

ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАБОТАТА НА КАСКАДНО СВЪРЗАНИ МОДУЛИ НА ПЕЛТИЕ

STUDY OF OPERATION OF PELTIER MODULES IN CASCADE

Ivaylo Belovski

Prof. D-r Asen Zlatarov University, Bulgaria

Anatoliy Aleksandrov

Technical University of Gabrovo, Bulgaria

Kazolis Dimitrios Teodosios

Technical University of Gabrovo, Bulgaria

Abstract

Thermoelectric Peltier modules are mainly used for cooling. In their work they use the Peltier effect - converting electrical power into a temperature gradient. In recent years, there has been a growing interest in systems based on similar modules because they are constantly increasing their efficiency. In addition, Peltier modules are absolutely silent, environmentally friendly and have high reliability. The purpose of this article is to show the efficiency of the Peltier modules connected in a cascade and to compare the experimentally obtained results with the theoretical ones obtained through calculations.

Keywords: Peltier modules, Seebeck effect, thermoelectric cooling.

ВЪВЕДЕНИЕ

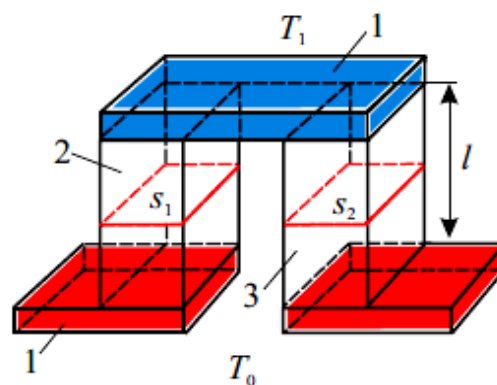
Модулите на Пелтие са твърдотелни устройства, съставени от n на брой термоелектрически преобразуватели (термодвойки), които директно конвертират електрическата мощност в температурен градиент (ефект на Пелтие) или приложената към страните им температурна разлика ΔT в термо-електродвижещо напрежение (ефект на Зеебек) [1-2].

Охлаждането, чрез използване на ефекта на Пелтие е разгледано още през 1911г. от немският учен Едмънт Алтенкирх. За изследванията си той е използвал термодвойка от метални проводници. Анализът на резултатите тогава е довел до извода, че този метод на охлаждане е безперспективен. Едва след проведените изследвания на руският учен Абрам Йофе и неговите сътрудници [3], през петдесетте години на миналия век се изяснява перспективността на този метод при използване на полупроводници и се слага началото на теоретичното изследване и практическото приложение на полупроводниковите термоелементи.

Термоелектрическите преобразуватели, използващи ефекта на Пелтие се наричат термоелектрически хладилници [4-5].

Основната преобразувателна част от модула на Пелтие е термоелемента. Той съдържа два клона полупроводници с различен тип проводимост – N и P с напречно сечение s_1, s_2 и дължина l -фиг. 1.

Ако през един такъв термоелемент, поставен при нормална постоянна температура се пропусне електрически ток I от N към P полупроводника, след много кратко време (няколко секунди) се установява, че горния край се е охладил до температура T_c - по-ниска от околната, а долният се е загреял до температура T_h - по-висока от околната.



Фиг.1. Термоелемент

1 – комутационни пластини; 2, 3 – полупроводници с N и P тип проводимост

При анализа на термоелемента се отчита ефекта на Пелтие и отделената топлина на Джаул, а ефекта на Томпсън се пренебрегва.

За постигане на по-ниска работна температура T_c е направен експеримент, в който два модула на Пелтие са свързани в каската. По този начин, горният модул се охлажда от този под него, което води до получаване на максимално ниска температура T_c на последният термоелемент в каскадата.

Целта на този доклад е да покаже ефективността на работа на модулите на Пелтие, свързани в каскада и да се сравнят експериментално получените резултати с теоретичните - получени чрез изчисления.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Производителите на термоелектрически модули (ТЕМ) на Пелтие предлагат на пазара широка гама продукти с различни параметри, форми и размери [6].

Обикновено в каталожните данни за даден ТЕМ се представят някои преобразователни характеристики и максимално допустимите параметри:

- максимална температурна разлика между страните на ТЕМ – ΔT_{max} ;
- максимален ток – I_{max} ;
- максимално захранващо напрежение – U_{max} ;
- максимална абсорбирана от студена страна на ТЕМ мощност - Q_{cmax} .

За създаването на една високоефективна термоелектрическа система, освен тези данни, е необходимо да се знаят както оптималните параметри на конкретния модул, така и основните термоелектрически параметри на използваните за модула материали – коефициента на Зеебек α [V/K], специфичното съпротивление на материала ρ [$\Omega \cdot cm$] и коефициента на топлопроводност k [W/cm.K]. За съжаление производителите не посочват тази информация в каталозите си. Следващите формули представляват методика за тяхното изчисляване [7]:

A. Изразяване на основните зависимости на охлаждащ ТЕМ

$$Q_c = 2N \left[\alpha I T_c - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{G} - k G \Delta T \right], \quad (1)$$

където: N – брой на термодвойките в ТЕМ; G – геометричен фактор, изразяващ отношението на площта и височината на полупроводниковите клонове; I – електрически ток.

Напрежението U се дава с:

$$U = 2N \left[I \frac{\rho}{G} + \alpha \Delta T \right], \quad (2)$$

а консумираната от ТЕМ мощност W е:

$$W = U I \quad (3)$$

Качественият фактор Z_0 е параметър, пряко свързан със способността на ТЕМ да изпомпва топлинна мощност:

$$Z_0 = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (4)$$

Дефиниране на параметрите α_m , ρ_m и k_m :

$$\alpha_m = 2 \cdot \alpha \cdot N \quad (5)$$

$$\rho_m = \frac{2 \cdot \rho \cdot N}{G} \quad (6)$$

$$k_m = 2 \cdot N \cdot k \cdot G \quad (7)$$

Използвайки изрази (5 – 7), изрази (1, 2 и 4) могат да се представят така:

$$Q_c = \alpha_m I T_c - 0,5 I^2 \rho_m - k_m \Delta T \quad (8)$$

$$U = \alpha_m \Delta T + I \rho_m \quad (9)$$

$$Z_0 = \frac{\alpha_m^2}{\rho_m \cdot k_m}, \quad (10)$$

B. Изчисляване на термоелектрическите параметри на ТЕМ

След като бъдат отчетени от каталога на производителя граничните параметри: ΔT_{max} , I_{max} , U_{max} и Q_{cmax} , могат да се изчислят и термоелектрическите параметри на ТЕМ – Z_0 , α_m , ρ_m и k_m . Този метод изпъл-

два три от граничните параметъра - ΔT_{max} , I_{max} и U_{max} .

$$Z_0 = \frac{2\Delta T_{max}}{(T_h - \Delta T_{max})^2} \quad (11)$$

$$\alpha_m = \frac{U_{max}}{T_h} \quad (12)$$

$$k_m = \frac{(T_h - \Delta T_{max})U_{max}I_{max}}{2T_h\Delta T_{max}} \quad (13)$$

$$\rho_m = \frac{(T_h - \Delta T_{max})U_{max}}{T_h I_{max}}, \quad (14)$$

където Z_0 е качествено фактор на ТЕМ на Пелтие и е пряко свързан със способността на ТЕМ да абсорбира топлинна мощност.

След като бъдат изчислени термоелектрическите параметри на модула, лесно могат да се пресметнат и термофизическите параметри на полу-проводниците, от които са изградени термодвойките - коефициента на Зеебек α , специфичното съпротивление на материала ρ и коефициента на топлопроводност k . Това става с помощта на изрази (5 - 7), но само ако е известен броя на термодвойките N и геометричния фактор G .

За изчисляване на коефициента на преобразуване η и топлинното съпротивление на горещия радиатор R_h се използват следните изрази:

$$\eta = \frac{Q_c}{W} \quad (15)$$

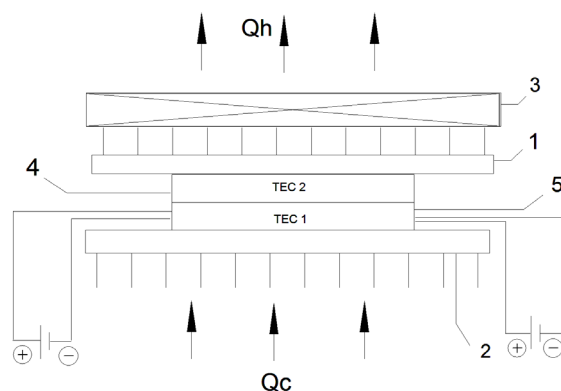
$$R_h = \frac{T_h - T_a}{Q_c + W} \quad (16)$$

За верификация на аналитичния метод е направено сравнение на получените резултати за термоелектрическите параметри на два ТЕМ с резултатите, получени от фирмен софтуер – Таблица 1.

Таблица 1. Сравняване на резултати

ТЕМ - вид		ТЕ-71-1.4-2,5	РЕ07-1-14-25
Каталожни данни	T_h	300	298
	$Q_{c,max}$	20,9	21,6
	ΔT_{max}	71	75
	I_{max}	3,7	3,9
	U_{max}	9,1	8,8
Z_0		0,00277	0,00302
Изчисления	α_m	0,0303	0,0295
	ρ_m	1,87	1,69
	k_m	0,178	0,171
Резултати от фирмен софтуер	α_m	0,0304	0,0297
	ρ_m	1,87	1,7
	k_m	0,178	0,172
Разлика	α_m	0%	1%
	ρ_m	0%	1%
	k_m	0%	1%

За изследване на общата ефективност при работа на два каскадно свързани ТЕМ на Пелтие, беше проведен експеримент. Схемната диаграма на каскадата е показана на фиг. 2.



Фиг. 2. Схемна диаграма на каскадата:
1, 2-радиатори, 3-вентилатор,
4,5-ТЕМ на Пелтие

Състои се от два модула на Пелтие 4 и 5, поставени един върху друг, два алуминиеви радиатора 1 и 2 за разсейване и абсорбиране на топлинна мощност и вентилатор 3 за принудително охлаждане на горещия радиатор. За по-ефективно отвеждане на топлинния поток е използвана и термопроводяща паста с висок коефициент на топло-

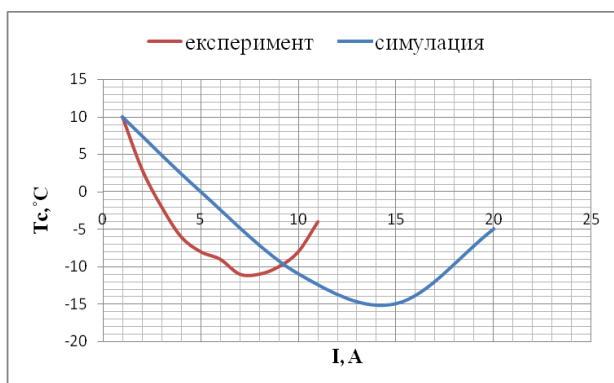
проводност, поставена, както между двата ТЕМ, така и между ТЕМ и радиаторите. Двата ТЕМ се захранват независимо един от друг от регулируеми токоизправители.

Използваните модули са тип ТВ-127-2,0-1,5 на руската фирма „Криотерм”. Каталогните им данни са посочени в таблица 2 [7].

Таблица 2 Каталогни данни на ТЕМ

Тип	U_{\max} (V)	I_{\max} (A)	ΔT_{\max} (C)	Q_{\max} (W)	Д/Ш/В (mm)	R (Ω)
ТВ-127-2,0-1,5	15,9	12,4	70	122	48×48×3,8	1,3

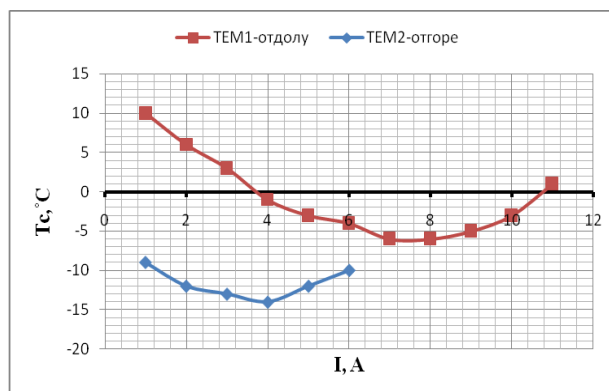
Проведени са редица измервания на температурите на студения и горещия радиатор T_c и T_h при захранващи токове от 1А до 11А на двата модула по отделно. На фиг. 3. са показани резултатите от изследванията на единия от тях – ТЕМ 1 (получените резултати за ТЕМ2 са подобни).



Фиг. 3. Зависимост на температурата на студения страна T_c от протичащият ток I

За сравнение, на графиката са показани и резултатите от симулация с фирмен софтуер. Вижда се, че постигнатата минимална температура по време на експеримента е $T_c = -11^\circ\text{C}$ при ток $I = 7,4\text{A}$, докато при симулацията тези стойности са: $T_c = -15^\circ\text{C}$ при ток $I = 13,8\text{A}$.

След снемане на температурните характеристики на двата ТЕМ по отделно, се премина към каскадно им свързване и изследване. Резултатите от измерванията са показани на фиг. 4.



Фиг. 4. Зависимост на температурата на студения страна T_c на двата ТЕМ от протичащият ток I

От графиките на фиг. 4 се вижда, че максималната достигната температура T_c на ТЕМ1 е $T_c = -6^\circ\text{C}$, при ток $I = 7,5\text{A}$ а на ТЕМ2 - $T_c = -14^\circ\text{C}$, при ток $I = 4\text{A}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термоелектрическите модули на Пелтие са преобразуватели, които успешно могат да се използват за охлаждане на сравнително малки обеми и детайли. Чрез каскадно свързване на два ТЕМ се получава по-добро охлаждане на най-горната (работната) повърхност. Получените експериментални резултати показват, че (за конкретно използваните ТЕМ на Пелтие) при обща консумирана мощност от каскадата $P \approx 100\text{W}$, може да се достигне работна температура $T_c = -14^\circ\text{C}$.

В първата част на статията е предложена и методика за изчисление на термоелектрическите параметри на модул на Пелтие: α_m , ρ_m и k_m , за които са необходими само базовите каталожни данни за произволен модул.

Авторите изказват благодарност на ФНИ-МОИ за финансовата подкрепата на изследванията по проект № ДН 07/18 от 15.12.2016

REFERENCE

- [1] Rowe DM, CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1995.
- [2] Goldsmid, HJ, Introduction to thermoelectricity, 2010, Spriner, Heidelberg, Germany.

- [3] Ioffe AF, Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling, 1957, Infosearch Limited, London, UK.
- [4] Lee HS, Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2010.
- [5] Du C.Y., Wen C.D., Experimental investigation and numerical analysis for one-stage thermoelectric cooler considering Thomson effect, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54: 4875-4884, 2011.
- [6] <http://kryothermtec.com/>
- [7] Luo Z, A simple method to estimate the physical characteristics of a thermoelectric cooler from vendor datasheets, *Electronics Cooling Magazine*, 2008; 14:3: 22-27.