

УДК 537.32

Анатичук Л.І. акад. НАН України^{1,2},

Вихор Л.М. док. фіз.-мат. наук¹



Анатичук Л.І.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,

e-mail: anatyuk@gmail.com

²Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна



Вихор Л.М.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ОПОРІВ КОНТАКТІВ І КОМУТАЦІЙ НА ХОЛОДИЛЬНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

В роботі описаний метод розрахунку максимального холодильного коефіцієнта для реальної моделі термоелектричного модуля, яка враховує вплив електричного опору контактів та комутацій і теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин. Розраховані залежності максимального холодильного коефіцієнта модуля від висоти його віток і перепаду температур. Проведено порівняльний аналіз холодильного коефіцієнта реальної моделі модуля з його “ідеальним” значенням, яке не враховує вплив електричних і теплових опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин. Бібл. 35, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: термоелектричний охолодний модуль, холодильний коефіцієнт, електричний контактний опір, тепловий опір комутаційної та ізоляційної пластин.

Вступ

Технологія термоелектричного охолодження вже понад 50 років широко застосовується в різних сферах життєдіяльності людини завдяки своїм основним перевагам, таким як відсутність шкідливих холодоагентів, безшумність роботи, можливість функціонувати за довільної орієнтації в просторі, здатність з високою точністю підтримувати задані температурні режими, великий ресурс роботи та ін. Термоелектричні пристрої використовуються для охолодження, керування тепловими режимами та стабілізації температури елементів і систем електроніки та оптоелектроніки, таких як фотоприймачі, сенсори ІЧ випромінювання [1], ПЗЗ-матриці, лазерні діоди, інтегральні чипи, мікропроцесори [2 – 10], світлодіоди [11, 12]. Термоелектричний спосіб охолодження застосовується в біологічному та медичному обладнанні: в кріодеструкторах, стимуляторах холод-тепло, міні термостатах для ліків, в біокалориметрах, спектрометрах і

біоаналізаторах [13 – 18.]. Різноманітною є побутова техніка з термоелектричними модулями охолодження, це побутові кондиціонери [19 – 21], портативні побутові холодильники, мінібари для напоїв, сумки-холодильники для пікніків [22 – 25]. Термоелектричні охолоджувачі (ТЕО) використовуються в автомобільній і транспортній індустрії для охолодження-нагріву сидінь [26, 27], в кондиціонерах для транспортних засобів [28].

Загальновідомо, що основним недоліком термоелектричних охолоджувачів є низький холодильний коефіцієнт порівняно з механічними способами охолодження. Підвищення холодильного коефіцієнту є актуальним завданням [29, 30]. Холодильний коефіцієнт термоелектричного модуля як основного елемента охолоджувача залежить від добротності матеріалів віток термоелементів та від електричного і теплового опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин модуля. Ці опори призводять до електричних та теплових втрат ефективності термоелектричного перетворення енергії [31, 32]. Збільшення добротності матеріалів сприяє підвищенню холодильного коефіцієнта. Але з 50-х років минулого століття модулі охолодження виготовляють з матеріалів на основі Bi_2Te_3 , безрозмірна добротність яких залишається на рівні 1 – 1.2 [30]. Пошук нових матеріалів з підвищеною добротністю поки що не дає відчутних позитивних результатів. Електричні і теплові втрати в модулях зменшують холодильний коефіцієнт і є однією з основних причин того факту, що в термоелектричних охолоджувачах властивості матеріалів не реалізуються в повній мірі.

В роботах [31, 32] описані наближені аналітичні методи розрахунку холодильного коефіцієнта, які враховують електричні і теплові опори контактів, комутаційних та ізоляційних пластин в модулі. Показано, що величина холодильного коефіцієнта зменшується, якщо зменшувати висоту віток термоелементів.

Мета цієї роботи полягає в тому, щоб теоретичними методами встановити вплив спільної дії контактного опору, електричного опору комутації, теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин на величину максимального холодильного коефіцієнта модуля і визначити, який з опорів більш суттєво впливає на холодильний коефіцієнт за умов зменшення висоти віток термоелементів.

Метод розрахунку максимального холодильного коефіцієнта

Модель термоелектричного модуля наведена на рис. 1.

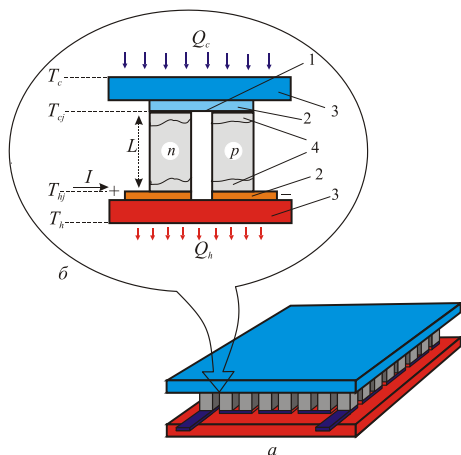


Рис. 1. Модель модуля охолодження (а) і термоелемента (б). 1 – теплопоглинаючий спай термоелемента, 2 – комутаційна пластина, 3 – ізоляційна пластина, 4 – зона контакту.

Модуль містить ряд термоелементів з напівпровідникових віток n - та p -типів провідності. Зазвичай вітки з'єднані в послідовне електричне коло металевими комутаційними пластинами і монтуються між двома ізоляційними пластинами паралельно по відношенню до теплового потоку. Якщо пропускати електричний струм I вказаної на рис. 1б полярності, то на спаях термоелементів 1 тепло поглинається, а на протилежних спаях – виділяється. Якщо тепловиділяючу поверхню модуля підтримувати за температури T_h близької до температури оточуючого середовища, то теплопоглинаюча поверхня буде охолоджуватися до деякої температури T_c .

Енергетична ефективність модуля визначається холодильним коефіцієнтом

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W}, \quad (1)$$

де $W = Q_h - Q_c$ – споживана потужність, Q_c – холодопродуктивність, Q_h – теплопродуктивність кожного термоелемента в модулі.

Для розрахунку і оптимізації холодильного коефіцієнта використані наступні наближення:

1. В стаціонарному стані розподіл температури в вітках термоелементів є одновимірним, тобто $T = T(x)$, де x – координата, направлена вздовж висоти вітки.
2. Коефіцієнти термоЕРС $\alpha_{n,p}$, питомого опору $\rho_{n,p}$ і теплопровідності $\kappa_{n,p}$ матеріалів віток n - і p -типів провідності є незалежними від температури.
3. Враховується вплив електричного контактного опору r_c , електричного опору r_{com} комутації та теплового опору R_t комутаційної та ізоляційної пластин.

За таких наближень холодопродуктивність Q_c і теплопродуктивність Q_h визначаються із системи рівнянь теплового балансу для термоелемента, яка має вигляд

$$Q_c = \frac{1}{R_t}(T_c - T_{cj}), \quad (2)$$

$$Q_c = \alpha I T_{cj} - \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_{hj} - T_{cj}), \quad (3)$$

$$Q_h = \alpha I T_{hj} + \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_{hj} - T_{cj}), \quad (4)$$

$$Q_h = \frac{1}{R_t}(T_{hj} - T_h), \quad (5)$$

де $\alpha = |\alpha_n| + \alpha_p$, $\rho = \rho_n + \rho_p$, $\kappa = \kappa_n + \kappa_p$, L – висота вітки, s – площа поперечного перерізу вітки, T_{cj} і T_{hj} – температури теплопоглинального і тепловиділяючого спайів термоелемента. Опір комутаційної пластини обчислюється за формулою $r_{com} = \frac{\rho_{com}}{l_{com} \sqrt{s}} \left(\frac{2}{3} \sqrt{s} + a \right)$ [33], а тепловий опір комутаційної та

ізоляційної пластин визначається наступним чином: $R_t = \frac{l_{com}}{\kappa_{com} s_{com}} + \frac{l_{ins}}{\kappa_{ins} s_{ins}}$, де ρ_{com} – питомий опір комутаційної пластини, κ_{com} , κ_{ins} – теплопровідність комутаційної та ізоляційної пластин відповідно, l_{com} , l_{ins} – їх висота, $s_{com} = (2\sqrt{s} + a)\sqrt{s}$ – площа комутаційної пластини, $s_{ins} = 2(\sqrt{s} + a)^2$ – площа ізоляційної пластини, a – віддаль між термоелектричними вітками.

З рівнянь (2), (5) знаходяться температури T_{cj} , T_{hj} і підставляються в рівняння (3), (4), розв'язком яких є наступні вирази для Q_c , Q_h :

$$Q_c = \frac{Q_{c0} - \kappa \frac{s}{L} R_t Q_{h0}}{F_2}, \quad (6)$$

$$Q_h = \frac{Q_{h0} - Q_c \kappa \frac{s}{L} R_t}{F_1}, \quad (7)$$

де $F_1 = 1 - (\alpha I - \kappa \frac{s}{L}) R_t$, $F_2 = 1 + 2\kappa \frac{s}{L} R_t - (\alpha I R_t)^2$,

$$Q_{c0} = \alpha I T_c - \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c), \quad (8)$$

$$Q_{h0} = \alpha I T_h + \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c). \quad (9)$$

Холодопродуктивність Q_c і теплопродуктивність Q_h залежать від величини струму I у вітках термоелемента. Комп'ютерними методами обраховується оптимальна величина струму I_{opt} , за якої досягається максимальне значення холодильного коефіцієнта, що визначається за формулою (1).

Зауважимо, що для ідеальної моделі модуля, в якій впливом електричного і теплового опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин нехтується, тобто $r_c \rightarrow 0$, $r_{com} \rightarrow 0$, $R_t \rightarrow 0$, формули (6), (7) для Q_c , Q_h набувають класичного вигляду [33]

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c),$$

$$Q_h = \alpha I T_h + \frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c),$$

що уможливило обчислення максимального холодильного коефіцієнта за класичною формулою [33]

$$\varepsilon_{\max} = \frac{M T_c - T_h}{\Delta T (M + 1)}, \quad (10)$$

$$\text{де } \Delta T = T_h - T_c, \quad M = \sqrt{1 + 0.5Z(T_h + T_c)}, \quad Z = \frac{\alpha^2}{\rho\kappa}.$$

Результати розрахунку максимального холодильного коефіцієнта та їх аналіз

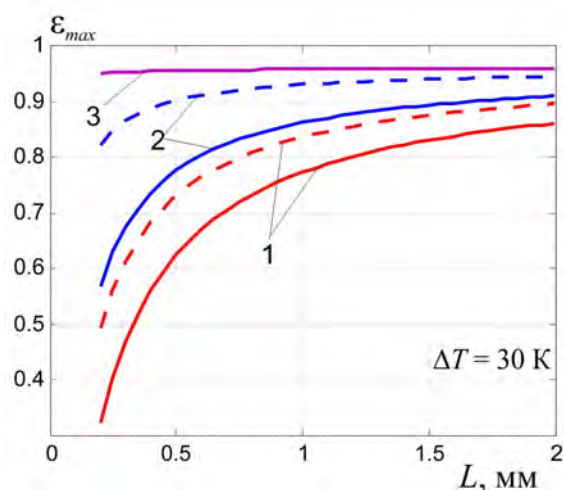
Для теоретичного дослідження впливу електричного та теплового опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин на енергетичну ефективність термоелектричних охолоджувачів розраховувався максимальний холодильний коефіцієнт для модулів з матеріалів на основі Bi_2Te_3 . Термоелектричні параметри матеріалів віток n - і p -типів провідності вважалися однаковими. Розрахунки виконані для модулів з мідною комутацією віток та з ізоляційними пластинами з оксиду алюмінію Al_2O_3 і з нітриду алюмінію AlN , теплопровідність якого в 5 разів краща, ніж у Al_2O_3 . Для аналізу впливу електричного контактного опору r_c на максимальний холодильний коефіцієнт розрахунки проведені для двох значень r_c , а саме для величини $r_c = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, яка вважається типовою для модулів масового виробництва [34], і для мінімальної величини $r_c = 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ контактного опору, зумовленого потенціальним бар'єром на границі між термоелектричним матеріалом і антидифузійним шаром нікелю [35]. Вихідні дані для розрахунку $\epsilon_{\max}$ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

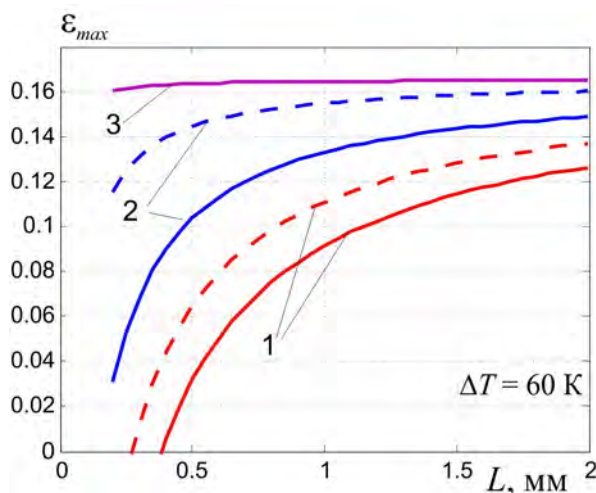
Значення величин, використані для розрахунку максимального
холодильного коефіцієнта

Величина	Значення
Коефіцієнт термоЕРС α , мкВ/К	210
Питомий опір ρ , Ом·см	10^{-3}
Коефіцієнт теплопровідності κ , Вт/см·К	0.015
Висота віток L , см	0.02 – 0.2
Переріз віток s , см ²	0.1×0.1
Віддаль між вітками a , см	0.05
Висота комутаційної пластини l_{com} , см	0.025
Висота ізоляційної пластини l_{ins} , см	0.063

Залежності $\epsilon_{\max}$ від висоти віток термоелементів, розраховані для перепадів температури на модулі 30 К і 60 К, показані на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Залежності максимального холодильного коефіцієнта $\varepsilon_{\max}$ від висоти віток L термоелемента. 1 і 2 – враховані електричний опір контактів і комутаційних пластин та тепловий опір комутаційних та ізоляційних пластин з Al_2O_3 (суцільні лінії), з AlN (пунктирні лінії). 1 - контактний опір $r_c = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; 2 – $r_c = 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; 3 – тепловий опір не врахований, $r_c = 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Перепад температури $\Delta T = 30 \text{ K}$ (а), $\Delta T = 60 \text{ K}$ (б), $T_h = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Якщо контактний опір мінімальний, а теплові втрати, зумовлені тепловим опором комутаційних та ізоляційних пластин, не враховані, то холодильний коефіцієнт не залежить від висоти віток термоелемента (залежність 3 на рис. 2). Ці умови відповідають ідеальній моделі модуля охолодження, а максимальний холодильний коефіцієнт може бути обчислений за класичною формулою (10).

Зауважимо, результати розрахунків $\varepsilon_{\max}$ показали, що електричний опір комутаційних пластин практично не впливає на $\varepsilon_{\max}$.

Вплив теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин за умов як мінімального (залежності 2 на рис. 2), так і реального (залежності 1 на рис. 2) контактного опору зумовлює залежність $\varepsilon_{\max}$ від висоти віток термоелементів. Зменшення висоти віток призводить до зменшення холодильного коефіцієнта, що особливо відчувається за умов мініатюризації термоелементів, коли висота віток менше 0.1 см.

Тепловий опір є причиною перепаду температури δT на комутаційних та ізоляційних пластинах (рис. 3), який для мініатюрних віток є тим більшим, чим менша їх висота. Очевидно, що $\delta T_h = T_{hj} - T_h$ на тепловіддаючій ізоляційній пластині буде суттєво більшим ніж $\delta T_c = T_c - T_{cj}$ на теплопоглинаючій. Для модулів з висотою віток $L=0.05$ см та ізоляційними пластинами з Al_2O_3 δT_h досягає 5 градусів (рис. 3б) і відповідно підвищується температура тепловіддаючих спаїв термоелементів, що призводить до зменшення холодильного коефіцієнта.

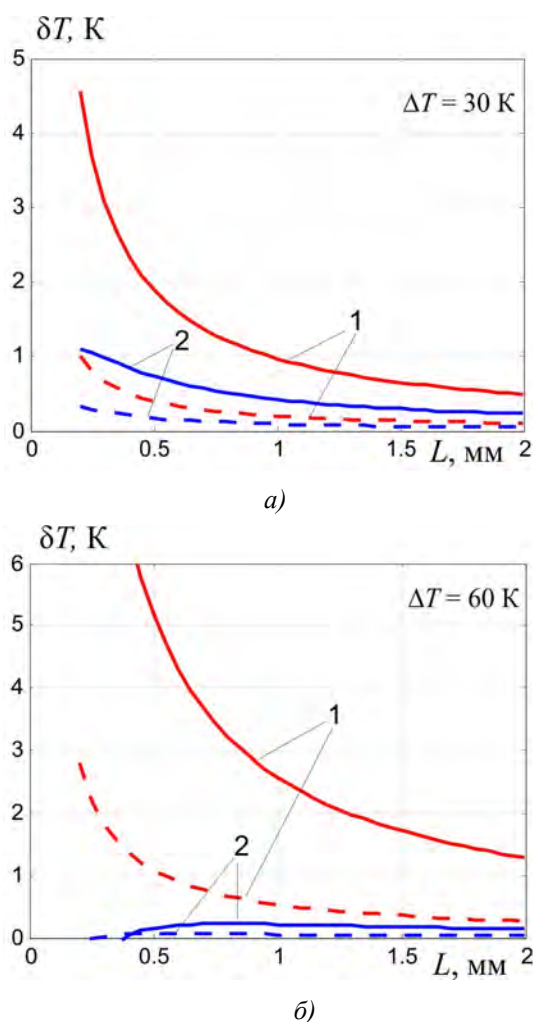


Рис.3. Залежності перепаду температури δT на комутаційних та ізоляційних пластинах з Al_2O_3 (суцільні лінії), з AlN (пунктирні лінії) від висоти віток термоелемента L .
1 – δT_h на тепловіддаючій поверхні термоелементів в модулі, 2 – δT_c на теплопоглинаючій поверхні. Перепад температури на модулі $\Delta T = 30$ К (а), $\Delta T = 60$ К (б), $T_h = 30$ °С.

Зменшити втрати ефективності охолодження можна шляхом зменшення теплового опору ізоляційних пластин, якщо використовувати більш тонкі пластини з матеріалів більш високої теплопровідності, наприклад, з AlN . Для ізоляції з AlN при $L = 0.05$ см δT_h замість 5 К досягатиме величини менше 1 К (рис. 3).

Залежність $\varepsilon_{\max}$ від різниці температур на модулі показана на рис. 4. Тут наведені результати розрахунку для модулів з висотою віток $L = 0.2$ см і для мініатюрних віток з $L = 0.02$ см. Якщо вітки високі, то $\varepsilon_{\max}$ реальної моделі модуля (залежність 3, рис. 4), яка враховує електричні та теплові опори контактів, комутаційних та ізоляційних пластин, не суттєво відрізняється від $\varepsilon_{\max}$ ідеальної моделі (залежність 4, рис. 4). Для мініатюрних віток ця різниця буде не суттєвою лише за умов мінімального контактного опору та використання ізоляційних пластин з високою теплопровідністю (залежність 2 для пластин з AlN , рис. 4). Інакше $\varepsilon_{\max}$ реального мікромодуля буде в 2 – 5 разів менше, порівняно з ε_0 , розрахованим з використанням наближень ідеальної моделі. Такий висновок випливає з результатів розрахунку співвідношення $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ холодильних коефіцієнтів ідеальної та реальної моделей, представлених в табл. 2.

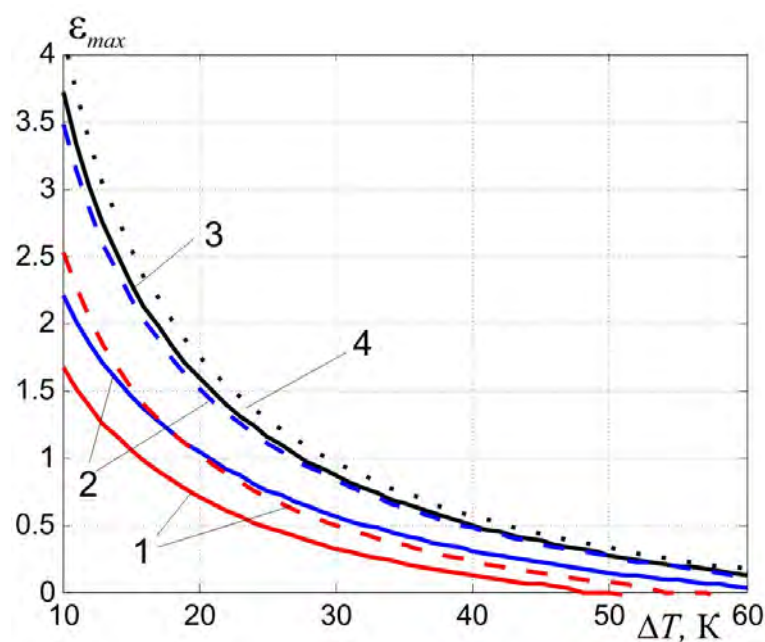


Рис. 4. Залежності максимального холодильного коефіцієнта $\varepsilon_{\max}$ від перепаду температур ΔT , $T_h = 30$ °C. 1, 2, 3 – враховані теплові втрати в комутаційних та ізоляційних пластинах з Al_2O_3 (суцільні лінії), з AlN (пунктирні лінії).

1 – висота віток $L = 0.02$ см, контактний опір $r_c = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²;

2 – $L = 0.02$ см, $r_c = 10^{-7}$ Ом·см²; 3 – $L = 0.2$ см, $r_c = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²;

4 – теплові втрати не враховані, $L = 0.2$ см, $r_c = 10^{-7}$ Ом·см².

Таблиця 2

*Залежність співвідношення $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ від висоти віток термоелемента.
 $\varepsilon_{\max}$ - значення холодильного коефіцієнта за умов врахування електричних
та теплових втрат в контактах з опором r_c і в мідних комутаційних
та ізоляційних пластинах з Al_2O_3 , ε_0 - значення холодильного коефіцієнта для ідеальної моделі
модуля, коли втрати не враховуються.*

Висота віток L , см	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані тільки електричні втрати в контактах $r_c=10^{-7}$ Ом·см ²	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані електричні і теплові втрати $r_c=10^{-7}$ Ом·см ²	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані тільки електричні втрати в контактах $r_c=5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см ²	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані електричні і теплові втрати $r_c=5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см ²
Перепад температур на модулі $\Delta T=10$ К, $\varepsilon_0=4.15$				
0.2	1.0	1.08	1.04	1.12
0.15	1.0	1.10	1.06	1.16
0.1	1.002	1.16	1.08	1.24
0.05	1.003	1.32	1.17	1.51
0.02	1.008	1.89	1.43	2.48
Перепад температур на модулі $\Delta T=30$ К, $\varepsilon_0=0.96$				
0.2	1.00	1.06	1.06	1.12
0.15	1.001	1.08	1.08	1.16
0.1	1.002	1.12	1.12	1.24
0.05	1.004	1.24	1.24	1.54
0.02	1.01	1.71	1.69	2.99
Перепад температур на модулі $\Delta T=60$ К, $\varepsilon_0=0.17$				
0.2	1.00	1.11	1.17	1.31
0.15	1.004	1.15	1.24	1.45
0.1	1.006	1.25	1.39	1.81
0.05	1.01	1.60	2.08	5.24
0.02	1.03	5.37	-	-

Тут наведені дані розрахунку відношення $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$, аналіз яких також показує, що втрати ефективності модуля за умов зменшення висоти віток термоелементів, причиною яких є тепловий опір комутаційних та ізоляційних пластин, співмірні з втратами, зумовленими електричним контактним опором.

Отже для проєктування модулів охолодження з вітками, висота яких менше 1 мм, важливо враховувати як електричний контактний опір, так і тепловий опір комутаційних та ізоляційних

пластин. Для модулів з вітками більшими за 0.15 см можна скористатися ідеальною моделлю, яка не враховує вплив електричних і теплових втрат енергетичної ефективності.

Висновки

Розрахунок і аналіз максимального холодильного коефіцієнта, проведені на основі реальної моделі модуля охолодження, що враховує вплив електричного контактного опору і електричного та теплового опорів комутаційних та ізоляційних пластин, уможливають наступні висновки:

1. Холодильний коефіцієнт залежить від висоти віток термоелементів. Чим менша висота віток, тим менший холодильний коефіцієнт. Для перепадів температур менших за 40 К холодильний коефіцієнт модулів з ізоляційними пластинами з Al_2O_3 і вітками з матеріалів на основі Bi_2Te_3 висотою 0.05 см досягає лише 65 % свого "ідеального" значення, яке не враховує вплив електричних і теплових опорів, а для $\Delta T = 60$ К це буде всього 19 %. Водночас для модулів з висотою віток 0.2 см цей показник становить 90 %.

2. Чим більшими є величини електричного контактного опору і теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин, тим суттєвіше зменшується холодильний коефіцієнт із зменшенням висоти віток. Причому зменшення холодильного коефіцієнта за рахунок теплового опору співмірне із його зменшенням внаслідок впливу електричного контактного опору.

3. Підвищити енергетичну ефективність модулів можна шляхом застосування технологій їх виготовлення, що мінімізують контактний опір [35], і використання ізоляційних пластин з високотеплопровідних матеріалів, наприклад, з AlN замість Al_2O_3 . Холодильний коефіцієнт таких модулів не буде суттєво залежати від висоти віток і наблизиться до свого "ідеального" значення.

Література

1. Анатичук Л.І., Вихор Л.М. Границі термоелектричного охолодження для фотоприймачів. Термoeлектрика, 2013, №5, с. 58–63.
2. Вайнер А.Л., Моисеев В.Ф. Совмещенные приборы криотермоэлектрической электроники. Одесса: Студия «Негоциант», 2000.
3. K. Mansour, Y. Qiu, C.J. Hill, A. Soibel, R.Q. Yang, Mid-infrared interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures, Electron. Lett. 42 (Issue 18) (2006) 1034-1036.
4. Reiyu Chein, Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling, Appl. Therm. Eng. 24 (2004) 2207-2217.
5. Yuanyuan Zhou, Jianlin Yu. Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices, Int. J. Refrig. 35 (2012) 1139-1144.
6. H.Y. Zhang, Y.C. Mui, M. Tarin. Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages, Appl. Therm. Eng. 30 (2010) 561-568.
7. Patrick E. Phelan, Victor A. Chiriac, Tien-Yu Tom Lee. Current and future miniature refrigeration cooling technologies for high power microelectronics, IEEE Trans. Compon. Packag. Technol. 25 (3)

(September 2002).

8. Hsiang-Sheng Huang, Ying-Che Weng, Yu-Wei Chang, Sih-Li Chen, Ming-Tsun Ke. Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37 (2010) 140-146.
9. Yu-Wei Chang, Chih-Chung Chang, Ming-Tsun Ke, Sih-Li Chen. Thermoelectric air-cooling module for electronic devices, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 2731-2737.
10. Liu Zhu, Hongbo Tan, Jianlin Yu. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications, *Energy Convers. Manage.* 76 (2013) 685-690.
11. Junhui Li, Bangke Ma, Ruishan Wang, Lei Han. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs, *Microelectron. Reliab.* 51 (2011) 2210-2215.
12. Rong-Yuan Jou. Heat transfer enhancement of the liquid-cooled LED illumination module, *Appl. Mech. Mater.* 284-287 (2013) 768-772.
13. L.I. Anatychuk, R.R. Kobylyansky. Thermoelectric device for treatment of radiculitis and spinal massage, *AIP Conf. Proc.* (2012) 509–511.
14. L. Anatychuk, L. Vikhor, M. Kotsur, R. Kobylyanskyi, T. Kadeniuk. Optimal Control of Time Dependence of Temperature in Thermoelectric Devices for Medical Purposes, *Int. J. Thermophys.* 39 (2018) 1–12.
15. Анатичук Л.І., Пасєчнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Назаретян Р.Е., Гаврилюк М.В., Тюменцев В.А., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний прилад для безконтактного охолодження очей людини, *Термоелектрика*, №4, (2020), 77-90.
16. R.R. He, H.Y. Zhong, Y. Cai, D. Liu, F.Y. Zhao. Theoretical and Experimental Investigations of Thermoelectric Refrigeration Box Used for Medical Service, *Procedia Eng.* 205 (2017) 1215–1222.
17. N.F. Güler, R. Ahiska. Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit, *Appl. Therm. Eng.* 22 (11) (2002) 1271–1276.
18. Nandy Putra, et al. The characterization of a cascade thermoelectric cooler in a cryosurgery device, *Cryogenics* 50 (2010) 759-764.
19. Mark Gillott, Liben Jiang, Saffa Riffat. An investigation of thermoelectric cooling devices for small-scale space conditioning applications in buildings, *Int. J. Energy Res.* (2009).
20. Tsung-Chieh Cheng, Chin-Hsiang Cheng, Zhu-Zin Huang, Guo-Chun Liao. Development of an energy- saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications, *Energy* 36 (2011).
21. Limei Shen, Fu Xiao, Huanxin Chen, Shengwei Wang. Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system, *Energy Build.* 59 (2013) 123-132.
22. D. Astrain, J.G. Vian, J. Albizua. Computational model for refrigerators based on Peltier effect application, *Appl. Therm. Eng.* 25 (2005) 3149-3162.
23. Gao Min, D.M. Rowe. Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators, *Appl. Energy* 83 (2006) 133-152.
24. Sabah A. Abdul-Wahab, et al. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric

- refrigerator, *Renew. Energy* 34 (2009) 30-34.
- 25.D. Astrain, J.G. Vian, M. Dominguez. Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation, *Appl. Therm. Eng.* 23 (2003) 2183-2200.
- 26.Hyeung-Sik Choi, Sangkook Yun, Kwang-il Whang. Development of a temperature-controlled car-seat system utilizing thermoelectric device, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 2841-2849.
- 27.Анатичук Л.І., Прибила А.В., Кібак А.М. Термоелектричні кондиціонери для сидінь автотранспорту, *Термоелектрика*, №4, (2020), 90-104.
- 28.A.G. Miranda, T.S. Chen, C.W. Hong. Feasibility study of a green energy powered thermoelectric chip based air conditioner for electric vehicles, *Energy* 59 (2013) 633-641.
- 29.S. B. Riffat, Xiaoli Ma. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review, *Int. J. Energy Res.* 2004; 28:753–768.
- 30.D. Zhao, G. Tan. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications, *Appl. Therm. Eng.* 66 (2014) 15-24.
- 31.Gao Min, D.M. Rowe. Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module, *Energy Convers. Manage.* 41 (2000) 163-171.
- 32.X.C. Xuan. Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers. *Energy Convers. Manage.* 44 (2003) 399–410.
- 33.Анатичук Л.І. Термоелектричество. Том II. Термоелектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоелектричества, 2003, 376 с.
- 34.P. J. Taylor, J. R. Maddux, G. Meissner, R. Venkatasubramanian et al. Controlled improvement in specific contact resistivity for thermoelectric materials by ion implantation, *Appl. Phys. Lett.* 103, (2013) 043902.(1-5).
- 35.L.M. Vikhor, L.I. Anatychuk, and P.V. Gorskyi. Electrical resistance of metal contact to Bi₂Te₃ based thermoelectric legs, *J. Appl. Phys.* 126, (2019) 164503.

Надійшли до редакції: 21.06.2021

Анатичук Л.І. акад. НАН України^{1,2}
Вихор Л.М. док. физ.-мат. наук¹

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

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

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
КОНТАКТОВ И КОММУТАЦИЙ НА ХОЛОДИЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ**

В работе описан метод расчета максимального холодильного коэффициента для реальной модели термоэлектрического модуля, учитывающей влияние электрического сопротивления контактов и коммутаций и теплового сопротивления коммутационных и изоляционных пластин. Рассчитаны зависимости максимального холодильного коэффициента модуля от высоты его ветвей и перепада температур. Проведен сравнительный анализ холодильного коэффициента реальной модели модуля с его "идеальным" значением, не учитывающим влияние электрических и тепловых сопротивлений контактов, коммутационных и изоляционных пластин. Библ. 36, рис. 4., табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектрический охлаждающий модуль, холодильный коэффициент, электрическое контактное сопротивление, тепловое сопротивление коммутационной и изоляционной пластин

Anatychuk L.I., *acad. National Academy
of Sciences of Ukraine*^{1,2}

Vikhor L.M. *doc. phys.-math. sciences*¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine

e-mail: anatych@gmail.com;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2 Kotsiubynsky str., 58000, Chernivtsi, Ukraine

INFLUENCE OF ELECTRICAL AND THERMAL RESISTANCES OF CONTACTS AND INTERCONNECTS ON THE COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF THERMOELECTRIC MODULE

The paper describes a method for calculating the maximum coefficient of performance for a real model of a thermoelectric module, which takes into account the influence of the electrical resistance of contacts and interconnects and the thermal resistance of interconnect and insulating plates. The dependences of the maximum coefficient of performance of the module on the height of its legs and temperature difference are calculated. A comparative analysis of the coefficient of performance of a real module model with its "ideal" value, which does not take into account the influence of electrical and thermal resistances of contacts, interconnects and insulating plates, is carried out.

Key words: thermoelectric cooling module, coefficient of performance, electrical contact resistance, thermal resistance of interconnect and insulating plates

References

1. Anatychuk L.I., Vikhor L.M. (2013). The boundaries of thermoelectric cooling for photodetectors.

J. Thermoelectricity, 5, 58–63.

2. Vainer A.L., Moiseev V.F. (2000). *Sovmeshchennyye pribory kriotermoelektricheskoi elektroniki [Combined devices of cryothermoelectric electronics]*. Odessa: Negotsiant studio [in Russian].
3. Mansour K., Qiu Y., Hill C.J., Soibel A., Yang R.Q. (2006). Mid-infrared interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures. *Electron. Lett.* 42 (18), 1034-1036.
4. Chein Reiyu, Huang Guanming (2004). Thermoelectric cooler application in electronic cooling, *Appl. Therm. Eng.*, 24, 2207-2217.
5. Zhou Yuanyuan, Yu Jianlin (2012). Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices. *Int. J. Refrig.* 35, 1139-1144.
6. Zhang H.Y., Mui Y.C., Tarin M. (2010). Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages. *Appl. Therm. Eng.* 30, 561-568.
7. Phelan Patrick E., Chiriac Victor A., Tom Lee Tien-Yu (2002). Current and future miniature refrigeration cooling technologies for high power microelectronics. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 25 (3).
8. Huang Hsiang-Sheng, Weng Ying-Che, Chang Yu-Wei, Chen Sih-Li, Ke Ming-Tsun (2010). Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37, 140-146.
9. Chang Yu-Wei, Chang Chih-Chung, Ke Ming-Tsun, Chen Sih-Li (2009). Thermoelectric air-cooling module for electronic devices. *Appl. Therm. Eng.* 29, 2731-2737.
10. Zhu Liu, Tan Hongbo, Yu Jianlin (2013). Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Convers. Manage.* 76, 685-690.
11. Li Junhui, Ma Bangke, Wang Ruishan, Han Lei (2011). Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectron. Reliab.* 51, 2210-2215.
12. Jou Rong-Yuan (2013). Heat transfer enhancement of the liquid-cooled LED illumination module. *Appl. Mech. Mater.* 284-287, 768-772.
13. Anatyshuk L.I., Kobylansky R.R. (2012). Thermoelectric device for treatment of radiculitis and spinal massage. *AIP Conf. Proc.* 509–511.
14. Anatyshuk L., Vikhor L., Kotsur M., Kobylanskyi R., Kadeniuk T. (2018). Optimal control of time dependence of temperature in thermoelectric devices for medical purposes. *Int. J. Thermophys.* 39, 1–12.
15. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Naumenko V.O., Zadorozhnyi O.S., Nazaretyan R.E., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A., Kobylanskyi R.R. (2020). Thermoelectric device for non-contact cooling of human eyes. *J. Thermoelectricity*, 4, 77-90.
16. He R.R., Zhong H.Y., Cai Y., Liu D., Zhao F.Y. (2017). Theoretical and experimental investigations of thermoelectric refrigeration box used for medical service. *Procedia Eng.*, 205, 1215–1222.
17. Güler N.F., Ahiska R. (2002). Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit. *Appl. Therm. Eng.*, 22 (11), 1271–1276.
18. Putra Nandy, et al. (2010). The characterization of a cascade thermoelectric cooler in a cryosurgery device. *Cryogenics* 50, 759-764.

19. Gillott Mark, Jiang Liben, Riffat Saffa (2009). An investigation of thermoelectric cooling devices for small-scale space conditioning applications in buildings. *Int. J. Energy Res.*
20. Cheng Tsung-Chieh, Cheng Chin-Hsiang, Huang Zhu-Zing, Liao Guo-Chun (2011). Development of an energy-saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications. *Energy*, 36.
21. Shen Limei, Xiao Fuo, Chen Huanxin, Wang Shengwei (2013). Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system. *Energy Build.* 59, 123-132.
22. Astrain D., Vian J.G., Albizua J. (2005). Computational model for refrigerators based on Peltier effect application. *Appl. Therm. Eng.* 25, 3149-3162.
23. Min Gao, Rowe D.M. (2006). Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators, *Appl. Energy* 83, 133-152.
24. Sabah A. Abdul-Wahab, et al. (2009). Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. *Renew. Energy*, 34, 30-34.
25. Astrain D., Vian J.G., Dominguez M. (2003). Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation. *Appl. Therm. Eng.* 23, 2183-2200.
26. Choi Hyeung-Sik, Yun Sangkook, Whang Kwang-il. Development of a temperature-controlled car-seat system utilizing thermoelectric device. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2841-2849.
27. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Kibak A.M. (2020). Thermoelectric air conditioners for vehicle seats. *J. Thermoelectricity*, 4, 90-104.
28. Miranda A.G., Chen T.S., Hong C.W. (2013). Feasibility study of a green energy powered thermoelectric chip based air conditioner for electric vehicles. *Energy* 59, 633-641.
29. Riffat S.B., Ma Xiaoli (2004). Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review. *Int. J. Energy Res.* 28, 753-768.
30. Zhao D., Tan G. (2014). A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Appl. Therm. Eng.* 66, 15-24.
31. Min Gao, Rowe D.M. (2000). Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module. *Energy Convers. Manage.* 41, 163-171.
32. Xuan X.C. (2003). Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers. *Energy Convers. Manage.* 44, 399-410.
33. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.II. Termoelektricheskie preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.II. Thermoelectric power converters]*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].
34. Taylor P.J., Maddux J.R., Meissner G., Venkatasubramanian R. et al. (2013). Controlled improvement in specific contact resistivity for thermoelectric materials by ion implantation. *Appl. Phys. Lett.* 103, 043902 (1-5).
35. Vikhor L.M., Anatyshuk L.I., Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi₂Te₃ based thermoelectric legs. *J. Appl. Phys.* 126, 164503.

Submitted: 21.06.2021