

УДК 537



Микитюк П. Д.

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

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна, e-mail: anatyuch@gmail.com;

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatyuch@gmail.com

ПРО ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ТОЧНІСТЬ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Проведено аналіз теплового режиму роботи напівпровідникового термоперетворювача (ТП). Розраховано розподіл температури в нагрівнику ТП з врахуванням впливу оточуючого середовища. Запропоновано метод визначення коефіцієнту теплообміну нагрівника ТП з оточуючим середовищем. Отримані результати можуть бути використані при конструюванні ТП з підвищеними параметрами і характеристиками. Бібл. 8, Рис. 2, Табл. 1.

Ключові слова: термоперетворювач, нагрівник, термопара, оточуюче середовище.

Вступ

Широке запровадження енергозберігаючих технологій в усіх галузях народного господарства вимагає все якіснішого контролю енергетичних величин змінного струму різної частоти та форми сигналу.

Незважаючи на бурхливий розвиток засобів вимірювань, заснованих на інших принципах, прилади на основі термоперетворювачів посідають чільне місце, і провідні метрологічні центри різних країн [1 – 3] проводять роботи, направлені на розробку та вдосконалення термоперетворювачів для державних еталонів та зразкових засобів вимірювання сили струму, напруги, потужності та коефіцієнта потужності.

Відсутність в Україні первинного державного еталону електричної напруги зумовлює необхідність користування еталонами інших країн (Росії) для метрологічного забезпечення одиниці електричної напруги, зокрема для діапазону частот, у якому працює значна частина військової техніки. Збройних сил України. Відсутність первинного еталона негативно впливає на якість роботи такої техніки.

Важливим компонентом еталону є термоелектричний перетворювач [4] змінного струму, від якості якого вирішальним чином залежить якість еталону в цілому. Причому, для створення державних еталонів необхідні ТП підвищеної точності.

Наукові дослідження та розробка ТП змінного струму для вимірювальної техніки є традиційним напрямком досліджень Інституту термоелектрики. В Інституті створена теорія термоелектричних перетворювачів і термоелектричних матеріалів для приладів вимірювальної техніки; розроблено і методом багатофакторного комп'ютерного моделювання досліджено фізичну, математичну і комп'ютерну моделі ТП [5]. Досліджено вплив фізичних

ефектів, явищ і процесів на параметри і характеристики ТП на постійному і змінному струмах. Зокрема, досліджено вплив на точність ТП ефекту Томсона [6], який приводить до порушення симетрії в розподілі температур нагрівника і до зміщення ділянки максимального нагрівання в залежності від напрямку струму через нагрівник. Вивчено вплив ефекту Пельтьє на спаях нагрівника з струмопідвідними колодками, який приводить до перерозподілу температури в нагрівнику. Досліджено температурні залежності властивостей матеріалів термопар і нагрівника.

Однак, на точність ТП суттєвий вплив мають багато інших факторів, зумовлених особливостями конструктивних елементів ТП, теплообміном між ними, теплообміном з оточуючим середовищем, дослідження яких є метою даної роботи.

1. Тепловий режим роботи ТП

Підвищення чутливості ТП $S_W = \alpha/\kappa^*$, де α – коефіцієнт термоЕРС термопари, а $\kappa^* = W/\Delta T$, де W – потужність на нагрівнику при робочому перепаді температур ΔT , може досягатися або за рахунок підвищення термоелектричної добротності матеріалу термопар Z , або за рахунок покращання ефективності використання тепла в ТП. Так як реального збільшення Z у найближчий час не варто очікувати, проаналізуємо тепловий режим роботи ТП. Для цього, перш за все, необхідно знати розподіл температури вздовж нагрівника і її значення в його центрі з врахуванням при цьому різних механізмів теплових втрат, що мають місце в ТП. Розрахунок проводився для моделі, показаної на рис. 1.

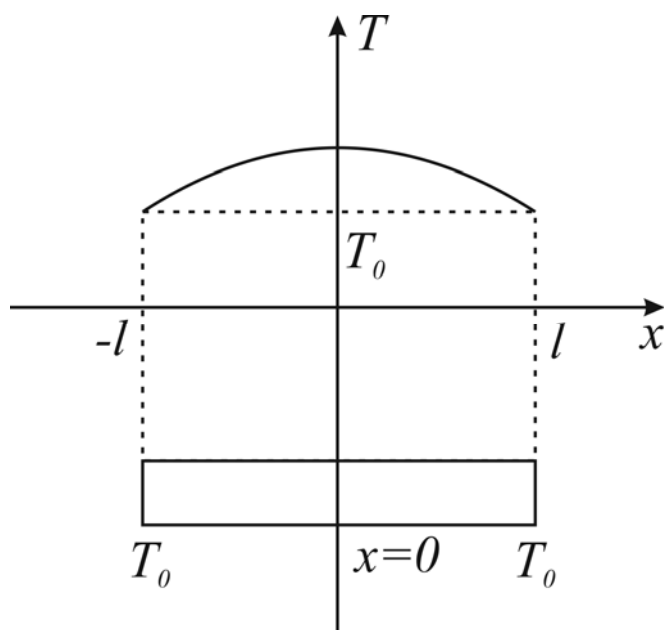


Рис. 1. Модель для розрахунку розподілу температури в нагрівнику ТП.

У стаціонарних умовах величина і розподіл температур в нагрівнику знаходиться із рівняння теплового балансу [1, 2].

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

де: κ_H – коефіцієнт теплопровідності матеріалу нагрівника;

S_H – поперечний переріз нагрівника;
 T – абсолютна температура, що визначається біжучою координатою x ;
 C_0 – коефіцієнт теплообміну з оточуючим середовищем;
 P_H – периметр перерізу S_H ;
 ε – коефіцієнт випромінювання;
 σ_6 – стала Больцмана;
 $\rho(\rho_0)$ – питомий опір матеріалу нагрівника при температурі $T_0(T)$;
 I_H – струм, що протікає по нагрівнику;
 ρ – температурний коефіцієнт опору (ТКО) матеріалу нагрівника.

У рівнянні (1) перший член описує тепловий потік, зумовлений теплопровідністю матеріалу; другий член враховує наявність теплообміну поверхні нагрівника з оточуючим середовищем; третій член – втрати тепла на випромінювання; четвертий член – тепло Джоуля, що виділяється при проходженні струму через нагрівник.

Граничні умови для рівняння (1) записувались з врахуванням того, що струмопідводи нагрівника термостатовані при температурі оточуючого середовища T_0, K .

Розв'язок рівняння (1) з врахуванням граничних умов приводить до виразу для різниці температур у нагрівнику довжиною $2l$.

$$T_x - T_0 = \frac{\rho_0 I_H^2}{P_H S_H (C_0 + \varepsilon \sigma_6 4 T_0^3 - \frac{\rho_0 \beta I_H^2}{P_H S_H})} \left[1 - \frac{\text{ch}(Nal_x)}{\text{ch}(Nal)} \right], \quad (2)$$

де T_x – температура нагрівника в точці l_x , що знаходиться на відстані x від середини нагрівника, а

$$N = \sqrt{\frac{C_0 P_H + \varepsilon \sigma_6 4 T_0^3 P_H - \frac{\rho_0 \beta I_H^2}{S_H}}{x S}} \quad (3)$$

Проаналізуємо вклад різних механізмів теплопередачі, що впливають на температуру в центрі нагрівника, величиною якої визначається чутливість ТП.

Розрахунки проводилися для манганінового нагрівника в скляній ізоляції. Опір нагрівника складав 16 Ом. Теплофізичні властивості скла враховувались введенням "ефективних" значень теплопровідності та інших характеристик нагрівника.

У найпростішому випадку втрати тепла, що виділяється в нагрівнику, мають місце за рахунок його теплопровідності. Тоді справедливою буде формула [4]

$$\Delta T_{max} = \frac{U_H^2}{8x_H \rho_H} \quad (4)$$

де U_H – електрична напруга на нагрівнику.

Підставивши параметри для нагрівника, для струму $I_H = 5 \text{ mA}$, отримуємо, що максимальний перепад температур в нагрівнику $\Delta T_{max} = 44^\circ$.

У реальних конструкціях ТП суттєвий вплив мають і інші механізми теплових втрат. Врахування теплових втрат по теплопровідності матеріалу та шляхом конвективного теплообміну дає наступний вираз:

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

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

У формулу (5) входить коефіцієнт теплообміну C_0 , точне значення якого необхідно визначити для кожного конкретного випадку.

Визначення коефіцієнту теплообміну з навколишнім середовищем

Відомий [7, 8] вираз для коефіцієнту теплообміну C_0 , з оточуючим середовищем нескінченної тонкої нитки діаметром d , розміщеної в необмеженому просторі, заповненому газом з теплопровідністю κ_r .

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

Однак вираз (6) для коефіцієнту теплообміну отриманий при умові ряду припущень, які в реальних системах важко виконати. Крім того, на коефіцієнт теплообміну великий вплив мають конкретні умови (форма і геометричні розміри нагрівника і корпусу ТП, їх взаємне розташування, орієнтація відносно гравітаційного поля, тиск і температура оточуючого середовища та ін.), які важко врахувати при теоретичних розрахунках. Розрахунки показують, що на повітрі у варіантах конструкцій ТП втрати на випромінювання є набагато меншими за втрати від конвективного теплообміну, що складає основну долю теплових втрат. Тому був розроблений метод визначення коефіцієнту теплообміну з оточуючим середовищем C_0 . Суть методу полягає в наступному: теоретично розраховується залежність температури нагрівника від величини коефіцієнту теплообміну C_0 і експериментально визначається температура нагрівника (за температурною залежністю опору). Співставлення експериментальних даних з теоретичними розрахунками дає числове значення коефіцієнту C_0 .

Перевірка дієвості запропонованого методу визначення C_0 полягала в наступному.

При проходженні струму через провідник опір лінійного однорідного нагрівника $2l$ із термостатованими кінцями може бути визначений із виразу

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

а розподіл температури по довжині нагрівника задається виразом (2). Якщо підставити (2) в (7) і провести певні перетворення, то отримаємо

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

де $y = Na'l$, $R_0 = \rho_0 \frac{2l}{S_H}$, $\Delta R_H = R_H - R_0$

Вираз (8) представляє собою трансцендентне рівняння відносно невідомої величини y . Визначити експериментально зміну опору ΔR_H у залежності від величини сили струму I_H і

розв'язавши рівняння (8) можна визначити величину y , а отже і C_0 .

На рис. 2 наведені експериментально отримані залежності ΔR_n від I_n^2 для трьох нагрівників, параметри яких подані в таблиці.

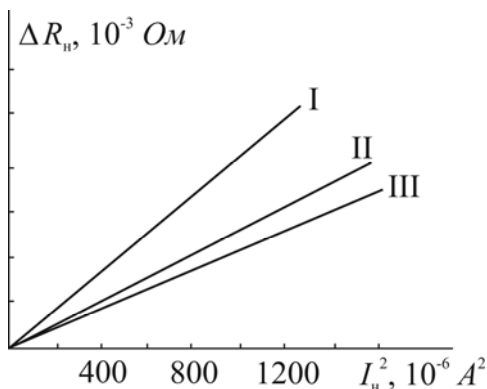


Рис. 2. Залежність зміни опору ΔR_n від квадрата сили струму I_n :
I – срібний мікропровід, $R_n=1$ Ом; II – мідний мікропровід, $R_n=0,51$ Ом;
III – мідний мікропровід, $R_n=0,57$ Ом;

Як видно з рис. $2\Delta R_n$ залежить від I_n^2 лінійно, що добре узгоджується з виразом (8) при умові, що Na від I_n не залежить, тобто замість (3) справедливим є наступний вираз

$$Na = \sqrt{\frac{C_0 P_n + \varepsilon \sigma_b 4T_0^3}{\kappa_n S_n}} \quad (9)$$

Проведені оцінки підтверджують правильність припущення при виводі формули (9). Відмітимо, що наявність лінійного зв'язку між ΔR_n і I_n^2 спрощує визначення коефіцієнту теплообміну C_0 . Для цього можна використати інше трансцендентне рівняння, а саме:

$$\frac{d(\Delta R_n)}{d(I_n^2)} = \frac{R_0 l \beta}{\kappa_n S_n y^2} \left[1 - \frac{\text{th}(y)}{y} \right] \quad (10)$$

Отримані значення C_0 наведені в таблиці.

Таблиця

Параметри нагрівників

Тип нагрівника у скляній ізоляції	Діаметр металевої жили d , 10^{-6} м	Діаметр мікропроводу в ізоляції d_c , 10^{-6} м	Електричний опір нагрівника R , Ом	ТКО 10^{-3}K^{-1}	Коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем, $10^{-3} \text{Вт/м}^2 \text{К}$
Срібний мікропровід	7	18	1	4.033	1.8
Мідний мікропровід	10	20	0.51	4.033	2.3
Мідний мікропровід	9,6	20	0.57	4.033	2.4

Порівняємо отримані результати з відомим із [8] виразом (6), що описує теплообмін нескінченно тонкої плівки діаметром d , розміщеної в необмеженому просторі, заповненому газом з теплопровідністю κ_r :

$$C_0 = \frac{\kappa_r}{2d} = 0.5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (11)$$

(числове значення вказане для повітря).

Більш високе значення C_0 , отримане для обмеженого лінійного нагрівника свідчить про вплив близько розміщених струмопідвідних виводів і малих розмірів корпусу ТП на процес теплообміну нагрівника з оточуючим середовищем. Різниця в значеннях C_0 для різних нагрівників знаходиться в межах похибки експерименту.

Висновки

1. Суттєвого підвищення чутливості ТП можна досягнути за рахунок мінімізації теплових втрат між його конструктивними елементами.
2. Серед ряду факторів, що впливають на параметри ТП важливе місце займає вплив оточуючого середовища.
3. Запропоновано ефективний метод визначення коефіцієнту теплообміну нагрівника ТП з оточуючим середовищем.
4. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні конкретних конструкцій ТП.

Література.

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 РТВ/ІРНТ // 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. Анатичук Л.І. Диференційний термоелектричний перетворювач змінного струму в режимі різночасового компарування. / Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Ташук Д.Д. // Термоелектрика. – 2015. – № 4. – С. 77 – 82.
6. Ташук Д.Д. Оптимізація розподілу температури у термоелектричному вимірювальному перетворювачі. / Ташук Д.Д. // Термоелектрика. – 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.

Надійшла до редакції 22.11.2017

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

¹Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatykh@gmail.com;
²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновцы, 58012, Украина
e-mail: anatykh@gmail.com

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: anatykh@gmail.com;
Yurii Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskiyi str.,
Chernivtsi, 58012, Ukraine; e-mail: anatykh@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 KRIS 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. Anatykhuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva: spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: handbook]*. Kyiv: Naukovadumka [in Russian].
5. Anatykhuk 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. Anatykhuk 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 dliavuzov [Fundamentals of heat transfer: manual for higher educational institutions]*. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat [in Russian].

Submitted 22.11.2017