

UTILIZAREA PROGRAMULUI SIMULINK PENTRU STUDIAREA CARACTERISTICILOR UNUI TERMOSTAT REALIZAT CU UN MODUL TERMOELECTRIC DE RĂCIRE PELTIER

dr. ing. Cristian Dumitrache

Universitatea "Valahia" Târgoviște

Rezumat: Acest articol prezintă o succesiune de modele Simulink, ce permit studierea caracteristicilor unui termostat pentru temperaturi joase. Elementul de execuție este un modul termoelectric de răcire (TEC) Peltier, al cărui model Simulink este validat prin comparație cu datele de catalog (Melcor: CP 1.4-127-067) și cu programul Spice. Ansamblul modelelor ce alcătuiesc termostatul permit studierea caracteristicilor de reglaj în funcție de: tipul TEC Peltier, temperatura programată, temperatura, ambianța, sarcina termică, rezistența termică a radiatorului TEC și constantele regulatorului PID analogic folosit. Rezultatele obținute evidențiază o puternică interdependență a parametrilor menționați, ceea ce ar trebui să descurajeze orice proiectare lipsită de coeficienți importanți de siguranță.

Cuvinte cheie: TEC Peltier, Simulink, Dioda Laser, termostat, Melcor.

1. Modelul Simulink al TEC Peltier

Modelul termoelectric de răcire Peltier este un dispozitiv semiconductor, alcătuit dintr-un substrat (Al_2 sau BaO), perechi de elemente n (BiTeSe) și p (BiTeSb) și un metal conductor (Cu) (figura 1).

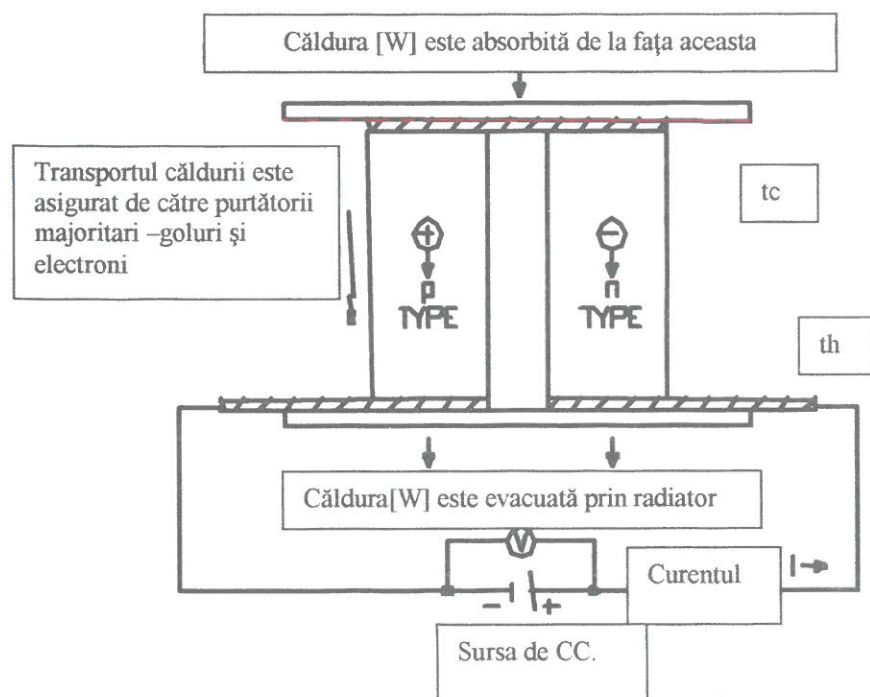


Figura 1. O pereche p-n ca element constitutiv al TEC Peltier

Termocuplele p-n sunt legate în serie, din punct de vedere electric, și în paralel, din punct de vedere termic. Pentru un sens al curentului continuu aplicat, o față se răcește, iar cealaltă se încălzește – funcționarea fiind analogă unei mașini frigorifice, însă fără elemente în mișcare și la dimensiuni mici. Pentru puteri moderate (până la 220W), este folosit ca element de răcire pentru diode laser, matrici CCD, dispozitive semiconductoare etc.

Efectul Peltier a fost descoperit în 1832 de către J.C.A. Peltier, studiat de către E. Lenz în 1834 și, în fine, explicat teoretic, pe baza ecuației de transport Boltzmann, de către A. Altenkirsch, în anul 1909.

Ecuațiile folosite de noi pentru deducerea modelului se găsesc, de exemplu, în [1] și în [2], ele stând și la baza programului de firmă AZTEC [4] și a indicațiilor de proiectare din [3]:

- Căldura (în W) pompată de la fața rece:

$$Q_c = 2N[\alpha IT_c - (I^2 \rho) / (2G) - kDTG] \quad (1)$$

Observăm că efectului util I se opune la încălzirea prin efect Joule și transportul de căldură datorat conductibilității termice a probei. Micșorarea acestor doi termeni alături de mărirea coeficientului Seebeck (α) dă o întreagă direcție de studii tehnologice [7].

- Tensiunea aplicată:

$$V=2N[(I\rho)/(G)+\alpha DT] \quad (2)$$

Trebuie învins și efectul Seebeck propriu-zis pentru a forța curentul I.

- Curentul optim:

$$I_{opt}=[K \cdot DT \cdot G(1+(1+ZT_{AVE})^{1/2})]/(\alpha T_{AVE}) \quad (3)$$

Acest curent corespunde maximului coeficientului de performanță COP.

- Curentul maxim:

$$I_{max}=(kG/\alpha)[(1+(2ZT_h))^{1/2}-1] \quad (4)$$

Acest curent corespunde puterii maxime evacuate de la fața rece.

Coeficientul de performanță este definit ca fiind raportul dintre căldura transportată Q_c (în W) și puterea absorbită de la sursă (UI). Valoarea sa optimă este:

$$COP_{opt}=(T_{AVE}/DT) [((1+ZT_{AVE})^{1/2}-1)/((1+ZT_{AVE})^{1/2}+1)]^{1/2} \quad (5)$$

- Diferența maximă de temperatură (ce corespunde sarcinii termice $Q_a=0$ este:

$$DT_{max}=T\alpha-[(1+2ZT_h)^{1/2}-1]/Z \quad (6)$$

Notațiile folosite sunt:

Th	Temperatura feței calde (Kelvin)
Tc	Temperatura feței reci (Kelvin)
DT	Th - Tc (Kelvin)
Tave	½ (Th+Tc) (Kelvin)
G	Aria/Lungime, pentru un element (în sau mm)
N	Număr de termocuple
I	Curent (A)
COP	Coeficient de performanță (Q_c/Iv)
α	Coeficient Seebeck (V/K)
ρ	Rezistivitate termică (ohm•cm)
k	Conductivitate termică (W/(cmK))
Z	Figură de merit ($\alpha^2/\rho k$) (K-1)
S	Tensiune Seebeck (V&K)
R	Rezistență electrică $2\rho N/G$ (ohm)
K	Conductanță termică a dispozitivului $2 kNG$ (W/K).

Modelul Simulink al TEC Peltier este prezentat în figura 2. Notațiile sunt cele din text.

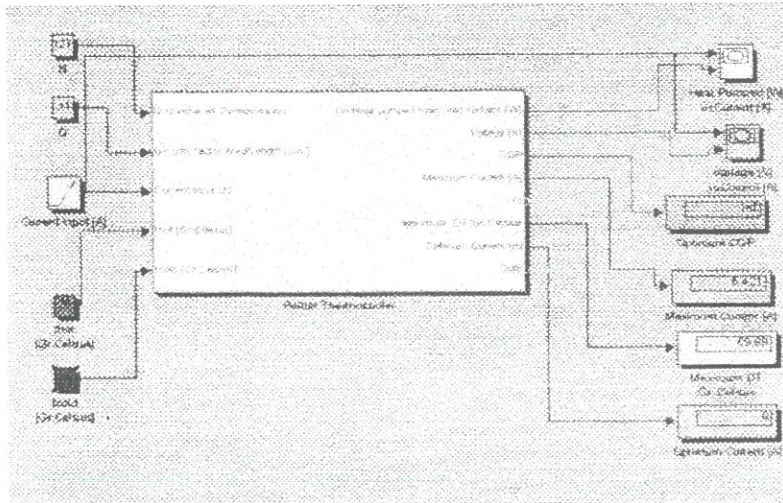


Figura 2. Modelul Simulink pentru TEC Peltier

Structura internă a acestui model este prezentată în figura 3. Aici s-au mai folosit două modele separate: unul ce permite evaluarea constantelor de material, prin interpolare (α , ρ , k , Z în funcție de temperatura medie T_{AVE}) și unul ce permite calculul coeficienților specifici de performanță (COP, I_{max} , I_{opt} , ΔT_{max}).

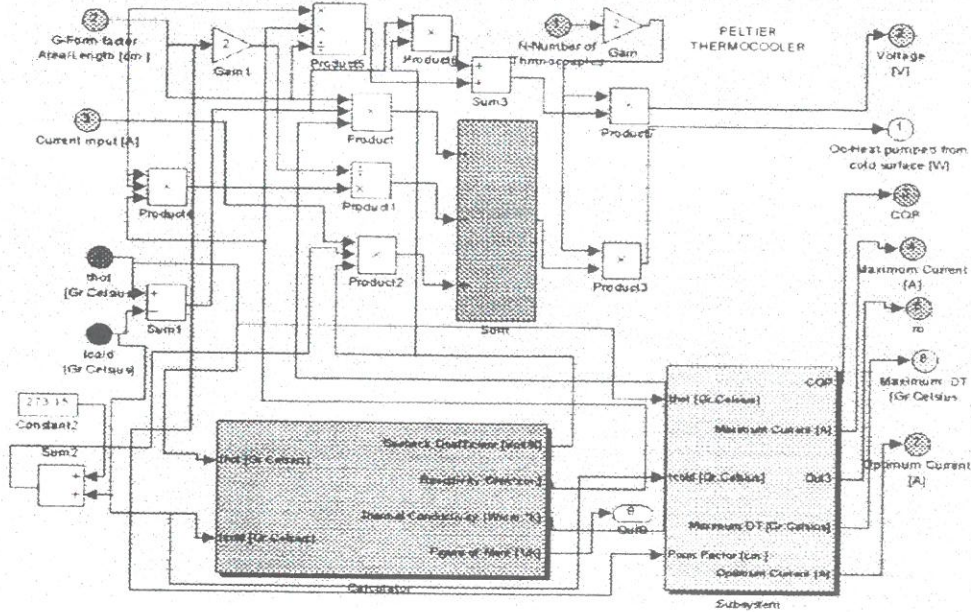


Figura 3. Structura internă a modelului Simulink pentru un TEC Peltier

Pentru acest model (particularizat la TEC Peltier Melcor tip CP 1.4 – 127 – 07L), considerând sarcina termică $Q_a=0W$, $\Delta T=0K$, rezistențele termice ale adevizului la ambele fețe $0K/W$ și rezistența termică a radiatorului montat la fața caldă $0K/W$ s-au obținut caracteristici de transfer din figura 4.

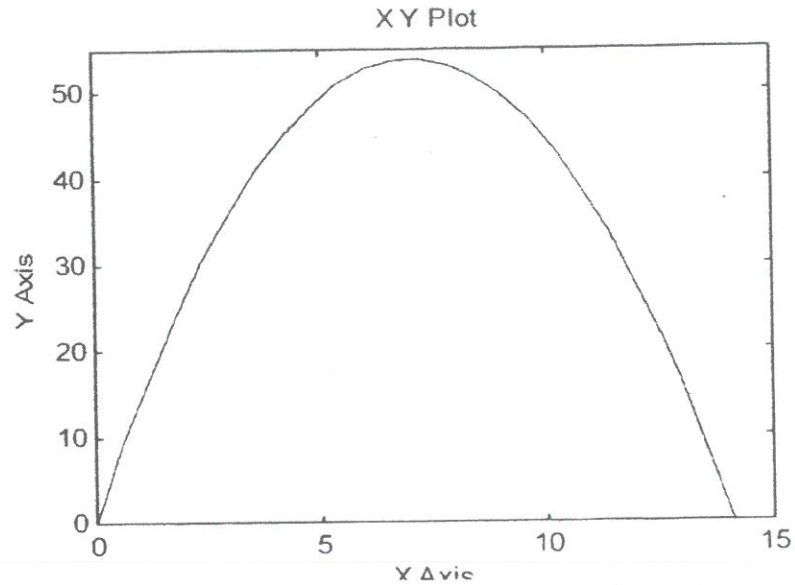


Figura 4. Căldura pompată de la suprafața rece în W în funcție de curentul I în Amperi
 Și caracteristica de intrare, I – V din figura 5:

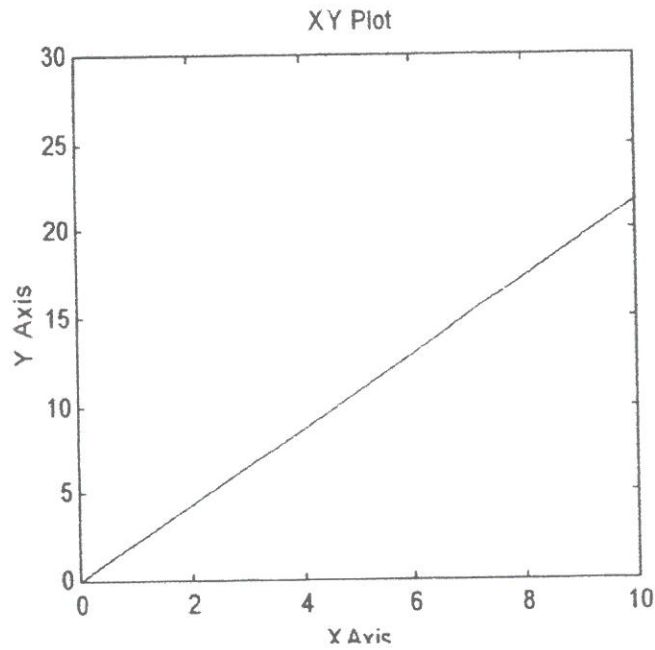


Figura 5. Tensiune V în Volți în funcție de curentul I în Amperi

Pentru acest TEC Peltier, sunt date în tabelul de mai jos, comparativ, utilizând date oferite de firma producătoare Melcor [2] și [4], datele obținute prin simulare Spice și raportate în [5] și datele obținute de autor în acest articol.

CP 1.4 – 127 – 06L Sursa	I_{max} [A]	Q_{max} [W]	V_{max} [V]	ΔT_{max} [°C]
Melcor [2] și [4]	6	51.4	15.4	67
Articol [5] - Spice	6	53.6	15.2	64
Modelul Simulink folosit de autor	5.4	54	13@5.4A 14.8@6A	69.6

Concordanța este mulțumitoare, iar abaterea la I_{max} poate fi pusă pe seama considerării de către noi a temperaturilor $t_c=t_h=25^\circ\text{C}$. Pentru ca acest model ce conduce la o anumită dependență a căldurii absorbite în W de curentul pompat în Amperi să poată fi folosit mai departe într-o buclă de reglare, vor trebui modelate sarcina termică și radiatorul.

2. Modelul sarcinii termice

Acesta trebuie să ia în considerare caracteristicile concrete ale corpului (sau eventual ale incintei) ce trebuie răcit(ă). În acest articol, am considerat o diodă laser fixată prin lipire pe fața rece a TEC. Sarcina termică are, în regim staționar, două componente [3]: una activă, legată de căldura dirijată de dispozitivul ce trebuie răcit (Q_a), și una pasivă, legată de pierderile de căldură. Componenta pasivă cuprinde, la un loc, pierderile prin convecție și prin conducție, fiind proporțională cu gradientul de temperatură $T_{ambiant} - T_{cald}$. În modelul termic, aceasta este modelată prin rezistența termică R_o (care înglobează pierderea medie prin radiație – care este proporțională cu puterea a patra a temperaturilor absolute).

În regim tranzitoriu, intervine și capacitatea calorică ($C_o=masa \times căldura\ specifică$) a dispozitivului ce se răcește.

Modelul termic al sarcinii este prezentat în figura 6.

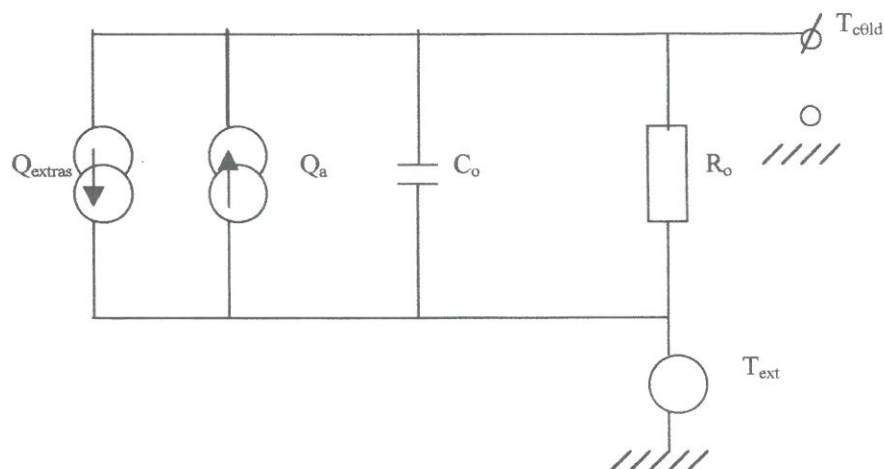


Figura 6. Modelul termic al sarcinii

Ecuția diferențială (7) ce descrie acest model, utilizează Simulink ca în figura 7.

$$\frac{1}{C_o} \Delta Q - \frac{T_e - T_c}{C_o R_o} = \dot{T}_e - \dot{T}_c \quad (7)$$

Pentru cazul concret, considerat de autor în acest articol:

$$C_o = 0.5 \text{ J/K}$$

$$R_o = 4 \text{ K/W}$$

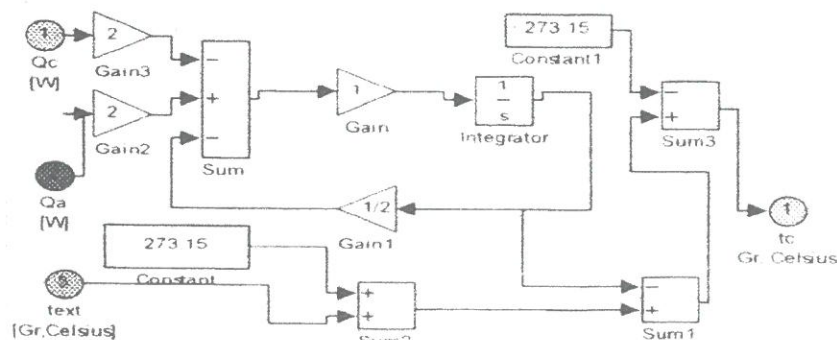


Figura 7. Modelul Simulink al sarcinii

Acest model dictează temperatura feței reci t_c , el acționând ca o buclă de reacție pe modelul TEC Peltier.

3. Modelul termic al radiatorului

Prin rezistența termică a radiatorului se face trecerea de la temperatura feței calde (T_h) la temperatura exteriară T_e . Puterea disipată de radiator este suma dintre puterea electrică IU – absorbită de TEC, de sursa de tensiune (sursa de curent) și sarcina termică totală atât activă, cât și pasivă. La o valoare mare a acestei rezistențe termice, temperatura T_h a feței calde va crește mult peste temperatura mediului ambiant, fiind posibil să se atingă temperatura prescrisă pentru termostat, mai ales dacă sarcina termică activă este mare. Radiatorul reprezintă a doua buclă de reacție ce acționează asupra TEC Peltier.

O porțiune a modelului împreună cu o comandă a temperaturii exterioare și, eventual, a perturbației acesteia, apare în figura 8. Acest model este propriu-zis al TEC Peltier ca element de execuție pentru termostat.

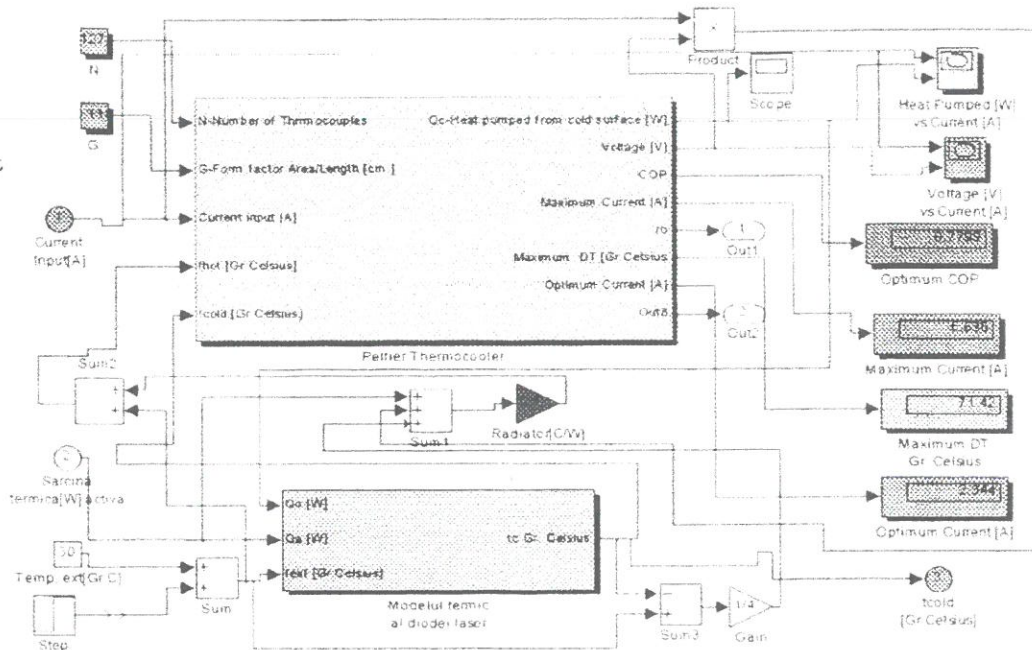


Figura 8. Modelul TEC Peltier ca element de execuție pentru termostat

4. Modelul termostatului ca sistem de reglare automată

Structura acestui model este cea obișnuită, fiind reprezentată în figura 9. Parametrii de reglaj ai regulatorului PID sunt $K_p=35$; $K_i=45$ și $K_d=0.1$.

Blocul de saturație limitează curentul la 5A pentru a depăși I_{max} .

Variația sarcinii termice și a temperaturii ambiante sunt considerate ca fiind perturbații ale căror efect se urmărește. Câștigul traductorului este considerat 0.01 A/K.

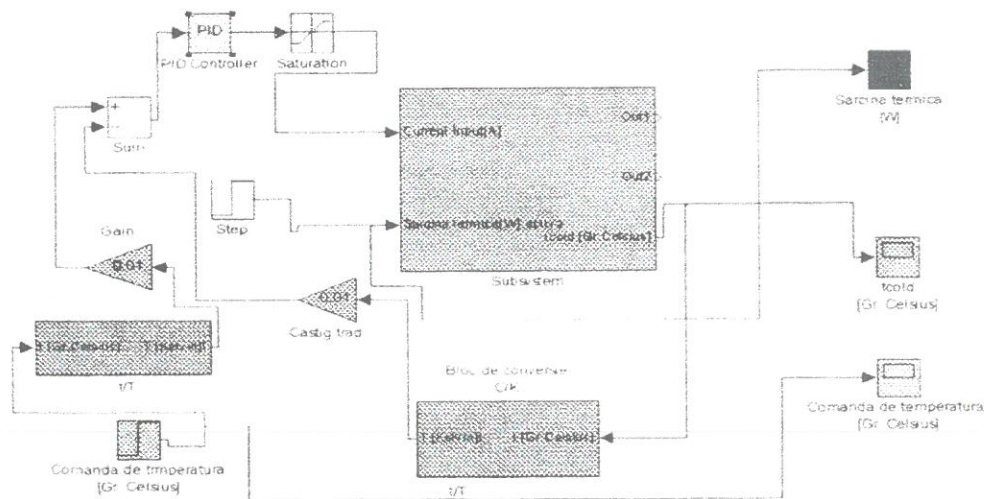


Figura 9. Modelul Simulink al termostatului SRA

5. Discuția rezultatelor simulării

Modelul Simulink al termostatului cu TEC Peltier a fost supus unui set de încercări pentru validarea propriu-zisă a proiectării, precum și pentru a evalua comportarea sa la perturbații.

Figura 10 evidențiază comportarea sistemului la dreapta de comanda de 0°C pentru temperatura ambiantă de 25°C și cu sarcină termică activă $Q_a=10\text{W}$ (100% peste condiția temei).

Răspunsul are un suprareglaj de -6°C și un timp de stabilire de aproximativ 1.5s fără eroare staționară. Aceasta este prima indicație că sistemul, în ansamblu, (cuprinzând regulatorul PID și termostatul propriu-zis) au încă o rezervă de reglaj. Pentru acest caz, rezistența termică a radiatorului a fost 0.5K/W .

Deși mărirea amplificării proporționale până la $K_p=55$ va îmbunătăți atât suprareglajul, cât și timpul de stabilire, am menținut mai departe simularea în parametrii inițiali pentru a evalua rezervele sistemului.

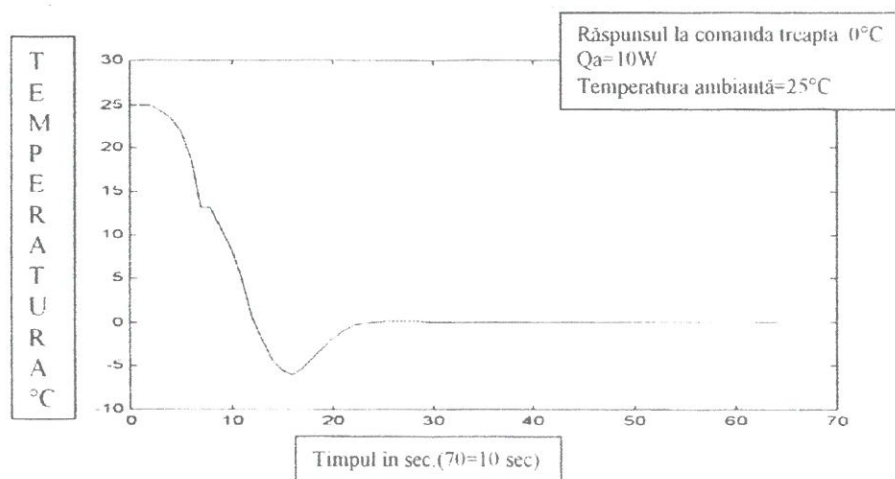


Figura 10. Comportarea sistemului neperturbat la treapta de 0°C

O astfel de situație extremă este prezentată în figura 11. Aici, rezistența termică a radiatorului este menținută la 0.5K/W , comanda este tot 0°C , sarcina termică activă este inițial 5W pentru ca la $t=5\text{s}$ să devină 10W , iar temperatura ambiantă crește la $t=3\text{s}$ de la 25°C la 30°C . Efectul acestei creșteri de temperatură este resimțit în întregime de termostat și este anulat după aproximativ 1 secundă. Efectul dublării puterii disipate de către dioda

laser, de la 5W la 10W (improbabil practic) este preluat de termostat la o amplitudine a răspunsului mult mai mică procentual.

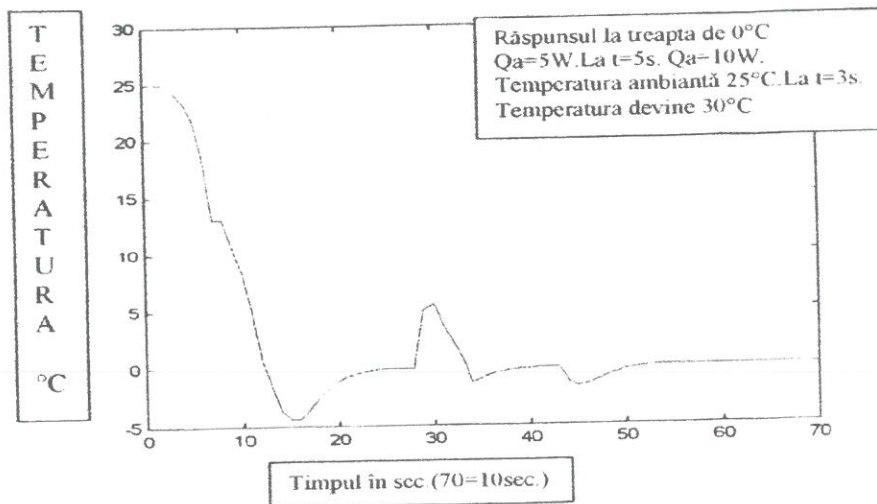


Figura 11. Efectul perturbațiilor

Explicația stă în disponerea liberă a diodei laser pe suprafața de răcire și absența oricărei izolații față de mediul înconjurător. Micșorarea rezistenței termice a radiatorului termostatului până la 0.1 K/W nu va îmbunătăți semnificativ răspunsul.

În cazul în care acest efect nu poate fi tolerat, este necesară folosirea unei incinte izolate de mediul înconjurător, deci, modificarea modelului termic al sarcinii la noi parametri.

Pentru a avea o imagine globală asupra caracteristicilor acestui termostat, am reprezentat în figura 12 trei situații diferite de funcționare. Pentru a putea urmări efectul, am punctat cu 10 un termostat ce încă realizează o temperatură comandată de 0°C și cu O un termostat ce nu mai corespunde comenzii.

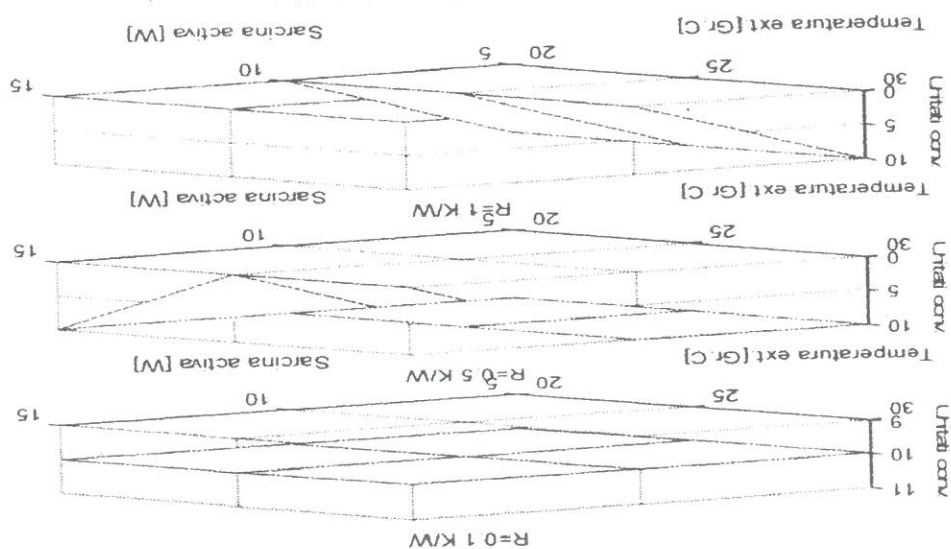


Figura 12. Trei regimuri de funcționare pentru un termostat

Acestea corespund unui vector:

$$Q_a [W] = [5, 10, 15]$$

$$t \text{ ambiant } [^{\circ}\text{C}] = [20, 25, 30].$$

Având drept parametru rezistența termică a radiatorului termostatului ce este R [K/W] = [0.1, 0.5, 1], constatăm din această figură că termostatul lucrează sigur pentru $Q_a = 15W$ la $t_c = 30^\circ C$ și $R = 0.1$ K/W, în timp ce la $R = 0.5$ K/W combinația $Q_a = 15W$ cu $t_a = 25^\circ C$ scoate din funcțiune termostatul și, cu atât mai mult, combinația de parametri $Q_a = 15W$ cu $t_a = 30^\circ C$. Deja se poate observa importanța radiatorului și a temperaturii ambiante ce duc mai rapid procentual la pierderea controlului asupra funcționării termostatului și aceasta în comparație cu creșterea mare (300%) a sarcinii termice active. Această constatare ar trebui să descurajeze construcțiile ce nu au supradimensionată puterea TEC Peltier în raport cu sarcina termică activă.

Pentru rezistența termică a radiatorului de 1 K/W, funcționarea nu mai este sigură, indiferent de temperatură, decât pentru $Q_a = 5W$. Cele trei valori pentru rezistența termică a radiatorului corespund [3]: $R=1K/W$ – răcire doar prin conducție, $R=0.5K/W$ răcire forțată cu aer (ventilator) și $R=0.1K/W$ răcire forțată cu lichid de răcire.

Proiectarea verificată de noi prin modelare (ce corespunde la $Q_a = 5W$, $t_a \leq 30^\circ C$ și $R \leq 0.5K/W$) este acoperitoare.

6. Concluzii generale

Alături de concluziile particulare, prezentate în capitolul anterior, putem desprinde câteva concluzii al căror caracter de generalitate le fac utile oricărei proiectări cu TEC Peltier a unor termostate pentru temperaturi semnificativ mai mici față de temperatura ambiantă:

1. se poate folosi Simulink pentru modelarea Peltier ca element de execuție într-o buclă de reglare automată a temperaturii; rezultatul obținut de noi arată o bună concordanță a parametrilor obținuți față de foile de catalog sau de rezultatele simulării Spice pe model termic [2], [4], [5];
2. modelul permite schimbarea parametrilor pentru a se adapta tipului concret de TEC folosit; aici este necesară cunoașterea materialului semiconductor și a numărului de perechi de termocuple;
3. se poate modela, din punct de vedere termic, atât sarcina termică (cu diferite variante ale structurii închise sau deschise și diferite izolații), cât și rezistența termică a radiatorului și, mai ales, se poate studia efectul global al schimbării parametrilor modelului asupra răspunsului la comanda de temperatură;
4. pentru comenzi de temperatură ce merg către $\frac{1}{2}$ din ΔT_{max} al elementului Peltier (ce este în jur de $60^\circ C$), adoptarea unui coeficient de siguranță în alegerea puterii TEC, în raport cu sarcina termică activă, cuprins între 12 și 4, este o soluție acoperitoare, chiar dacă neeconomică;
5. în condițiile de mai sus, varianta răcirii cu aer a radiatorului este de preferat celorlalte 2 variante;
6. structurile izolate, pe cât posibil, de influențele termice exterioare, sunt mai flexibile la modificarea datelor inițiale, deci, vor fi preferate;
7. o simulare a situației reale de funcționare este necesară și poate să corecteze soluția inițială, apropiind-o de cea economică.

Bibliografie

1. KIREEV, P.S.: Semiconductor Physics, Mir Publishers, Moscow, 1974.
2. * * *: Melcor Thermal Solutions, Melcor, 1999.
3. * * *: Thermoelectric Cooling Systems Design Guide, Marlow Industries, 1998.
4. * * *: AZTEC TM – Thermoelectric Design / Selection Guide.
5. LEONESCU, D., P. SVASTA, R. BAUER, W. SAUER: Spice Simulation of a Thermoelectric Module. În: The VIIth International Symposium for Design and Technology in Electronics Modules, Bucharest, September 2001.
6. Simulink și Matlab sunt mărci înregistrate ale "The MathWorks Inc."
7. KIMMEL, J.: Thermoelectric Materials. În: Physics, 152, March 2, 1999.