

# Sistem za krmiljenje temperature laserskih diod

Marko POGAČAR, Vid AGREŽ, Vid NOVAK, Jaka PETELIN, Rok PETKOVŠEK, Janez DIACI

**Izvleček:** Članek opisuje razvoj sistema za temperaturno krmiljenje laserskih diod, ki temelji na hladilnem sistemu s termoelektričnimi moduli, zračnem hladilniku, NTC-temperaturnem zaznavalu in industrijskem PID-krmilniku. V okviru raziskave je bil razvit matematični model temperaturnokrmilnega sistema. Model je bil validiran po metodi pozitivnega koračnega odziva in je omogočil teoretično analizo realnega sistema in določitev parametrov PID-krmilnika. Na teh osnovah je bil razvit prototipni sistem. Z meritvami na njem je bilo potrjeno, da izbrani PID-parametri omogočajo doseganje zahtevanih sistemskih karakteristik.

**Ključne besede:** temperaturno krmiljenje, termoelektrični moduli, PID krmiljenje, pulzno širinska modulacija, krmilni sistemi, laserske diode

## 1 Uvod

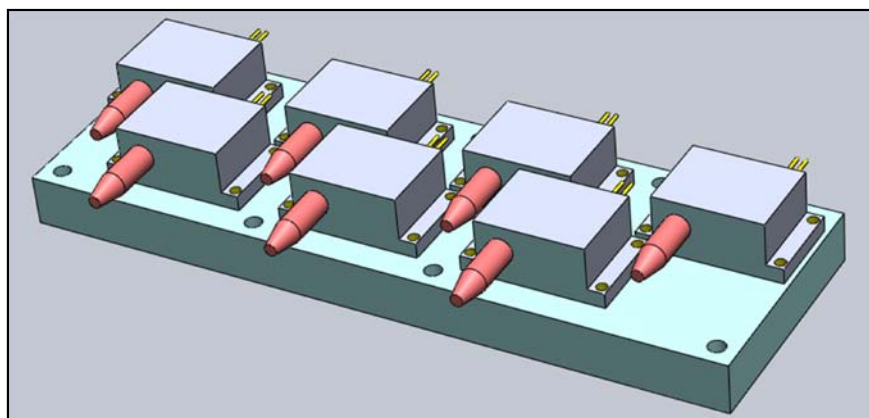
Pri laserskem sistemu (slika 1), katerega aktivna snov je optično vlakno ali trdninski kristal, se za vzbujanje uporabljajo polprevodniški laserji, imenovani tudi laserske diode. Črpalne laserske diode omogočajo visok izkoristek črpanja, saj se lahko izberejo tako, da valovna dolžina njihove svetlobe sovpada s tisto, ki jo aktivna snov najbolje absorbira. Polprevodniški kristali laserskih diod so relativno majhni (velikostni red 1 mm), imajo pa relativno visok izkoristek glede na ostale laserske sisteme (okoli 60 %). Trenutno se za črpanje vlakenskih laserjev najpogosteje uporabljajo laserske diode, sklopljene v pasivno optično vlakno z močjo

med 8 W in 30 W. Med delovanjem se del dovedene električne energije v kristalu pretvori v toploto, ki se odvede na ohišje in od tam v okolico. Posledica tega je sprememba temperature kristala, ki pa ima pomem-

ben vpliv na delovanje laserske diode, zlasti na srednjo valovno dolžino njene svetlobe. Z njenim spreminjanjem pa se spremeni tudi izkoristek črpanja aktivne snovi in s tem tudi izhodna moč celotnega laserskega



Slika 1. Shema diodno črpanega laserskega sistema velike moči



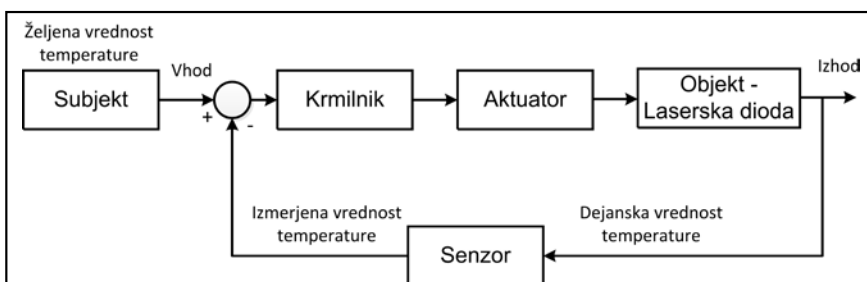
Slika 2. Primer razporeda črpalnih laserskih diod na adapterski plošči

Marko Pogačar, univ. dipl. inž., RLS d. o. o., Komenda; Vid Agrež, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Vid Novak, univ. dipl. inž., Jaka Petelin, univ. dipl. inž., oba LPKF d. o. o., Naklo; doc. dr. Rok Petkovšek, univ. dipl. inž., prof. dr. Janez Diaci, univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

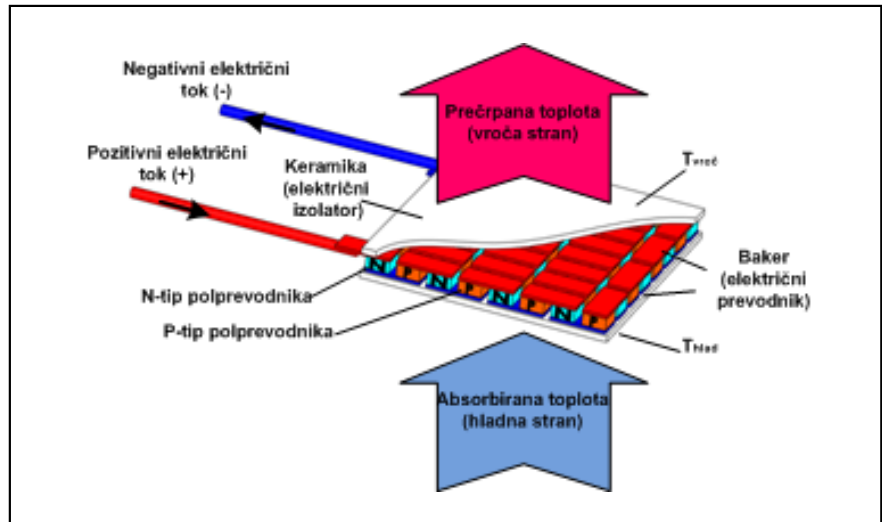
sistema. Za zanesljiv nadzor delovna sistema je zato potrebno ustrezno temperaturno krmiliti črpalne laserske diode, s čimer se omogočata nastavitve in vzdrževanje želene temperature kristala ne glede na izhodno moč žarka in druge pogoje delovanja laserske diode.

V članku predstavljamo razvoj sistema za temperaturno krmiljenje črpalnih laserskih diod, namenjenega raziskavam na področju novih vlakenskih laserskih virov. Tipično za te raziskave je, da se preučujejo različne konfiguracije črpalnih laserskih diod (primer na *sliki 2*) z namenom, da se izbere najprimernejša za določeno ciljno aplikacijo. Zaradi tega sta pri teh raziskavah pomembni prilagodljivost in spremenljivost temperaturnokrmilnega sistema v pogledu fizičnih dimenzij, števila in razporeda laserskih diod ter ostalih gradnikov sistema kot tudi zahtev po odvajanju toplote. Zato je smotno, da se temperaturnokrmilni sistem za ta namen izdelava samostojno po meri z možnostjo prilagajanja na različne razvojne zahteve, kar se izkaže za bolj ugodno kot npr. uporaba komercialnih sistemov, ki jih nudijo različni proizvajalci [1, 2, 4, 5].

S samostojnim razvojem temperaturnokrmilnega sistema se lahko izdelava modularni eksperimentalni sistem, ki se hitro prilagodi različnim izhodiščnim zahtevam. Smiselno je tudi matematično popisati celoten krmilni sistem in simulirati njegovo delovanje z različnimi vstopnimi parametri, ki jih potrebuje tak eksperimentalni sistem in matematični model. To so: odvečna toplotna moč sistema laserskih diod (toplotno breme), temperatura okolice, v kateri bo sistem deloval, in želena temperatura laserskih diod (merjena na ohišju). S tem se pridobi



Slika 3. Temperaturno krmiljenje laserske diode



Slika 4. Termoelektrični modul

dobra osnova za načrtovanje novih temperaturnokrmilnih sistemov.

## 2 Temperaturno krmiljenje črpalnih laserskih diod

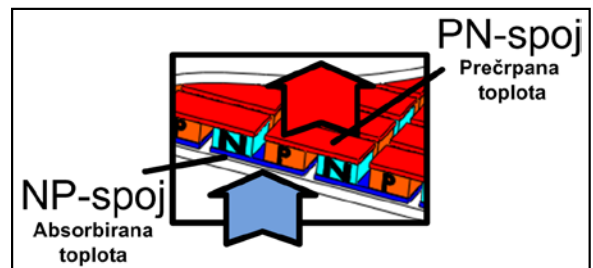
Osnovna zgradba sistema za temperaturno krmiljenje laserskih diod je prikazana na (*sliki 3*). Subjekt (operator, mi) določi želeno vrednost temperature. Zelena vrednost se primerja z dejansko vrednostjo temperature na diodi, ki jo izmeri *senzor*. Razliko obeh vrednosti spremeni *krmilnik* v krmilni signal, ki ga sprejme *aktuator*. Aktuator se odzove na krmilni signal tako, da dodatno ohladi ali ogreje lasersko diodo.

V industriji in tehniki je aktuator za temperaturno stabilizacijo laserskih diod v večini primerov termoelektrični modul [10, 14, 15, 16], ki se napetostno krmili z digitalnim ali električnim analognim krmilnikom, ki sprejema iz uporabnega NTC-

-senzorja informacijo o temperaturi na ohišju laserske diode.

### 2.1 Termoelektrični modul

Prednosti termoelektričnih modulov so: visoka stopnja odzivnosti in natančnosti tako za hlajenje kot za gretje, zasedejo zelo malo prostora, nimajo gibljivih delov, kar podaljša njihovo življenjsko dobo, ni pomembna orientacija modula v



Slika 5. PN-spoj in NP-spoj

prostoru in hladijo lahko na nižjo temperaturo, kot je v prostoru.

Pogosto so termoelektrični moduli izvedeni na osnovi polprevodnikov, ki so različno dopirani (P-dopirani polprevodniki imajo višek vrzeli, N-dopirani pa imajo višek valenčnih elektronov). P-tip in N-tip polprevodnik se zloži skupaj (*sliki 4* in *5*). Če teče električni tok skozi NP-spoj, potem se zaradi Peltierjevega pojava [3] toplota absorbira. V nasprotnem primeru se, ko teče električni tok v smeri PN-spoja, toplota oddaja. Na strani, kjer se toplota absorbira, se govori o hladni strani in obratno, kjer se toplota oddaja, se govori o vroči strani.

Glavna prednost polprevodniške

strukture je v različnih predznakah Seebeckovih koeficientov materiala [3] za P-tip in N-tip polprevodnika:  $S_p = -S_N$ . Zato se oba prispevka seštejeta in rezultat je velik Peltierjev koeficient  $\pi$ . S tem se dobi učinkovito črpanje toplote z ene strani na drugo.

Prečrpana toplota je premo sorazmerna s Seebeckovim koeficientom spoja  $S$ , z električnim tokom  $I$  in s temperaturo na hladni strani  $T_{hlad}$  (prvi člen v enačbah (1) in (2)). Z napajalnim električnim tokom se ustvarja tudi Joulova toplota, za katero se predpostavi, da greje hladno in vročo stran približno enako (drugi člen v enačbah (1) in (2)). Z večanjem temperaturnih razlik na obeh straneh termoelektričnega modula se večja tudi vpliv prevoda toplote skozi sam element (tretji člen v enačbah (1) in (2)). Enačba (1) predstavlja absorbirano toploto enega termoelektričnega modula.

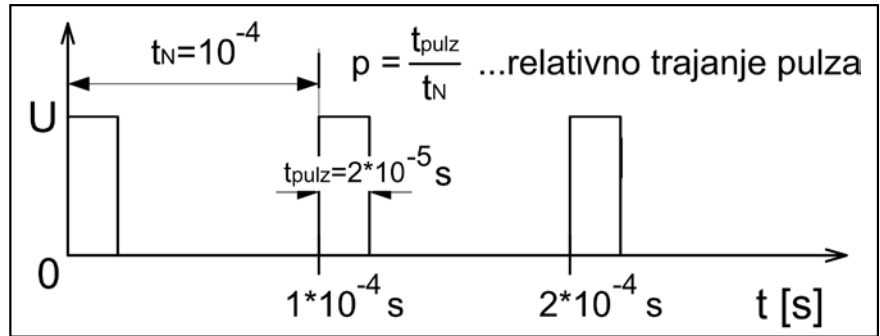
$$\dot{Q}_{hlad} = SIT_{hlad} - \frac{1}{2}RI^2 - \gamma\Delta T \quad (1)$$

Parameter  $\gamma$  je določen z enačbo:  $\gamma = \lambda A / \delta$  [W/K], kjer je  $\lambda$  toplotna prevodnost,  $A$  površina in  $\delta$  skupna debelina modula. Seebeckov koeficient materiala  $S(T)$  se s temperaturo zanemarljivo malo spremeni in se zato lahko v večini primerov prizvame za konstanto materiala  $S(T) = S_{materiala}$ .  $R$  pa zavzema celotno električno upornost termoelektričnega modula.

Koliko toplote se prečrpa na vroči strani, popisuje enačba (2), ki je v osnovi enaka kot enačba (1), le pri srednjem členu se zamenja predznak, ker sedaj Joulova toplota prispeva delež k toplotni moči, v nasprotju z enačbo na hladni strani, kjer je toplotna moč zmanjšana zaradi dodatnega odvajanja Joulove toplote.

$$\dot{Q}_{vroc} = SIT_{vroc} + \frac{1}{2}RI^2 - \gamma\Delta T \quad (2)$$

Električna moč  $P$ , ki se dovaja termoelektričnemu modulu, je enaka produktu napajalnega enosmernega električnega toka  $I$  in napetosti  $U$ :  $P = UI$ . Če se toplotni moči na



Slika 6. Pulznoširinska modulacija

vroči strani odšteje toplotna moč na hladni strani, dobimo dovajano električno moč:

$$\dot{Q}_{vroc} - \dot{Q}_{hlad} = P_{el} \quad (3)$$

Iz zgornjih enačb (1, 2, 3) se izpelje enostavna enačba (4) za napetost skozi termoelektrični modul, ki ni odvisna le od upornosti modula  $R$  in električnega toka skozi element, ampak tudi od Seebeckove napetosti (prvi člen na desni strani enačbe (4)).

$$U = S\Delta T + RI \quad (4)$$

Enačba (4) je osnova za zasnovo krmiljenja termoelektričnega modula.

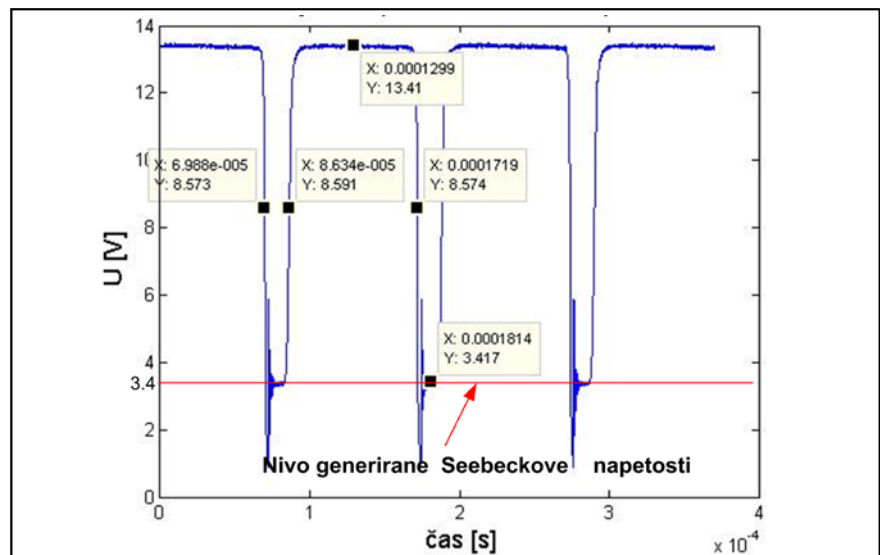
## 2.2 Krmiljenje termoelektričnega modula

Za krmiljenje termoelektričnega modula smo izbrali električno napetostno krmiljenje. Pri konstantni napajalni električni napetosti sledi iz

enačbe (4), da je pri večji temperaturni razliki na obeh straneh termoelektričnega modula večja Seebeckova napetost in manjši električni tok.

Termoelektrični modul se lahko krmili z linearnim spreminjanjem napajalne električne napetosti ali s konstantno električno napetostjo pri pulznoširinski modulaciji – PŠM. Pri krmiljenju z linearno spreminjajočo se električno napetostjo se spreminja izkoristek elementa, ki je slabši pri višjem električnem toku oziroma posledično pri višji napetosti. Z višjim električnim tokom se poveča zmožnost odvajanja večjega toplotnega toka, generira pa se tudi več odvečne Joulove toplote (slabši izkoristek).

Zaradi bolj predvidljivega matematičnega popisa smo izbrali krmiljenje s PŠM (slika 6), kjer se zaradi konstantne napajalne električne napetosti generira približno (odvisno od  $\Delta T$  v enačbi (4)) enak električni tok in se s tem ohranja približno konstanten izkoristek termoelektričnega modula.



Slika 7. Generiranje Seebeckove napetosti med pulzi

Ker smo z eksperimenti ugotovili (slika 7), da se med pulzi pri električni napajalni napetosti enaki nič generira Seebeckov električni tok  $I_{Seeb}$  smo s pomočjo eksperimentalnih rezultatov enačbi (1) in (2) preoblikovali v enačbi (5) in (6), ki na novo in bolje popisujeta krmiljenje s pulznoširinsko modulacijo:

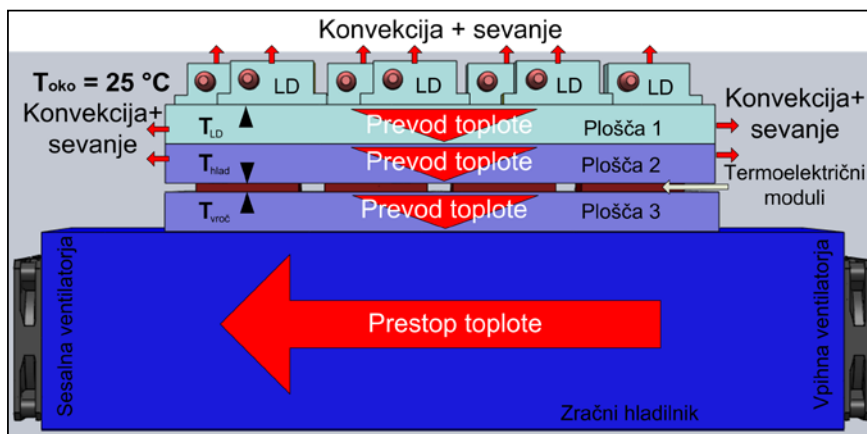
$$\dot{Q}_{hlad} = p(SIT_{hlad} - \frac{1}{2}RI^2) - \gamma\Delta T - (1-p)(SI_{Seeb}T_{hlad} + \frac{1}{2}RI_{Seeb}^2) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{vroc} = p(SIT_{vroc} + \frac{1}{2}RI^2) - \gamma\Delta T + (1-p)(SI_{Seeb}T_{vroc} - \frac{1}{2}RI_{Seeb}^2) \quad (6)$$

V enačbah (4) in (5) pomeni spremenljivka  $p$  relativno trajanje pulza, izraz  $(1-p)$  pa označuje relativni čas med pulzi.

Na sliki 7 je vidna generirana Seebeckova napetost (v primeru na sliki 7 je 3,4 V) med pulzi. Meritve napetosti smo izvedli z diferencialnim merjenjem.

Seebeckova napetost zmanjšuje vrednost napajalnega električnega toka v času pulza (enačba 4) in požene Seebeckov električni tok. Generirana Seebeckova napetost je lahko pozitivna ali negativna, odvisno od strani



Slika 8. Prezračevalni sistem. Puščice označujejo smer prenosa toplote.

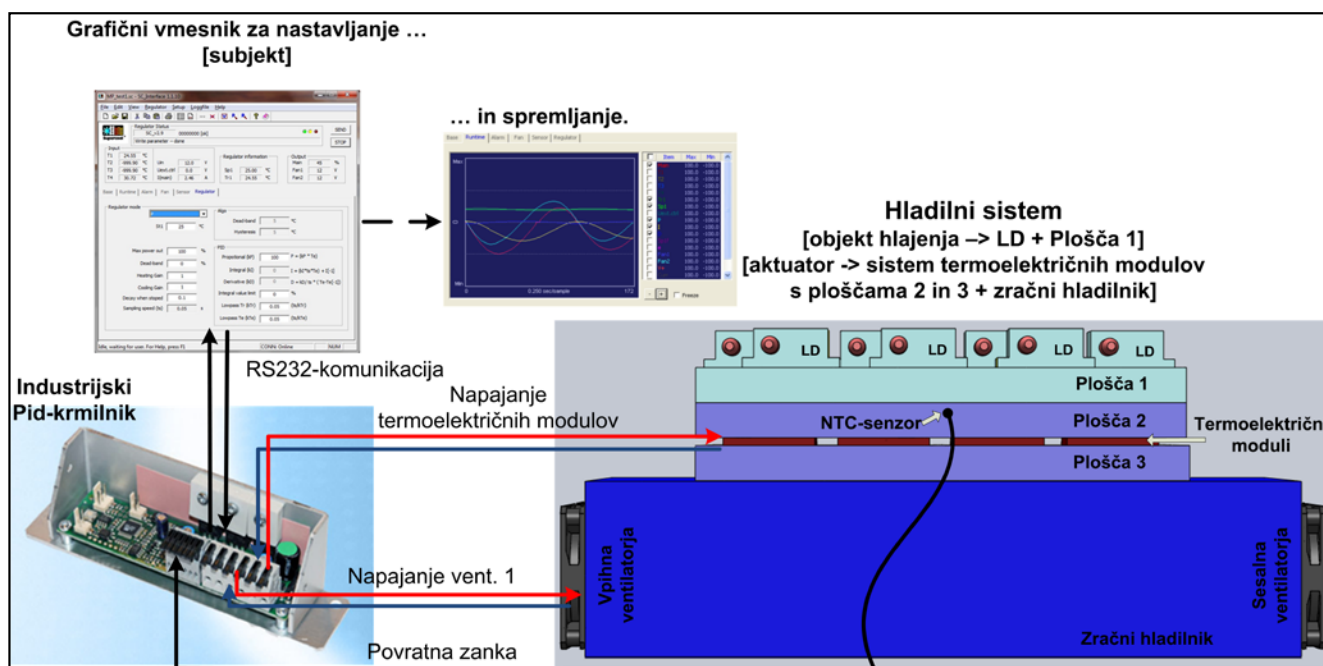
termoelektričnega modula z večjo oziroma nižjo temperaturo.

### 3 Razvoj hladilnega sistema na osnovi termoelektričnih modulov

Za doseganje večje hladilne moči se poveže več termoelektričnih modulov v en sistem, pri katerem se zgornja in spodnja stran modulov povežeta s ploščama (slika 4), ki se čim bolje prilegata skupnim dimenzijam termoelektričnih modulov na posamezni strani. Na zgornjo ploščo se pritrdijo laserske diode (slika 2), ki so montirane na adapterski plošči, ki omogoča hitro zamenjavo različnih postavitev laserskih diod. Ker se laserske diode večino časa hladijo, se veliko toplote prevede na

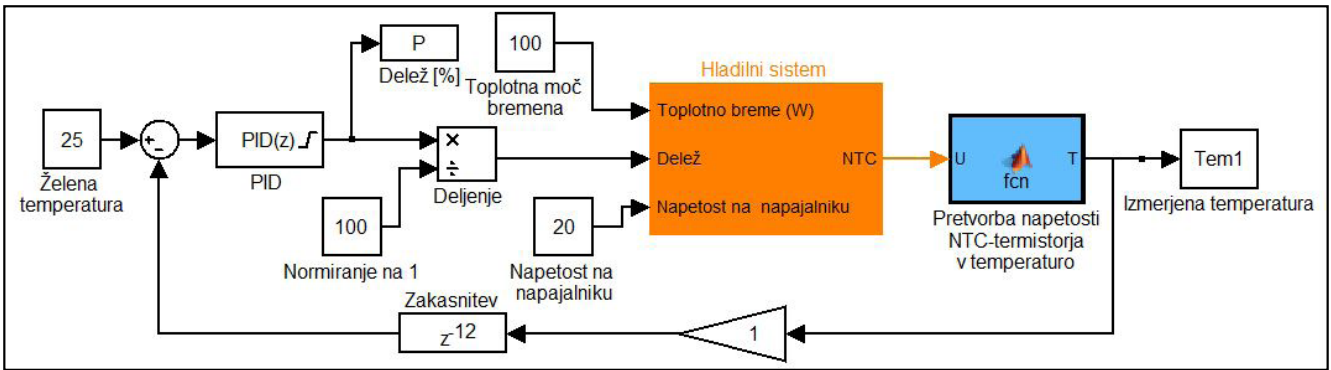
spodnjo ploščo, ki pa se zato močno segreva in jo je potrebno še dodatno hladiti. Hlajenje spodnje plošče se lahko izvede z vodnim hladilnim sistemom (večji, bolj kompleksen, dražji) ali zračnim hladilnikom (slika 8), ki je cenejši in manjši.

Slika 8 prikazuje prenos toplote od laserskih diod preko plošč 1, 2 in 3 do hladne strani termoelektričnih elementov in od vroče strani preko plošče 3 in zračnega hladilnika v okolico. Glavna prednost te zasnove je premičnost postavitve laserskih diod (premična plošča 1) in premičnost hlajenja vroče strani (premičnost hlajenja vroče strani (premičnost zračnega hladilnika). To predstavlja prednost v smislu testiranja različnih postavitev laserskih diod (različne moči in spremenljivo število) in te-



Slika 9. Semioperacijska shema celotnega temperaturnokrmilnega sistema





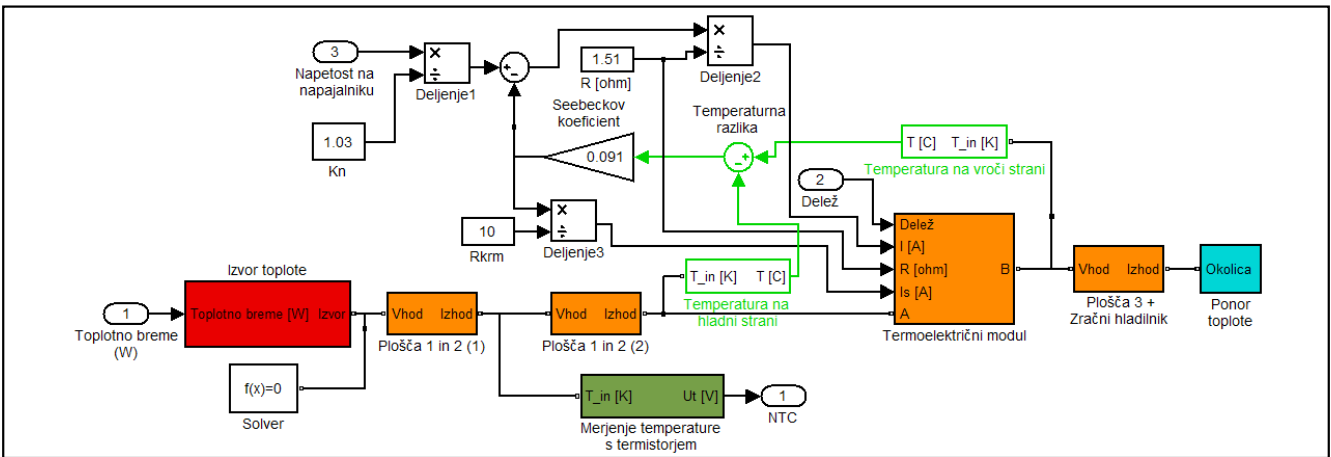
Slika 10. Celoten model temperaturnokrmilnega sistema

stiranje različnih hlajenj vroče strani (npr. zračni hladilnik, vodni hladilnik).

dela. Nekateri bloki se lahko dobijo v Simulinkovi knjižnici in so že sprogramirani, ostale pa smo samostojno sprogramirali v Simulinkovi S-kodi.

$Kn$ , ki predstavlja padeč upornosti na napajalnih kabljih, električno upornost  $R$  termoelektričnega modula in nadomestno, še ne povsem znano in razi-

### 3.1 Modeliranje sistema



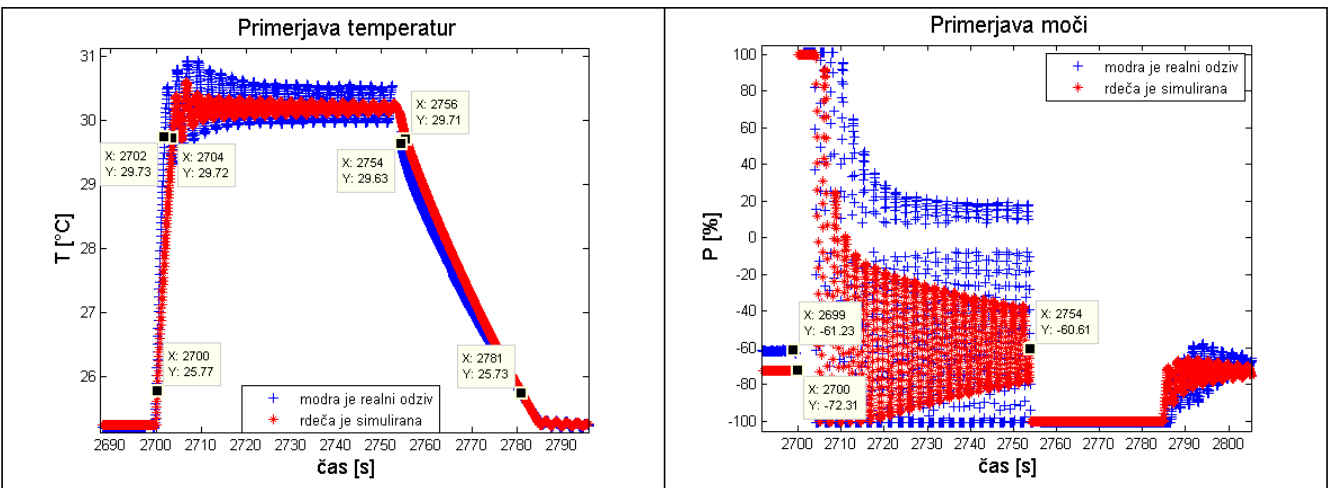
Slika 11. Notranja struktura bloka Hladilni sistem

Semioperacijska shema (slika 9) prikazuje zgradbo in povezave našega temperaturnokrmilnega sistema. Matematični popis celotnega sistema smo izvedli v programskem paketu Matlab/Simulink, ki omogoča kibernetično blokovno zasnovo mo-

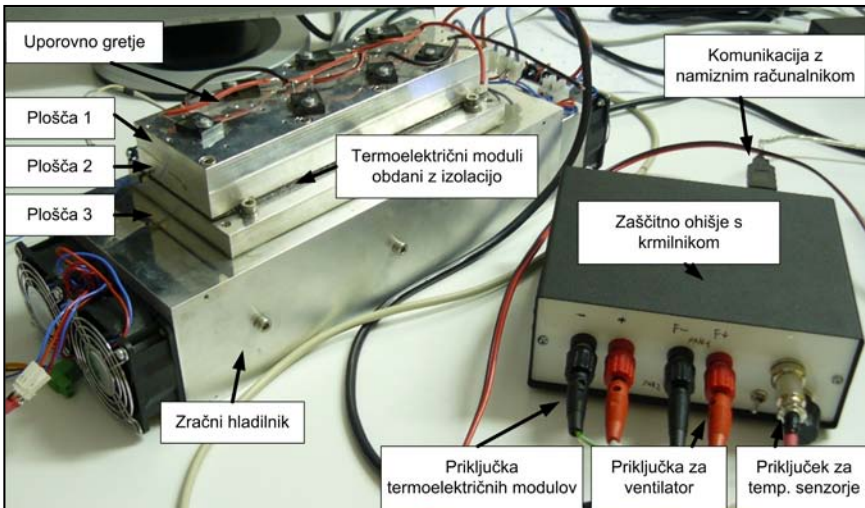
Na sliki 10 je predstavljen prvi nivo matematičnega modela v programu Simulink. V prvem nivoju se nastavlja želena temperatura, toplotna moč bremena in napajalna napetost električnega napajalnika. V drugem nivoju na sliki 11 se nastavi še koeficient

skano upornost  $R_{krm}$ , ki zaradi Seebeckove napetosti med pulzi (slika 8) požene Seebeckov električni tok.

Nekaj potrebnih koeficientov se lahko nastavi z že znanimi konstantami, kot so koeficienti materiala (toplo-



Slika 12. Primerjava temperature in potrebne moči na koračni odziv



**Slika 13.** Fotografija eksperimentalnega temperaturnokrmilnega sistema

tna prevodnost aluminija, gostota, masa), toplotno breme, temperatura okolice, perioda vzorčenja v digitalnem krmilniku ... Glavni problemi modeliranja pa so nastavitve nedobro definiranih parametrov. Občutljivejši koeficienti so koeficienti nedomestne upornosti  $R_{krm}$ , s katerim se nastavlja velikost Seebeckovega električnega toka, mesto merjenja z NTC-temperaturnim zaznavalom, ki je težko določljivo zaradi gradienta temperature, ter toplotna upornost plošč in zračnega hladilnika, ki zavzema tudi neenake stične površine ter kontaktne upornosti. Koeficiente smo določili v več iteracijah tako, da smo zagotovili čim boljše ujemanje med izmerjenim (slika 12 – modri signal) in simuliranim (slika 12 – rdeči signal) odzivom na koračno spremembo zelene temperature. Pri tem smo se predvsem osredotočili na značilne parametre koračnega odziva, kot so čas vzpona, maksimalen prenehaj, perioda lastnega nihanja

**Tabela 1.** Ujemanje odzivov realnega sistema in modela (slika 14)

	Realni odziv	Simulirani odziv
Čas vzpona	2,8 s	3,2 s
Čas trajanja prehodnega pojava (5-odstotna umiritev)	13 s	10 s
Odstopek v stacionarnem stanju	0,10 °C	0,05 °C
Perioda lastnega nihanja	2,36 s	2,31 s

in odstopke v stacionarnem stanju. Bolj podroben opis modeliranja temperaturnokrmilnega sistema, dobro popisljivih koeficientov in iskanja občutljivejših koeficientov je podan v [6].

### 3.2 Izvedba eksperimentalnega sistema

Slika 13 prikazuje razviti eksperimentalni temperaturno krmilni sistem. Namesto laserskih diod se je za toplotno breme pri eksperimentiranju uporabljalo uporovno greetje. Termoelektrični moduli se nahajajo

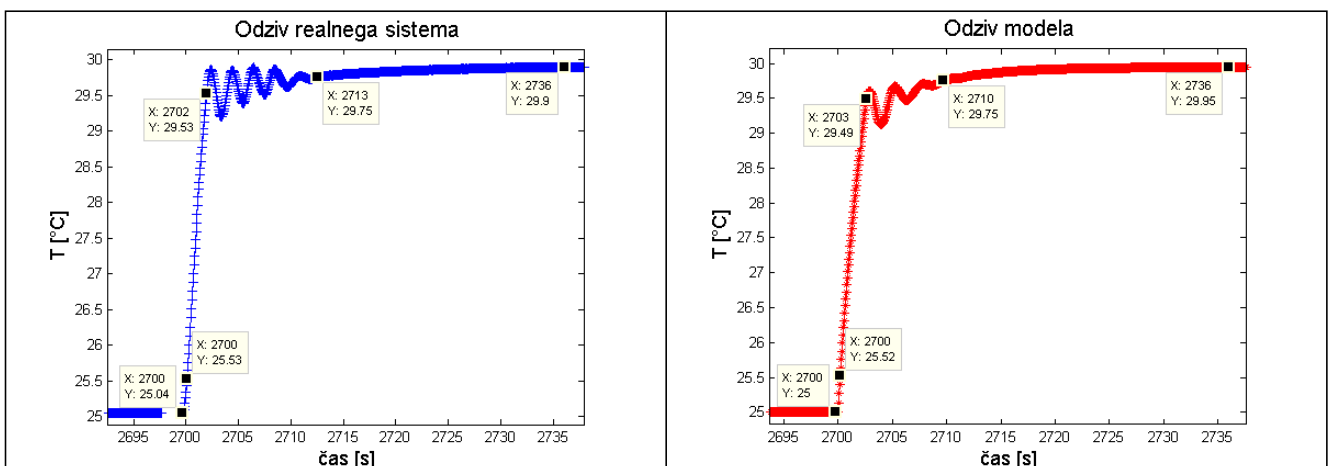
med ploščama 2 in 3, kjer jih obdaja izolativna pena, da se zmanjša neželena izmenjava toplote preko sevanja in konvekcije med ploščama in prevajanje toplote v okolico. Neposredno na ploščo 3 je pritrjen aluminijasti rebrasti hladilnik, opremljen s štirimi ventilatorji, in sicer z dvema vpihnima ter dvema sesalnima ventilatorjema za povečanje pretoka zraka. Toplotna moč termoelektričnih modulov se krmili preko industrijskega krmilnika *Supercool PR59*.

Krmilnik je povezan z računalnikom s serijsko povezavo in programskim vmesnikom, preko katerega se nastavlja

vljajo krmilni parametri (slika 9 in 13).

## 4 Rezultati

Razviti matematični model celovito opisuje celoten eksperimentalni temperaturnokrmilni sistem. Za preizkus analize realnega sistema z modelom smo naredili simulacijo odziva temperature na koračno motnjo pri različnih nastavitvah PID-krmilnika. Ko smo dobili zadovoljiv odziv temperature v modelu, smo iste parametre PID-krmilnika vnesli še v eksperimentalni sistem (digitalni krmilnik). Rezultat odziva realnega



**Slika 14.** Odziv sistema s PID-krmilnikom pri  $K_p = 120$ ,  $K_i = 0,5$  in  $K_d = 10$

sistema na vsiljeno koračno motnjo se je nato zadovoljivo ujemal s simuliranim odzivom, kar prikazujeta slika 14 in tabela 1.

Smiselnost matematičnega modela se pokaže pri razvoju novih temperaturno krmiljenih sistemov, kjer se s simulacijo lahko hitro preverijo različne lastnosti in odzivi novega sistema. S tem se lahko že v fazi razvoja prilagodi temperaturnokrmilni sistem za doseganje maksimalne učinkovitosti.

## ■ 5 Zaključek

Pri razvoju modela je bilo narejenih več predpostavk in kompromisov. Najprej smo predpostavili konstantnost nekaterih pomembnih koeficientov (Seebeckov koeficient materiala, električna upornost in toplotna prevodnost) termoelektričnega modula. V resnici so vsi ti koeficienti odvisni od temperature in jih lahko vzamemo kot konstantne le na ozkih temperaturnih območjih. Postavitvev NTC-temperaturnega zaznavala je zahtevala velik kompromis med natančnostjo meritve in enostavnostjo eksperimentalne izvedbe. Zaradi netočne definiranosti pozicije NTC-zaznavala in vpliva gradienta temperature na mestu postavitve je bilo potrebnih veliko iteracij v matematičnem modelu za doseg dobrega ujemanja med teoretičnim in izmerjenim odzivom.

Razviti matematični model se da še izboljšati. Potrebno bi bilo bolje definirati pozicijo NTC-temperaturnega zaznavala na eksperimentalnem sistemu. Vredno bi bilo poizkusiti z več temperaturnimi zaznavali in izračunati povprečno vrednost njihovih zaznanih temperatur. Za bolj primerljive podatke bi bilo smiselno razviti eksperimentalni sistem direktno iz geometrijskega modela, s čimer bi se izognili neenakim stičnim površinam. Raziskati bi bilo potrebno, kakšen vpliv ima Seebeckov pojav med pulzi pri krmiljenju s PŠM in morda narediti poglobljeno študijo vpliva temperature na posamezne koeficiente.

## Literatura

- [1] Online Catalog (<http://lairdtech.thomasnet.com/viewitems/temperature-controllers-2/temperature-controllers?&c=100|3001624|3001687|3001280>).
- [2] Peltier Devices and Thermoelectric Power Generators (<http://www.crtech.com/tec.html>).
- [3] S. Amon: Elektronske komponente in vezja, predavanja, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2011.
- [4] Cold Plate Cooler (<http://www.tetech.com/Cold-Plate-Coolers.html>).
- [5] ElectraCOOL Cold Plates (<http://www.americool.com>).
- [6] M. Pogačar: Sistem za regulacijo temperature laserskih diod, diploma, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2012.
- [7] J. Diaci: Laserski sistemi, predavanja, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2010.
- [8] F. P. Incropera, D. P. DeWitt: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition. John Wiley & Sons, 2002.
- [9] Matlab Product Documentation (<http://www.mathworks.com>).
- [10] M. Deng, A. Inoue, S. Goto: Operator based Thermal Control of an Aluminium Plate with a Peltier device, The Graduate School of Natural Science and Tehnology, Okaya University 3-1-1 Tsushima-Naka, Japan, 2007.
- [11] D. D. L. Wijnaards, E. Cretu, S. H. Kong, R. F. Wolffenbuttel: Modelling of integrated Peltier elements, Electronic Instrumentation Laboratory, Delf University of Technology / DIMES, Department of Electrical Engineering, The Netherlands, 2000.
- [12] W. Seifert, M. Ueltzen, C. Strumpel, W. Heiliger, E. Muller: One-dimensional modeling of a Peltier element. 20th International Conference on Thermoelectrics, strani 439–443, 2001.
- [13] Introduction to Thermoelectrics & Design Manual (<http://www.tellurex.com/technology/design-manual.php>).
- [14] B. S. Simons: Thermoelectric Cooler Control Cuircuit, The United States of America as represented by the Secretary of the Navy, Washington, D. C., US Patent 4,631,728, 1986.
- [15] A. Y. Yeung: Microprocessor Controller Thermoelectric Cooler and Power Control. Xerox Corporation, Stamford, Conn. US Patent 5,604,758, 1997.
- [16] J. Eskandari, G. Hills: Thermoelectric Cooler and Temperature sensor subassembly with improved temperature control. Xerox Corporation, Stamford, Conn. US Patent 5,522,225, 1996.

### Laser-Diode Temperature Controller

**Abstract:** We report on the thermoelectric temperature controller of a semiconductor laser diode. The system consists of a set of Peltier elements, a direct air cooler, an NTC temperature sensor and an industrial PID controller. A MATLAB/Simulink/Simscape-based numerical model has been developed to simulate the performance of the system under test and to determine the PID control-loop parameters. A prototype has been developed to verify the numerical model using a step-response comparison as well as to validate the PID control-loop parameter values. The experimental results show that the simulated system response is in good agreement with the measured response and that the response is within the design requirements.

**Key words:** temperature control, thermoelectric elements, PID control, pulse-width modulation, control system, laser diodes