

SISTEME DE RĂCIRE TERMOELECTRICĂ

Liviu MIHON

UNIVERSITATEA POLITEHNICA, Timișoara

Abstract: The paper present the properties of the electronic devices used as a heat pump. When this Peltier's effect device is used as a cooling device there are presented the equations for the working conditions and for the cooling power and Coefficient of Performance. Practical aspects and working conditions are presented also, depending on the geometrical dimensions and characteristics of the power supply (current and voltage). The study comprises the mounting alternative of the device and the performances depending of the size and position of the device's sink.

CONSIDERAȚII GENERALE

Un răcitor termoelectric este un dispozitiv semiconductor care funcționează ca și o mică pompă de căldură. Aplicând o tensiune continuă redusă la bornele unui asemenea dispozitiv, putem extrae căldura de la nivelul unei jonctiuni și să o transferăm celeilalte jonctiuni, pe baza efectului Peltier. Făcând referire la a un modul termoelectric (figura 1), una dintre fețele modulului se răcește în timp ce fața opusă se încălzește. Sensul fluxului de căldură vehiculat prin modul poate fi modificat ușor prin simpla inversare a sensului curentului de alimentare I.

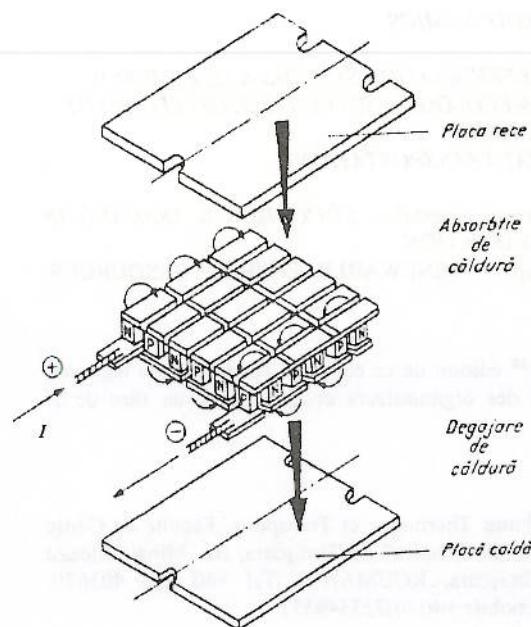


Fig. 1. Schema desfășurată a unui modul de răcire Peltier.

În studiul răcitoarelor termoelectrice intervin mai multe mărimi pentru evaluarea caracteristicilor de funcționare, cele mai importante fiind puterea de răcire (sarcina frigorifică), coeficientul de performanță și respectiv diferența maximă de temperatură pe care o poate asigura dispozitivul. Toate aceste mărimi sunt puternic influențate de temperatura la care aceste module Peltier funcționează. Toate ipotezele și teoriile stabilite pentru generatoarele termoelectrice sunt valabile și pentru răcitoarele termoelectrice.

Puterea de răcire (Sarcina frigorifică). Atât efectul Seebeck cât și efectul Peltier, pentru a se manifesta, au nevoie de jonctiuni ale termoelementelor; sunt în principiu fenomene de material și nu sunt influențate de proprietățile suprafeteelor de contact ale materialelor. Astfel, când printr-un conductor trece curent electric, se dezvoltă căldură prin efect Joule și desigur, apare și efectul Peltier care, funcție de sensul curentului, poate majora sau micșora căldura dezvoltată în acel conductor. Corespunzător, în cele două ramuri ale termocuplului, transferul de căldură dinspre sursa caldă spre cea rece este:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_p &= \alpha_p IT - \lambda_p A_p dT / dx \\ \dot{q}_n &= -\alpha_n IT - \lambda_n A_n dT / dx \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Unde: α este coeficientul absolut Seebeck, I intensitatea curentului; λ conductivitatea termică a materialului; dT/dx gradientul termic. Conform celei de a doua legi a lui Kelvin, coeficientul Peltier este dat de expresia $\alpha \cdot T$, cu T temperatura absolută. Valoarea α_p este pozitivă în timp ce α_n este negativă, astfel că în ambele cazuri căldura Peltier, $\alpha \cdot I \cdot T$, este opusă căldurii de conducție $\lambda \cdot A \cdot dT/dx$.

Valoarea căldurii generate pe unitatea de lungime în fiecare braț, prin efect Joule, este $P \cdot \rho / A$, unde ρ este rezistivitatea electrică, inversul conductivității electrice σ . Această generare de căldură conduce la neuniformități ale gradienților de temperatură, astfel că:

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_p A_p \frac{d^2 T}{dx^2} &= \frac{I^2 \rho_p}{A_p} \\ -\lambda_n A_n \frac{d^2 T}{dx^2} &= \frac{I^2 \rho_n}{A_n} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Pentru scopul propus considerăm că valorile coeficienților Seebeck sunt independenți de temperatură, deci inclusiv efectul Thomson este absent.

Condițiile la limită impuse sunt: $T = T_1$ la $x = 0$ (la nivelul sursei de căldură) și $T = T_2$ la $x = L_p$ sau L_n (la nivelul sursei reci), astfel că ecuația (2) devine:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_p A_p \frac{d^2 T}{dx^2} &= -\frac{I^2 \rho_p (x - L_p / 2)}{A_p} + \frac{\lambda_p A_p (T_2 - T_1)}{L_p} \\ -\lambda_n A_n \frac{d^2 T}{dx^2} &= -\frac{I^2 \rho_n (x - L_n / 2)}{A_n} + \frac{\lambda_n A_n (T_2 - T_1)}{L_n} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Ecuatiile (1) și (2) pot fi combinate pentru a obține valoarea fluxului de căldură la $x = 0$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_p |_{(x=0)} &= \alpha_p I T_1 - \frac{\lambda_p A_p (T_2 - T_1)}{L_p} - \frac{I^2 \rho_p L_p}{2A_p} \\ \dot{q}_n |_{(x=0)} &= -\alpha_n I T_1 - \frac{\lambda_n A_n (T_2 - T_1)}{L_n} - \frac{I^2 \rho_n L_n}{2A_n} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Dacă aceste fluxuri se însumează, la $x = 0$, fluxul de căldură extras, sau puterea de răcire \dot{q}_r la nivelul sursei de căldură este:

$$\dot{q}_r = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot I \cdot T_1 - K \cdot (T_2 - T_1) - I^2 R / 2 \quad (5)$$

în care conductanța termică în cele două ramuri paralele este:

$$K = \frac{\lambda_p A_p}{L_p} + \frac{\lambda_n A_n}{L_n} \quad (6)$$

și rezistența electrică a celor două ramuri inseriate:

$$R = \frac{L_p \cdot \rho_p}{A_p} + \frac{L_n \cdot \rho_n}{A_n} \quad (7)$$

Ecuatia (5), care reprezintă de fapt sarcina frigorifică pe care o poate extrage dispozitivul Peltier, evidențiază faptul că numai jumătate din căldura Joule, ($I^2 \cdot R$) este atribuită, convențional, sursei calde, cealaltă jumătate considerându-se la nivelul sursei reci.

Prin anularea derivatei ecuației (5) în raport cu curentul I , obținem:

$$I_{optimal} = \alpha \cdot T_1 / R \quad (8)$$

Tensiunea ce trebuie aplicată cuplului de materiale este dată de suma a doi factori: tensiunea necesară la nivelul cuplului, IR , respectiv tensiunea de acoperire a efectului Seebeck:

$$V = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot (T_2 - T_1) + I \cdot R \quad (9)$$

Aplicarea acelorași condiții de la ecuația (8) și la ecuația (9) conduce la:

$$V = \alpha \cdot T_2 \quad (10)$$

Luând în considerare expresiile curentului și tensiunii aplicate dispozitivului Peltier obținem valoarea maximă a sarcinii frigorifice:

$$\dot{q}_{rmax} = \frac{\alpha^2 \cdot T_1^2}{2R} - K \cdot \Delta T \quad (11)$$

Ținând cont de expresia coeficientului Peltier, putem exprima sarcina frigorifică maximă sub forma:

$$\dot{q}_{rmax} = \frac{\pi^2}{2R} - K \cdot \Delta T \quad (12)$$

în care π reprezintă coeficientul Peltier al dispozitivului termoelectric.

Coefficientul de performanță. Aprecierea funcționării unui dispozitiv de răcire termoelectric pentru un regim caracterizat de diferență de temperaturi ($T_2 - T_1$), mai mică decât maximul posibil, și care este parcurs de un curent optim prin dispozitivul

termoelectric, se face prin intermediul unei mărimi care se numește coeficient de performanță, Φ . Valoarea coeficientului de performanță este dată de raportul \dot{q}_r / W , unde \dot{q}_r este energia (căldura) extrasă prin răcire și W este valoarea energiei electrice consumate în scopul răciri termoelectrice. Pentru fiecare ramură a dispozitivului termoelectric putem scrie:

$$\left. \begin{aligned} W_p &= \alpha_p \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + \frac{I^2 \cdot \rho_p \cdot L_p}{A_p} \\ W_n &= -\alpha_n \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + \frac{I^2 \cdot \rho_n \cdot L_n}{A_n} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Se poate observa că energia electrică consumată depășește efectul Seebeck și efectul Joule. Energia electrică totală consumată este deci:

$$W = (\alpha_p - \alpha_n) I (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R \quad (14)$$

Valoarea coeficientului de performanță este:

$$\Phi = \frac{\dot{q}_r}{W} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \cdot I \cdot T_1 - \frac{1}{2} I^2 \cdot R - K \cdot (T_2 - T_1)}{(\alpha_p - \alpha_n) \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R} \quad (15)$$

Valoarea coeficientului de performanță maximă se obține pentru curentul optim:

$$I_{\Phi} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_2 - T_1)}{R(\sqrt{1 + Z \cdot T_M} - 1)} \quad (16)$$

unde T_M este temperatura medie, $T_M = (T_1 + T_2) / 2$. Pentru această valoare, coeficientul de performanță maxim este:

$$\Phi_{max} = \frac{T_1 \left(\sqrt{1 + Z \cdot T_M} - \frac{T_2}{T_1} \right)}{(T_2 - T_1)(\sqrt{1 + Z \cdot T_M} + 1)} \quad (17)$$

Tensiunea de lucru aplicabilă circuitului electric al dispozitivului Peltier pentru condiții de funcționare cu un coeficient de performanță maxim este:

$$V = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot \sqrt{1 + Z^* \cdot T_M}}{\sqrt{1 + Z^* \cdot T_M} - 1} \quad (18)$$

iar puterea electrică corespunzătoare acestei tensiuni este:

$$W = \frac{\sqrt{1 + Z^* \cdot T_M}}{R} \left[\frac{\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{1 + Z^* \cdot T_M} - 1} \right]^2 \quad (19)$$

ASPECTE PRACTICE ȘI DE EXPLOATARE

Răcirea termoelectrică este o alternativă foarte bună a soluțiilor clasice în condițiile în care sarcina frigorifică este relativ redusă. Cu ajutorul unui singur modul, la ora actuală se pot extrage aproximativ 125 W termici, ceea ce implică un număr mai mare de module pentru sarcini frigorifice superioare.

Fiecare aplicație ce utilizează module Peltier presupune un studiu atent pentru alegerea corespunzătoare a modulelor termoelectrice (temperatura

sursei calde, temperatura sursei reci, puterea de răcire la nivelul sursei calde, de extragere a căldurii), soluției de evacuare a căldurii la sursa rece, tensiunea și curentul de alimentare etc. Pe cât posibil soluțiile adoptate vor utiliza module Peltier de uz comercial, fiind totuși posibile și soluții particulare. La toate acestea se va ține cont desigur, în final, de caracteristicile tipice, fiabilitatea și prețul de cost al modulelor.

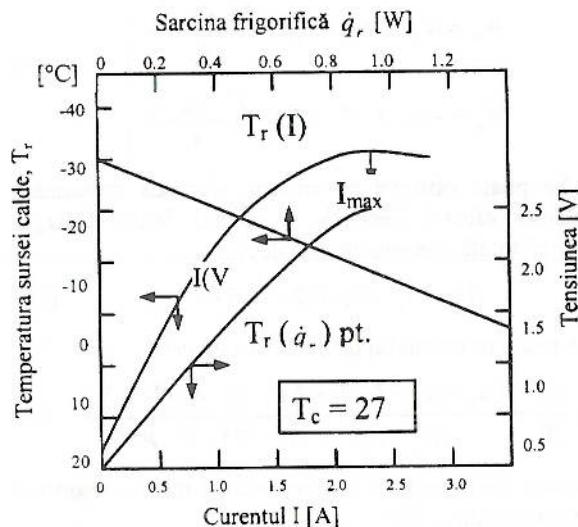


Fig. 2. Caracteristici termice și electrice ale modulelor Peltier.

Datele preliminare de calcul pentru un sistem de răcire cu module Peltier presupun identificarea numărului de straturi ale modulului pentru obținerea diferenței de temperaturi dorite între sursa caldă și rece. Diferența de temperatură ce poate fi obținută pentru diverse modele și dimensiuni depinde însă și de mediul în care modulul Peltier funcționează. Astfel, pentru funcționare în vacuum (10^{-6} torr), se obține o diferență mai mare de temperatură, față de exploatarea acelaiași

dispozitiv în aer uscat, azot sau alte gaze, cu 4–50 K. În selectarea modulelor se va ține în permanență cont de faptul că există cazuri de suprapunerile ale numărului de straturi ce pot atinge aceeași diferență de temperatură ca cea necesară aplicației studiate, caz în care prețul aplicației va fi probabil cel care impune modelul ales. Un număr superior de straturi scumpește costul modulului, astfel că pentru un preț minim se va utiliza întotdeauna varianta monostrat a dispozitivului Peltier. Proiectele ce implică utilizarea modulelor multistrat sunt de obicei mult mai complexe, dispozitivele trebuind să fie exploataate cât mai aproape de optimul tuturor caracteristicilor.

Producătorii mondiali de module termoelectrice oferă valori tabelate sau grafice de performanță pentru întreaga gamă fabricată. Valorile corespunzătoare diverselor module pentru puterea de răcire acoperă domeniul relativ larg de valori, dar trebuie reținut faptul că sarcina frigorifică maximă se realizează în condițiile anulării diferenței de temperatură între cele două surse de căldură. Un format tipic pentru valori este prezentat în tabelul 1. La o analiză mai completă se poate constata o variație liniară a diferenței maxime de temperatură în condiții de putere de răcire zero funcție de sarcina frigorifică maximă în condiții de diferență de temperatură zero (mers în gol).

După ce au fost alese preliminar unul sau mai multe module, pe baza datelor din tabele, se trece la etapa a doua, în care se aleg și alte mărimi caracteristice de funcționare, de regulă cu ajutorul unor grafice (figura 3).

Una dintre curbe prezintă efectul curentului asupra temperaturii plăcii calde, de extragere a căldurii, T_r , în condiții de sarcină frigorifică nulă. Condițiile de sarcină frigorifică nulă sunt doar ipotetice datorită existenței unor sarcini termice parazite ce apar în condițiile testărilor modulelor. Pentru module Peltier monostrat testele se efectuează în mediul ambient, în timp ce pentru sistemele multietajate acestea au loc în vid.

Tabelul 1

Performanțe și dimensiuni geometrice pentru module Peltier

	$\Delta T_{\max} \text{ pt. } q_r = 0$		q_r^{\max}	I_{\max}	V_{\max}	Dimensiuni								
						Placa inferioară			Placa superioară					
	Vacuum	Azot				Lățime mm	Lungime mm	Lățime mm	Lungime mm	Inălțime mm				
1.	67	61	0,52	1,0	0,8	5,0	5,0	5,0	5,	2,				
2.	68	64	2,45	2,0	2,0	6,6	6,6	6,	6,	2,				
3.	68	64	55,4	6,0	15,2	38	38	38	38	5,				
5.	90	84	1,04	1,5	2,1	6,6	6,6	4	4	3,8				
5.	107	98	6,29	5,7	7,4	22	28	9	13	11,1				
6.	111	87	0,85	1,1	6,9	13	17	4	8	8,8				
7.	132	83	0,66	3,8	6,5	22	28	5	5	21,1				

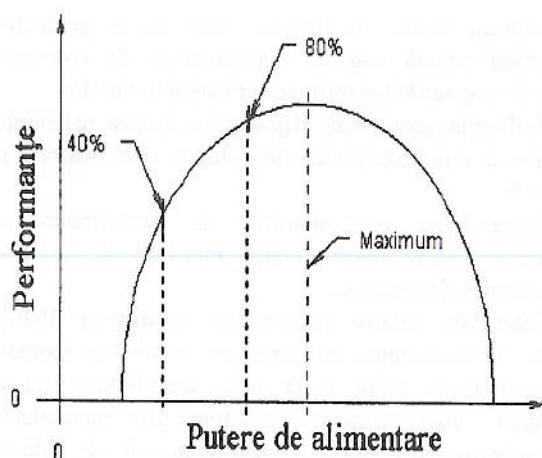


Fig. 3. Curba de performanță pentru diverse puteri electrice de alimentare.

Relația dintre temperatura sursei de extragere a căldurii T_r și sarcina frigorifică netă \dot{q}_r , pentru funcționare în regim de alimentare cu curentul maxim I_{max} este de asemenea o caracteristică ce trebuie avută în vedere. Pe măsură ce sarcina frigorifică crește diferența de temperatură care poate fi obținută se micșorează. Sarcina frigorifică netă definită prin curba caracteristică reprezintă practic sarcina termică a corpului (substanței) care se răcește. De exemplu, dacă obiectul de răcit este o componentă electronică de dimensiuni reduse, sarcina termică a acesteia este reprezentată de căldura Joule, P_R , dezvoltată la nivelul componentei, respectiv de schimbul de căldură prin conducție prin firele de legătură. În acest exemplu căldura parazită datorată schimbului de căldură prin radiație și convecție cu mediul înconjurător poate fi considerată nulă. Desigur, pentru suprafețe mari de schimb de căldură, trebuie luate în considerare sarcinile termice reprezentate de schimbul de căldură prin radiație și convecție.

Cea de a treia curbă caracteristică se referă la dependența tensiunii de curentul de alimentare. Creșterea curentului de alimentare implică și creșterea tensiunii, dar după o lege nu tocmai liniară, datorită dependențelor de temperatură a caracteristicilor de material.

Proiectarea soluției de răcire cu module Peltier trebuie să respecte trei condiții: (1) sarcina frigorifică maximă, (2) coeficient de performanță maxim, (3) viteză maximă de răcire. Funcționarea la sarcină maximă presupune un regim de alimentare cu tensiune și curent necesare extragerii căldurii, pentru diferența de temperatură aleasă. Datele oferite în tabelul 1 corespund sarcinii frigorifice maxime.

Curentul de alimentare pentru obținerea unui coeficient de performanță maxim este în mod normal mai mic decât curentul de alimentare pentru sarcina frigorifică maximă. De exemplu, pentru un același curent de alimentare, coeficientul de performanță maxim, la o temperatură a sursei de evacuare a căldurii de 27°C, este de 0,2 pentru o diferență de temperatură de 40°C, în timp ce acesta poate ajunge la 1,0 dacă

diferența de temperatură este de numai 22°C. În general, curba de performanță este foarte asemănătoare cu cea din figura 3.

Maximul acestei curbe corespunde fie diferenței de temperatură maximă fie sarcinii frigorifice maxime, care se obțin la rândul lor în condiții de curent sau tensiune de alimentare maxime. Deoarece funcționarea continuă la valoarea maximă sau în zona imediat apropiată acesteia este relativ ineficientă, mareea majoritate a modulelor Peltier sunt exploatați în domeniul cuprins între 40-80% din maximul puterii electrice de alimentare. În cazul sistemelor de reglare a temperaturii, automate sau în buclă închisă, curentul și tensiunea de alimentare vor avea valori reglate din gama celor corespunzătoare de sub curba de maxim.

Impunerea unei anumite viteze de răcire este o problemă mult mai complexă, ce nu depinde numai de caracteristicile termice și electrice ale modulului Peltier dar și de capacitatea termică a modulului și a mediului ce trebuie răcit. Mai mult, la această situație este foarte importantă alegerea și proiectarea sistemului de extragere/evacuare a căldurii la ambele surse de căldură. Uzual, durata atingerii temperaturii de răcire maximă, fie pentru modulele monostrat, fie pentru modulele multistrat, este de 60 - 90 s după aplicarea alimentării. Acest interval de timp corespunde unei sarcini frigorifice nule și cu condiții optime de izolare termică laterală a modulului și de evacuare a căldurii la sursa rece. Optimizări constructive și minimizări de pierderi termice au permis însă și atingerea unei diferențe de temperatură de 80°C în mai puțin de 2 s, cu o temperatură a sursei de evacuare a căldurii de 60°C.

Soluțiile constructive ale ansamblurilor ce exploatează efectul Peltier se pot clasifica în șase grupe (figura 4)

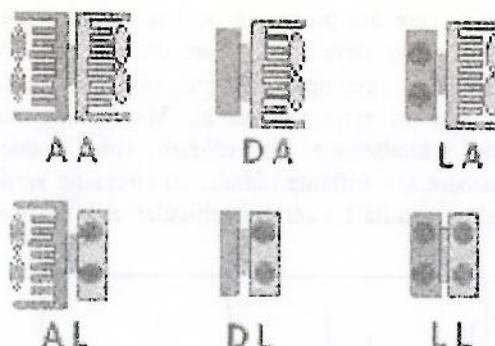


Fig. 4. Soluții constructive ale ansamblurilor cu module Peltier.

În simbolizarea corespunzătoare sistemelor prezentate prima literă reprezintă modul de extragere al căldurii, iar cea de a două literă reprezintă modul de evacuare al căldurii. Astfel, avem următoarele situații:

AA - sistem aer-aer; DL - sistem direct-lichid; AL - sistem aer-lichid; LA - sistem lichid-aer; DA - sistem direct-aer; LL - sistem lichid-lichid.

Sistemul direct ilustrat presupune contactul direct sau prin intermediul unei suprafețe plane între modulul

Peltier și corpul sau substanță care se răcește. În toate celelalte cazuri căldura este preluată sau cedată prin intermediul schimbătoarelor de căldură pentru gaze (uzual aer) respectiv lichide (uzual apă).

Performanțele termice ale modulelor termoelectrice depind foarte mult de schimbările de căldură ce se pot realiza la nivelul celor două surse de căldură. Extragerarea căldurii, importantă pentru comportamentul modului Peltier, se poate face prin convecție sau conducție, mediile răcite putând fi solide (sistem placă rece), lichide sau gazoase. Schimbătoarele de căldură diferă astfel mult pentru cele trei cazuri, fiind necesar un studiu complex, care să optimizeze constructiv și funcțional aceste dispozitive. Probleme mult mai serioase se impun însă pentru schimbătoarele de căldură ce evacuează căldura, atât cea extrasă la nivelul sursei calde cât și căldura dezvoltată prin efect Peltier și Joule. Evacuarea căldurii se poate face prin convecție, cu gaz (uzual aer) sau lichid (uzual apă) prin schimbătoare de căldură specifice. O înrăutățire a condițiilor de evacuare a căldurii conduce nemijlocit la depășirea temperaturilor admisibile pentru materialele de lipire de la nivelul jonețuielor, implicit la înrăutățirea caracteristicilor de performanță ale modulelor.

Pentru îmbunătățirea schimbului de căldură la nivelul ambelor surse de căldură cu modulul Peltier se utilizează numeroase substanțe care micșorează rezistențele termice ale suprafetelor de contact. Aceste substanțe sunt rășini sau unsori consistente cu o conductivitate termică ridicată.

O altă analiză a schimbătoarelor de căldură și în special a celor pentru medii gazoase ține cont de geometria schimbătorului de căldură adică în special de grosimea și înălțimea aripiorelor de răcire. Schimbătorul de căldură este o piesă metalică (uzual aluminiu) care are prevăzută pe față opusă modului termoelectric o serie de aripiore de răcire în diverse configurații și geometrii (drepte, ondulate, perforate etc.) fixate în serie sau radial. Marea majoritate a acestor schimbătoare de căldură sunt dotate cu ventilatoare sau suflante radiale, cu circulație verticală, paralelă sau radială a aerului vehiculat. Schimbătoarele

de căldură răcite cu lichide (apă) au o geometrie cilindrică simplă datorită coeficienților de convecție mari și a capacitaților termice ridicate a lichidelor.

Influența geometriei aripiorelor asupra rezistenței termice a schimbătoarelor de căldură este ilustrată în figura 5.

Dependența coeficientului de performanță al modului Peltier pentru condiții mai bune de răcire se poate urmări în figura 6.

Înălțimile relativ reduse ale modulelor Peltier conduc la necesitatea utilizării unor materiale speciale pentru izolarea celor două surse de căldură sau la aplicarea unor soluții constructive, prin intercalarea unor extensii între modul și schimbătoarele de căldură aferente, (figura 7). Aceste extensii au de obicei aceeași suprafață de contact ca și cea a modului Peltier. Acest sistem de distanțare mai este utilizat și în cazul schemelor de control ale temperaturii, când, prin creșterea rezistenței termice a ansamblului scad pierderile masive de căldură ale incintei răcite, crescând durata intervalului dintre porniri/opriri ale sursei de alimentare. Pentru anumite construcții ale schimbătorului de căldură, piesa de extensie poate să facă corp comun cu corpul schimbătorului.

În figura 8 sunt prezentate valorile puterilor electrice de alimentare la nivelul unui modul Peltier, pentru cele două cazuri de montaj și pentru diferite grosimi ale piesei de distanțare, respectiv pentru diverse suprafete de contact cu modulul termoelectric ale schimbătorului de căldură la sursa de evacuare a căldurii. Suprafața efectivă a modului termoelectric testat este de 16 cm^2 .

Se poate constata o comportare mai bună a modulelor termoelectrice echipate cu extensii pe partea sursei reci, cu micșorări ale puterii electrice de alimentare. Există situații în care utilizarea extensiilor este impropriu precum și situații în care, pentru o anumită configurație, se impune un studiu de optimizarea a dimensiunilor suprafetei de contact a schimbătorului de căldură cu modulul termoelectric precum și a dimensiunilor și dispoziției aripiorelor de răcire.

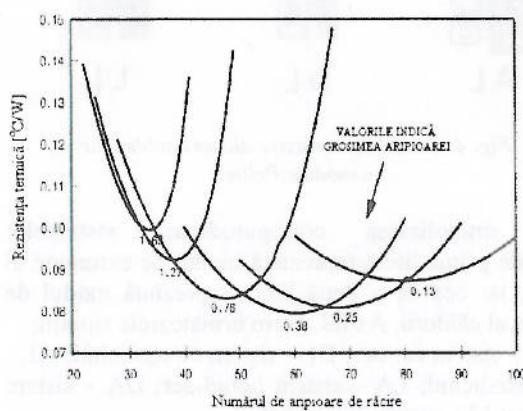


Fig. 5. Influența numărului și grosimii aripiorelor schimbătoarelor de căldură asupra rezistenței termice a acestora.

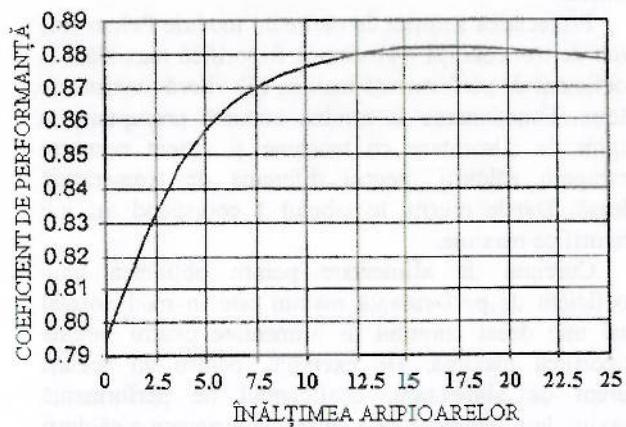


Fig. 6. Influența dimensiunilor geometrice ale aripiorelor asupra coeficientului de performanță al modului Peltier.

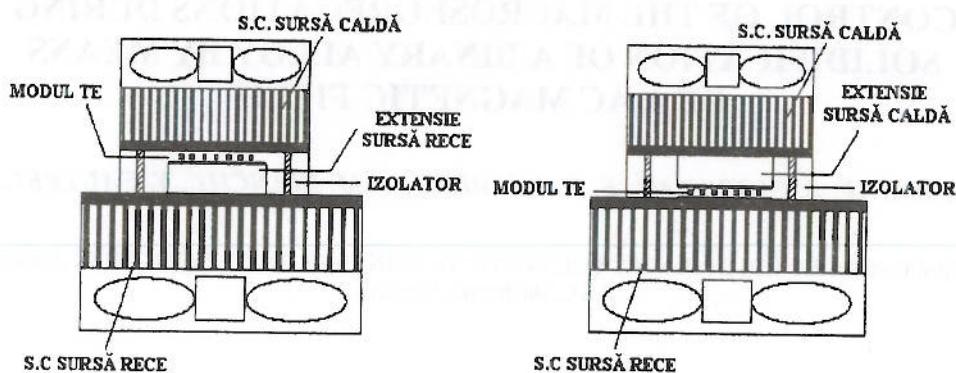


Fig. 7. Soluții constructive pentru îmbunătățirea izolației între sursele de căldură.

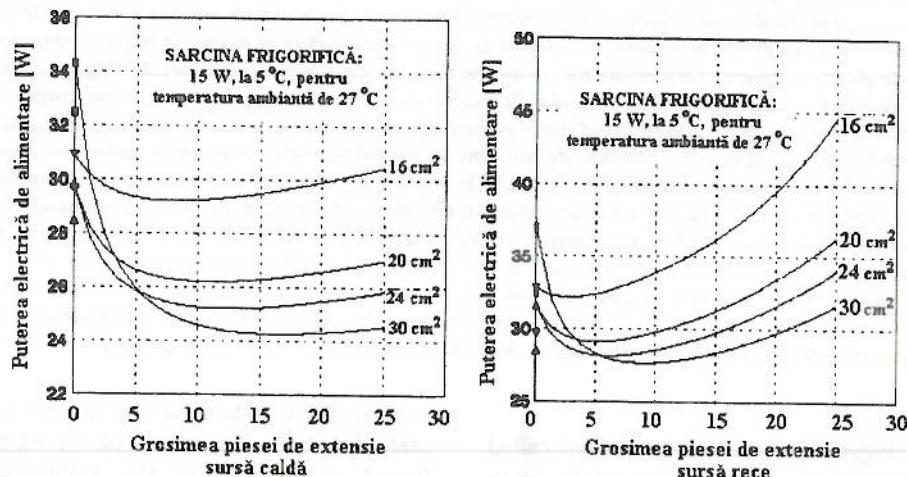


Fig. 8. Puterea electrică de alimentare funcție de grosimea piesei de extensie.

Utilizarea răcitoarelor termoelectrice este favorabilă pentru sarcini frigorifice care pornesc de la ordinul mW până la valori de sute de W termici. Modulele monostrat pot pompa între 3÷6 W/cm² de suprafață a modulului, pentru sarcini frigorifice mai mari fiind utilizate asamblări matriciale, termic în paralel. Puterile de răcire de ordinul miilor de kW termici au avut aplicații în

domeniul submarinelor sau a transportului feroviar de persoane, fiind însă soluții neuzuale.

BIBLIOGRAFIE

- [1] MIHON, L., *Conversia și răcirea termoelectrică*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2001.
- [2] *** MELCOR Thermal Solutions, Melcor Corporation, Trenton, NJ, USA, 1998.