979. – 768 с.

5. Анатычук Л.И. Дифференциальный термоэлектрический преобразователь переменного тока в режиме разновременного компарирования / Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Ташук Д.Д. // Термоэлектричество. – 2015. – № 4. – С. 77 – 82.
6. Ташук Д.Д. Оптимизация распределения температуры в термоэлектрическом измерительном преобразователе / Ташук Д.Д. // Термоэлектричество. – 2012.– №4. – С. 95 – 98.
7. Анатычук Л.И., Андрусак С.А., Боднарук В.И., Готра З.Ю. Анализ тепловых условий работы дифференциальных полупроводниковых термопреобразователей // Радиодетали и радиокомпоненты. - вып.4(29). – 1978. – с.72-77.
8. Михеев М.А. Основы теплопередачи: учеб. для вузов . – М.; Л.:Госэнергоиздат,1949.-396 с.

Поступила в редакцию 22.11.2017

P. D. Mykytiuk, *Candidate Phys.-math. Sciences*

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine; e-mail: anatyck@gmail.com;
Yurii Fedkovych Chenivtsi National University, 2, Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58012, Ukraine; e-mail: anatyck@gmail.com

FACTORS OF INFLUENCE ON THE ACCURACY OF THERMAL CONVERTERS

Analysis of thermal operating mode of semiconductor thermal converter (TC) has been made. The temperature distribution in the TC heater with regard to the environmental effect has been calculated. A method for determination of the coefficient of heat exchange of the TC heater with the environment has been proposed. The results obtained can be used in the design of TC with improved parameters and characteristics. Bibl. 8, Fig. 2, Table 1.

Key words: thermal converter, heater, thermocouple, environment.

References

1. Sasaki H., Fujiki N., Shimizume K., Hidaka S. (2011). Development of a thermal voltage converter with calculable high-frequency characteristics. *IEEJ Trans*, 6, 293-298.
2. Lee Y.H., Kwon S.W., Kim K.J., Park S.I., Ihm Y.E. (2004). Performance improving of KRISS Micromachined Multijunction thermal converter. *Conference of Precision Electromagnetic Measurements Digest* (London, England, 27 June-2 July 2004).
3. Klonz M., Laiz H., Kessler E. (2001). Development of thin - film multijunction thermal converters at PTB/IPHT. *IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement*, 50(6).
4. 4. Anatyckuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva: Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: handbook]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
5. Anatyckuk L.I., Kuz R.V., Taschuk D.D. (2015). Differential thermoelectric AC converter in the non-simultaneous comparison mode. *J. Thermoelectricity*, 4, 77 – 82.

6. Taschuk D.D. (2012). Optimization of temperature distribution in thermoelectric measuring transducer. *J. Thermoelectricity*, 4, 95 – 98.
7. Anatyshuk L.I., Andrusiak S.A., Bodnaruk V.I., Hotra Z.Yu. (1978). Analiz teplovykh uslovii raboty different yalnykh poluprovodnikovyykh termopreobrazovatelei [Analysis of thermal operating conditions of differential semiconductor thermal converters]. *Radiodetailiradiokomponenty – Radio Details and Radio Components*, 4(29), 72-77 [in Russian].
8. Mikheiev M.A. (1949). *Osnovy teploperedachi: uchebnik dlia vuzov [Fundamentals of heat transfer: manual for higher educational institutions]*. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat [in Russian].

Submitted 22.11.2017