



Микитюк П.Д.

**Микитюк П.Д.** канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>  
**Микитюк О.Ю.** канд. фіз.-мат. наук, доцент<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,  
*e-mail: anatysh@gmail.com;*

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна,  
*e-mail: anatysh@gmail.com*

<sup>3</sup>Вищий державний навчальний заклад України  
«Буковинський державний медичний університет»,  
Театральна площа, 2, Чернівці, 58012, Україна



Микитюк О.Ю.

## ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ТЕРМОПАРИ ДЛЯ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Розглянуто особливості застосування термоелектричного матеріалу (ТЕМ) при конструюванні термоелектричних перетворювачів (ТП) метрологічного призначення. Порівняння математичних виразів для основних параметрів різних термоелектричних пристроїв показало, що існують суттєві відмінності у виборі ТЕ для термопари ТП. Зокрема, максимальна термоелектрична ефективність ТЕМ Z для ТП не завжди є визначальною у забезпеченні найкращих параметрів ТП. Для ТП, крім високих значень Z, важливими є максимальні значення термоЕРС ТЕМ та раціональне використання тепла, що виділяється нагрівником ТП (так званий "конструктивний фактор"). Бібл. 12, рис. 1.*

**Ключові слова:** термоелектричний перетворювач, нагрівник, термопара, чутливість, термоелектричний матеріал.

### Вступ

Створення високоточних приладів для вимірювання величин змінного струму є важливим завданням сучасного термоелектричного приладобудування. Підвищення чутливості таких приладів безпосередньо пов'язане з підвищенням чутливості термоелектричного перетворювача (ТП) метрологічного призначення [1].

Збільшення чутливості ТП в основному досягається за рахунок покращання параметрів термоелектричного матеріалу (ТЕМ). Однак, поряд з пошуком нових ТЕМ і покращанням якості відомих матеріалів, можливості збільшення добротності ( $z$ ) яких на даному етапі практично вичерпані, існують можливості підвищення параметрів ТП за рахунок їх конструктивних удосконалень, оптимізації теплових режимів роботи з метою збільшення ефективності використання тепла, що виділяється нагрівником ТП. Актуальним залишається завдання оптимального застосування ТЕМ саме для ТП, оскільки у даному випадку існує

суттєва відмінність від використання ТЕМ для інших термоелектричних пристроїв – термогенераторів (ТЕГ), приймачів випромінювання, охолоджувачів та ін.

Тому важливим завданням і метою даної роботи є встановлення особливостей застосування ТЕМ саме при розробці ТП.

### Відмінності у виборі ТЕМ для різних типів термоелектричних пристроїв

Відомо [2], що застосування напівпровідникового матеріалу для перетворювачів теплової енергії в електричну призвело до різкого покращання їхнього коефіцієнту корисної дії (ККД) і створило хороші передумови для широкого використання таких перетворювачів. У значно меншій мірі вивчені можливості покращання параметрів ТП метрологічного призначення. Часто спроби використання ТЕМ, розроблених для енергетичних використань не мали очікуваного успіху. Це зумовлено тим, що ТЕМ, призначені для вимірювальної техніки і метрології, повинні відповідати ряду додаткових вимог, що не враховуються при розробці ТЕМ для інших застосувань. Наприклад, для ТЕГ, термоелектричних холодильників (ТЕО) і пристроїв термоелектричного нагрівання.

При виборі ТЕМ для термопари ТП видозмінюються критерії оптимізації ТЕМ. В ТЕГ, ТЕО і пристроях для термоелектричного нагрівання, основним параметром, що визначає їх якість є ККД. Для ТЕГ ККД ( $\eta_{\max}$ ) в режимі максимальної потужності визначається виразом [3]:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{T_1 - T_2}{T_1 + \frac{2}{z} - \frac{1}{4}(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – температури гарячих і холодних спаїв, відповідно,  $z$  – термоелектрична добротність ТЕМ, що визначається за формулою:

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{x}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС,  $\sigma$  – електропровідність,  $x$  – теплопровідність.

Для характеристики ТЕО використовують холодильний коефіцієнт  $\varepsilon_{\max}$ , що визначається з рівняння [4]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + 0,5z(T_1 + T_2)} - T_1/T_2}{\sqrt{1 + 0,5z(T_1 + T_2)} + T_1/T_2}. \quad (3)$$

Опалювальний коефіцієнт  $K_T$  для пристроїв термоелектричного нагрівання визначається так [5]:

$$K_T = \frac{1}{4} \left( \frac{T_2}{2} - \frac{T_1 - T_2}{zT_2} \right). \quad (4)$$

Формули (1), (2), (3), (4) залишаються правильними незалежно від того, який тип пристрою із вищезгаданих розглядається. У цих формулах основним параметром, що

характеризує ефективність пристрою, є  $z$ . Тому основною вимогою, що висувається до ТЕМ, є досягнення максимально можливого значення  $z$ . Іншою, не менш важливою, вимогою є збереження добротності ТЕМ у широкому інтервалі температури.

Лише для невеликої групи вимірювальних приладів – приймачів випромінювання, мікрокалориметрів, термопар – знайдено співвідношення, з яких визначається зв'язок між параметрами ТЕМ і основними характеристиками пристрою з врахуванням можливості досягнення ними граничних значень, обмежених лише тепловими і температурними шумами [5].

Основними параметрами, що описують приймачі випромінювання, є здатність до виявлення сигналу та вольт-ватна чутливість. Для мікрокалориметрів вводяться аналогічні параметри. Ці параметри давно досліджені і описані в роботах [3,4]. Математичні вирази для визначення цих параметрів не враховують цілий ряд додаткових факторів, властивих різним термоелектричним пристроям. Вирази для реальних конструкцій є значно складнішими [5]. В них у різних комбінаціях входять параметри ТЕМ:  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\chi$ . Крім вимог досягнення максимальної чутливості до ТЕМ для ТП висувається і ряд додаткових умов: стабільність у заданому діапазоні температури, висока часова стабільність та ін.

Із наведеного видно, що вимоги, котрі висуваються до ТЕМ, призначених для ТЕГ, ТЕО і теплових насосів, суттєво відрізняються від вимог до ТЕМ, призначених для конструювання ТП як вимірювальних приладів. Наприклад, добротність ТЕМ є визначальною для ТЕГ і її ККД при малих значеннях  $zT$  залежить від добротності за законом, близьким до лінійного. Тоді як для вимірювальних приладів вирази, в які входить  $z$ , визначаються степеневу залежністю [6] і іншими коефіцієнтами. З цієї причини умови оптимізації ТЕМ для досягнення максимального значення чутливості, швидкодії та ін., будуть відрізнятися між собою. Крім того має місце відмінність у вимогах до ТЕМ і для різних вимірювальних приладів [7]. Через це не може бути створений універсальний ТЕМ, однаково придатний для різних термоелектричних виробів.

У вимірювальній системі з використанням ТП, точність вимірювання цих величин змінного струму цілком залежить від якості ТП, котра в значній мірі визначається властивостями ТЕМ. Однак, вимоги, що висуваються до ТЕМ для досягнення гранично можливих параметрів ТП, або не в повній мірі досліджені та визначені, або вибираються з міркувань, що не завжди впливають із фізичних принципів роботи ТП, а обумовлені експлуатаційними підходами. У зв'язку з цим часто виникають труднощі з вибором оптимального варіанту ТЕМ для ТП.

### Зв'язок основних параметрів ТП з властивостями ТЕМ

Для визначення методики вибору і оптимізації ТЕМ для ТП розглянемо основні параметри ТП,

Найвпливовішими параметрами, що описують властивості ТП, є ті, що визначають зв'язок між вихідними величинами (сила струму, напруга) і вихідними (термоЕРС термопар, термоелектричний струм, потужність в колі термопар). Для опису цього зв'язку в літературі [8] прийняті:

а) чутливість  $S_I = \partial E_T / \partial I_H$ , як відношення приросту термоЕРС термопар  $E_T$  до приросту струму  $I_H$  через нагрівник ;

б) чутливість  $S_U = \partial E_T / \partial U_H$ , як відношення приросту термоЕРС термопар  $E_T$  до приросту напруги  $U_H$ ;

в) чутливість  $S_W = E_T / P_H$ , як відношення  $E_T$  до потужності  $P_H$ , що розсіюється нагрівником.

Для визначення  $S_I$  і  $S_U$  використовують формули:

$$S_I = 2K_1 I_H, \quad (5)$$

$$S_U = 2K_2 U_H. \quad (6)$$

Коефіцієнти перетворення  $K_1$  і  $K_2$  зв'язані співвідношенням:

$$K_I = K_2 R_H^2, \quad (7)$$

де  $R_H$  – опір нагрівника.

Коефіцієнт перетворення  $K_I$  наближено можна записати у вигляді:

$$K_I = \frac{\alpha R_H}{S\lambda}, \quad (8)$$

де  $S$  – поверхня теплообміну,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

Вирази (5) і (6) для чутливості  $S_I$  і  $S_U$  включають лише один параметр ТЕМ –  $\alpha$ . Формули (5) і (7) вірні тільки для деяких типів ТП, у яких відвід тепла нагрівником значно більший, ніж відвід тепла термопарою.

У більшості конструкцій ТП термопара і нагрівник подібні як за геометричними розмірами, так і за теплофізичними параметрами матеріалів. При цьому, як показано у [8], теплопровідність термопари впливає на розподіл температури вздовж нагрівника. Тому вирази (5) і (6) не повністю враховують фізичні процеси, що мають місце в ТП.

Вольт-ватна чутливість для малих перепадів температури дорівнює [8]:

$$S_W = \frac{\alpha r_T}{S\lambda}, \quad (9)$$

де  $r_T$  – тепловий опір термопари, який визначається за формулою:

$$r_T = \frac{l_T}{xS_T}, \quad (10)$$

де  $l_T$  і  $S_T$  – довжина і переріз вітки термопари.

Вольт-ватна чутливість зв'язана з коефіцієнтом перетворення  $K_I$  співвідношенням:

$$S_W = \frac{K_I}{R_H}. \quad (11)$$

З врахуванням (11) загальний вираз для чутливості ТП можна записати у вигляді:

$$S_I = \frac{r_\alpha r_T R_H I_H}{S\lambda}. \quad (12)$$

Таким чином, вираз (12) визначає зв'язок між основними параметрами термопари. Із формули (12) видно, що  $S_I$  дозволяє з більшою визначеністю встановити залежність властивостей

ТП від параметрів ТЕМ, однак і чутливість  $S_\eta$  не характеризує їх у повній мірі.

Для найповнішого визначення залежності параметрів ТП від властивостей ТЕМ введемо параметр чутливості

$$S_\eta = \frac{P}{P_H}, \quad (13)$$

Який є відношенням потужності, отриманої на електричному навантаженні термоелементу до підведеної до ТП електричної потужності змінного струму. Для знаходження  $S_\eta$  розглянемо еквівалентну схему безконтактного ТП з навантаженням  $r_H$ , рис. 1.

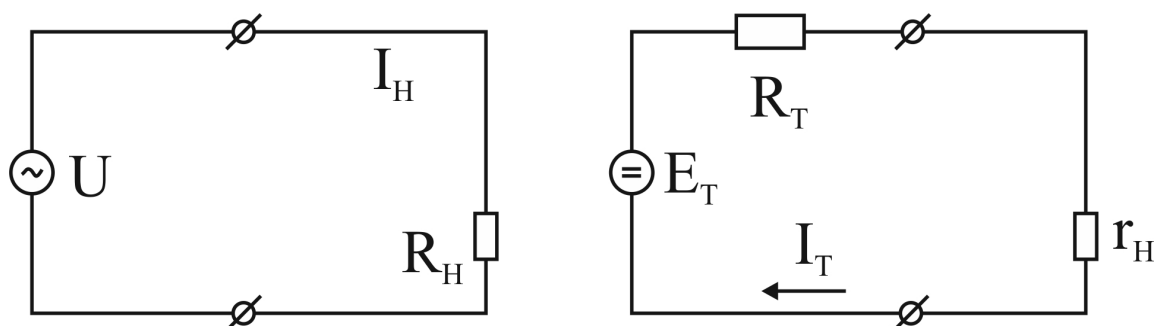


Рис. 1. Схема безконтактного ТП з навантаженням.

Якщо опір навантаження узгоджений з опором термопари ( $r_H = R_T$ ), то ТП працює в режимі близькому до режиму максимального ККД і тоді

$$S_\eta = \frac{E_T^2}{4R_T R_H I_H^2}. \quad (14)$$

З іншої сторони ват-ватна чутливість  $S_\eta$  може бути записана через теплофізичні параметри ТЕМ термопари у вигляді:

$$S_\eta = \frac{z(T_1 - T_2)}{4F_p}, \quad (15)$$

де  $F_p$  – коефіцієнт, що характеризує раціональність використання тепла, що виділяється нагрівником у ТП. Причому

$$F_p = \frac{2P_H r_T}{T_1 - T_2}. \quad (16)$$

Формула (15) згідно [3] відповідає виразу для ККД ТЕГ при умові малих перепадів температури в термопарі та при умові, що параметри ТЕМ для термопари не залежать від температури. Більше того, вираз для  $S_\eta$  може бути записаний [5] у вигляді:

$$S_\eta = \eta = \frac{(T_1 - T_2)\sqrt{1 + zT} - 1}{(T_1\sqrt{1 + zT} - T/T_1)F_p}. \quad (17)$$

Із аналізу (15) і (17) слідує, що основні експлуатаційні параметри ТП задаються термоелектричною добротністю  $TEM z$ , робочим перепадом  $\Delta T = T_1 - T_2$  і коефіцієнтом  $F_p$ , залежним від конструкції ТП.

Отже, збільшення чутливості ТП може досягатися як збільшенням  $z$  і  $\Delta T$ , так і зменшенням коефіцієнту  $F_p$ . Однак, збільшення  $\Delta T$  однозначно погіршує параметри ТП: квадратичність перетворення (коефіцієнт  $K_I$  у формулі (5) стає залежним від температури), здатності до переважань по струму, стабільність у часі через старіння металу нагрівника та прискорення процесів дифузії на спаях термопар. Тому суттєве збільшення  $\Delta T$  є недоцільним.

Оцінка раціональності конструкції ТП, що враховує можливість зменшення теплових втрат за рахунок вакуумізації корпусу ТП або наповнення його інертними газами з малою теплопровідністю (наприклад, ксеноном) [10, 11], оптимальне співвідношення геометричних розмірів нагрівника і термопар, використання нагрівника зі змінним перерізом [12], що оптимізує використання тепла від нагрівника та ін. суттєво покращують параметри ТП. Але основне збільшення чутливості все ж забезпечується шляхом використанням  $TEM$  із максимальним значенням  $z$  і коефіцієнтом термоЕРС  $\alpha$ .

## Висновок

Поєднання різних варіантів підвищення параметрів ТП з використанням ефективних матеріалів на основі  $Bi_2Te_3$  створює сприятливі можливості для розробки ТП з граничними значеннями чутливості.

## Література

1. Анатичук Л.І. Диференційний термоелектричний перетворювач змінного струму в режимі різночасового компарування / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Д.Д. Ташук. // Термоелектрика. – 2015. – №4. – С. 77–82.
2. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатичук. – Київ: Наукова думка, 1979. – 766 с.
3. Охотин А.С. Термоэлектрические генераторы / А.С. Охотин, А.А. Ефремов, В.С. Охотин. – М.: Атомиздат, 1971. – 288 с.
4. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы / Е.А. Коленко. – Л.: Наука, 1967. – 282 с.
5. Анатичук Л.И. Термоэлектрические преобразователи энергии. Том II / Л.И. Анатичук. – Киев - Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.
6. Шоль Ж., Марфон И., Монш М и др. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1969. – 269 с.
7. Ando E. Radiation Thermocouples with  $(BiSb)_2(TeSe)_3$ . Jap. J. Appl. Phys. 13,N5, 1974, P. 363-369.
8. Рождественская Т.Б. Метрологические работы в области измерения тока, напряжения и мощность при повышенных частотах/ Т.Б.Рождественская.// Тр. ин-тов Госкомитета.– 1964.– Вып.76 (136).– С.65-75.
9. Микитюк П.Д. Про вплив термопар на розподіл температури в нагрівнику вимірювального термоперетворювача / П.Д. Микитюк, О.Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №1. – С. 64–59.
10. Анатичук Л.И. Монография. Физика термоэлектричества. Том I. 2008. –388 с.

11. Микитюк П.Д. Про фактори впливу на точність термоперетворювачів / П.Д. Микитюк. // Термоелектрика. – 2017. – №5. – С. 76–83.
12. Микитюк П.Д. Розподіл температури в нагрівнику зі змінним поперечним перерізом у термоелектричному перетворювачі / П.Д. Микитюк, О.Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №2. – С. 79–74.

Надійшла в редакцію 08.11.2018

**P.D.Mykytiuk<sup>1,2</sup>. Cand.Sc. (Physics and Mathematics)<sup>1,2</sup>**  
**O.Yu.Mykytiuk<sup>3</sup>. Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

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

## IN REFERENCE TO THE CHOICE OF THERMOCOUPLE MATERIAL FOR METROLOGICAL-PURPOSE THERMAL CONVERTERS

*Peculiarities of application of thermoelectric material (TEM) in the design of metrological-purpose thermoelectric converters (TC) are considered. Comparison of mathematical expressions for the basic parameters of various thermoelectric devices showed that there are significant differences in the choice of TEM for the TC thermocouple. In particular, the maximum thermoelectric figure of merit Z for TC TEM is not always decisive in providing the best TC parameters. For TC, in addition to the high values of Z, the maximum values of thermoelectric material thermoEMF and the rational use of heat released by the TC heater (so-called "constructive factor") are important. Bibl. 12, Fig. 1.*

**Key words:** thermoelectric converter, heater, thermocouple, sensitivity, thermoelectric material.

### References

1. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Taschuk D.D. (2015). Differential thermoelectric AC converter in the non-simultaneous comparison mode. *J. Thermoelectricity*, 4, 77–82.
2. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. Okhotin A.S., Yefremov A.A., Okhotin V.S. (1971). *Termoelektricheskiye generatory [Thermoelectric generators]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].
4. Kolenko E.A. (1967). *Termoelektricheskiye okhlazhdaiushchie pribory [Thermoelectric cooling devices]*. Leningrad: Nauka [in Russian].
5. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektricheskiye preobrazovateli energii. Tom II. [Thermoelectric power converters. Vol.II]* Kyiv-Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].

6. Shol J., Marfon I., Monsh M., et al. (1969). *Priiomniki infrakrasnogo izlucheniia [Infrared radiation receivers]*. Moscow: Mir [Russian transl].
7. Ando E. (1974). Radiation thermocouples with  $(\text{BiSb})_2(\text{TeSe})_3$ . *Jap. J. Appl. Phys.* 13 (5), 363-369.
8. Rozhdestvenskaia T.B. (1964). Metrologicheskiie raboty v oblasti izmereniia toka, napriazheniia i moshchnosti pri povyshennykh chastotakh [Metrological works in the field of measuring current, voltage and power at elevated frequencies]. *Trudy Institutov Goskomiteta - Proceedings of State Committee Institutes*, 76 (136), 65-75 [in Russian].
9. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Impact of thermocouple on temperature distribution in the heater of measuring thermal converter. *J. Thermoelectricity*, 1, 64–59.
10. Anatyshuk L.I. (2008). *Fizika termoelektrichestva. Tom I [Physics of thermoelectricity. Vol.I]* [in Russian].
11. Mykytiuk P.D. (2017). Factors of influence on the accuracy of thermal converters. *J. Thermoelectricity*, 5, 76–83.
12. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Temperature distribution in a heater with a resistance variable along its length in a thermoelectric converter. *J. Thermoelectricity*, 2, 79–74.

Submitted 08.11.2018