

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Benjamin OŠLAJ

**DC - DC PRETVORNIK ZA TERMOELEKTRIČNI
SISTEM**

Diplomsko delo
univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje
Meatronika

Maribor, september 2013



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

DC - DC PRETVORNIK ZA TERMOELEKTRIČNI SISTEM

Diplomsko delo

Študent: Benjamin OŠLAJ
Študijski program: Univerzitetni študijski program 1. stopnje Mehatronika
Smer: Mehatronika

Mentor FS: izr. prof. dr. Karl GOTLIH
Mentor FERI: red. prof. dr. Miro MILANOVIČ
Somentor doc. dr. Miran RODIČ

Maribor, september 2013



Univerza v Mariboru

FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Smetanova ulica 17.

2000 Maribor, Slovenija

www.fs.um.si

Številka: MEH-B0025

Datum in kraj: 25.04.2013, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 46/2012)
izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

BENJAMINU OŠLAJU, študentu **univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje MEHATRONIKA**, se dovoljuje izdelati diplomsko delo pri predmetu **Robotizacija in Industrijska elektronika**

Mentor FS: izr. prof. dr. Karl Gotlih
Mentor FERl: red. prof. dr. Miro Milanovič
Somentor-ica: doc. dr. Miran Rodič

Naslov diplomskega dela: **DC-DC pretvornik za termoelektrični sistem**

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku: **DC-DC converter for thermoelectric system**

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo diplomskega dela« in ga oddati v treh izvodih do 30.09.2013 v referatu za študentske zadeve članice.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Dekan:

red. prof. dr. Niko Samec

Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv



IZJAVA

Podpisani Benjamin OŠLAJ izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvomizr. prof. dr. Karla GOTLIHA (FS) in mentorstvom red. prof. dr. Mira MILANOVIČA (FERI);
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v Knjižnici tehniških fakultet Univerze v Mariboru.

Maribor, 29.8.2013

Podpis: Benjamin Ošljaj

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorjema izr. prof. dr. Karlu GOTLIHU in red. prof. dr. Miru MILANOVIČU za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela. Zahvaljujem se tudi somentorju doc. dr. Miranu RODIČU.

Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij.

DC - DC PRETVORNIK ZA TERMoeLEKTRIČNI SISTEM

Ključne besede: *termoelektrični element, temperaturna razlika, pretvornik navzgor, odziv, regulacijski algoritem*

UDK: 681.584.67(043.2)

POVZETEK

V diplomskem delu so predstavljeni termoelektrični elementi, njihova zgradba in osnovno fizikalno ozadje delovanja. Opisana je zgradba laboratorijskega sistema za preizkušanje termoelektričnih elementov. Za slednjega so predstavljeni merilni rezultati in karakteristika. Vključen je tudi opis pretvorniškega sistema, natančneje pretvornika navzgor. Glede na izmerjeno karakteristiko sistema je bila zasnovana osnovna regulacija pretvornika. Na podlagi rezultatov je bilo potrjeno delovanje pretvornika in regulacije na takšnem sistemu. Predstavljene so tudi osnovne ugotovitve in zaključki o delovanju sistema za preizkušanje termoelektričnih elementov.

DC - DC CONVERTER FOR THERMOELECTRIC SYSTEM

Key words: *thermoelectric element, temperature difference, boost converter, response, control algorithm*

UDK: 681.584.67(043.2)

ABSTRACT

Thermoelectric elements, their construction and basic physical background of operation are presented in the thesis. The work describes the design of a laboratory prototype for thermoelectric element testing, measurements and characteristics of the system. Also included is a basic description of the converter system, specifically boost converter. A basic control algorithm was designed, with respect to the measurements and characteristics of the system. Operation of the boost converter and the control algorithm was confirmed, based on the output measurements. Also included are the basic findings and conclusions regarding the operation of the laboratory prototype for thermoelectric element testing.

KAZALO

1	UVOD	- 1 -
1.1	Namen diplomskega dela.....	- 1 -
1.2	Opis vsebine diplomskega dela	- 2 -
2	TEORETIČNO OZADJE ELEMENTA	- 3 -
2.1	Termoelektrični element.....	- 3 -
2.2	Peltierjev pojav	- 4 -
2.3	Seebeckov pojav	- 5 -
3	TESTNI SISTEM	- 6 -
3.1	Hladilni sistem.....	- 6 -
3.2	Namestitve termoelektričnih elementov	- 6 -
3.3	Ogrevalni sistem	- 7 -
4	DELOVANJE SISTEMA	- 9 -
4.1	Omejitve	- 9 -
4.2	Meritve	- 11 -
5	DC/DC PRETVORNIK	- 14 -
5.1	Pretvornik navzgor	- 14 -
5.2	Simulacija pretvornika.....	- 15 -
5.3	Realni sistem	- 18 -
5.4	Celotni sistem in test delovanja.....	- 22 -
5.5	Ciljni sistem.....	- 26 -
6	REZULTATI	- 28 -
7	SKLEP	- 30 -
8	VIRI, LITERATURA	- 32 -

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Prečni prerez elementa	- 3 -
Slika 2.2: Termoelektrični element in njegovo nadomestno vezje.....	- 4 -
Slika 2.3: Peltierjev pojav v polprevodniku [3].....	- 5 -
Slika 2.4: Seebeckov pojav v polprevodniku [3].....	- 5 -
Slika 3.1: Hladilna plošča.....	- 6 -
Slika 3.2: Povezani elementi na hladilni plošči.....	- 7 -
Slika 3.3: Kvarčni grelec	- 8 -
Slika 4.1: Merilno vezje	- 11 -
Slika 4.2: Karakteristika sistema termoelektričnih elementov	- 12 -
Slika 5.1: Pretvornik navzgor	- 14 -
Slika 5.2: (a) Shema pretvornika v prvem režimu delovanja; (b) Shema pretvornika v drugem režimu delovanja	- 15 -
Slika 5.3: Simulacijski model.....	- 16 -
Slika 5.4: Algoritem vodenja.....	- 18 -
Slika 5.5: Pretvornik navzgor	- 19 -
Slika 5.6: (a) Napetostni delilnik za vhodno napetost; (b) Napetostni delilnik za izhodno napetost.....	- 19 -
Slika 5.7: Tokovni senzor.....	- 20 -
Slika 5.8: Krmilnik TMS320F28335.....	- 20 -
Slika 5.9: Program v Simulink-u	- 21 -
Slika 5.10: Vsebina bloka "adc_isr Algorithm"	- 22 -
Slika 5.11: Uporabniški vmesnik - program.....	- 22 -
Slika 5.12: Celotni sistem.....	- 23 -
Slika 5.13: PWM signal iz gonilnika.....	- 23 -
Slika 5.14: (a) Vhodna napetost U_d ; (b) Izhodna napetost U_o	- 24 -
Slika 5.15: Meritev iz digitalnega signalnega krmilnika – vhodna napetost.....	- 25 -
Slika 5.16: Meritev iz digitalnega signalnega krmilnika - izhodna napetost.....	- 25 -
Slika 5.17: Meritev iz digitalnega signalnega krmilnika - tok skozi dušilko	- 26 -
Slika 6.1: Potek izhodne napetosti.....	- 29 -
Slika 6.2: Potek vhodne napetosti	- 29 -

KAZALO TABEL

Tabela 4.1: Meritve sistema pod obremenitvijo	- 12 -
Tabela 4.2: Meritev napetosti odprtih sponk	- 13 -
Tabela 5.1: Simulacijski podatki	- 17 -

UPORABLJENI SIMBOLI

U_d, u_d	: vhodna napetost pretvornika
I_d, i_d	: vhodni tok pretvornika
U_o, u_o	: izhodna napetost pretvornika
i_o	: izhodni tok pretvornika
u_L	: napetost na dušilki
I_L, i_L	: tok skozi dušilko
L	: induktivnost dušilke
R_L	: upornost navitja dušilke
C	: kapacitivnost kondenzatorja
R_{ESR}	: ekvivalentna serijska upornost kondenzatorja
U_D	: kolenska napetost diode
f	: frekvenca
T_s	: perioda
Δp	: prevajalno razmerje
R_o	: upornost bremena
T_H	: temperatura vroče strani termoelektričnega elementa
ΔT	: temperaturna razlika
P	: moč
R_{nad}	: nadomestna upornost
R_i	: notranja upornost termoelektričnega elementa
N_{parov}	: število parov termoelektričnih elementov, vezanih v serijo
$N_{elementov}$: število termoelektričnih elementov vezanih v serijo
U_{ref}	: referenčna (želena) napetost
I_{ref}	: referenčni (želeni) tok

UPORABLJENE KRATICE

DC	: Direct Current, enosmerni tok
PWM	: Pulse-Width Modulation, pulzno-širinsko modulacija
PI	: proporcionalno-integralni
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
SCI	: Serial Communication Interface
A/D	: Analog-to-digital
ESR	: equivalent series resistance, ekvivalentna serijska upornost
MPPT	: Maximum power point tracking

1 UVOD

V sodobnem času potrebe po energiji vedno bolj naraščajo. Glavni viri, iz katerih pridobivamo energijo, so nafta, zemeljski plin in premog, torej fosilna goriva. Iščemo alternativne načine pridobivanja energije, ki bi zmanjšali porabo fosilnih goriv in s tem tudi njihov negativen vpliv na okolje. Najbolj uveljavljeni postopki za pridobivanje energije iz obnovljivih virov energije so veter, voda in sonce. Iz teh obnovljivih virov energije je možno pridobiti veliko energije na okolju neškodljiv način. Seveda pa je potrebno načrtovati in zgraditi sisteme, ki bodo zmožni izkoristiti čim večji delež te energije.

Sončevo energijo izkoriščamo s pomočjo solarnih celic, ki v električno energijo pretvarjajo le majhen delež celotnega sončevega sevanja, ki doseže Zemljino površino. Da bi povečali količino pretvorjene solarne energije, smo začeli razmišljati o načinih, ki bi izkoriščali energijo infrardečega spektra, oziroma toplote.

Termoelektrični elementi so bili do sedaj večinoma uporabljeni kot hladilni elementi, torej kot pretvorniki električne energije v temperaturno razliko. Enake elemente pa lahko uporabimo tudi kot generatorje, torej pretvornike temperaturne razlike v električno energijo.

1.1 Namen diplomskega dela

Naš cilj v okviru diplomske naloge je bil razvoj sistema foto- in termoelektričnega solarnega panela, ki bi izkoriščal večji del energije Sonca kot sam fotoelektrični solarni panel. Ker pa o termoelektričnih elementih nismo imeli veliko znanja, smo se odločili, da zgradimo sistem za njihovo testiranje. Glavni namen tega sistema je, da elemente podrobneje preučimo, pomerimo karakteristike in preverimo odzive takšnega sistema ob priključitvi DC/DC pretvornika navzgor, katerega namen je dvig nivoja izhodne napetosti.

Projekt smo razdelili na več delov. Prvi je bil študija že obstoječih podobnih sistemov 0 in zasnova sistema. V drugem delu smo izdelali testni sistem, z vsemi komponentami. V tretjem delu smo opravili nekaj meritev in preverili različne vezave elementov. V četrtem delu pa smo načrtovali in izdelali pretvorniški sistem za prilagoditev izhodne moči.

1.2 Opis vsebine diplomskega dela

V diplomskem delu bomo najprej predstavili uporabljene termoelektrične elemente, njihovo delovanje in fizikalno ozadje.

V nadaljevanju bomo predstavili namestitev termoelektričnih elementov, sistem za hlajenje, sistem za ogrevanje in testni sistem kot celoto.

Nato se bomo osredotočili na pridobivanje energije iz termoelektričnih elementov, predstavili bomo tudi nekaj problemov, na katere smo naleteli ob preizkušanju sistema

Na koncu sledi še predstavitev sistema za prilagoditev izhodnih veličin in predstavitev rezultatov.

2 TEORETIČNO OZADJE ELEMENTA

Termoelektrični element lahko deluje na dva osnovna načina:

- kot potrošnik električne energije,
- kot generator električne energije.

Ko termoelektrični element deluje kot potrošnik električne energije, električno energijo pretvarja v temperaturno razliko. Temperaturna razlika nastane med zgornjo in spodnjo ploščo stranjo elementa. V odvisnosti od smeri električnega toka, ki teče skozi element, se ena stran segreje, druga stran pa ohladi.

Za generatorski način delovanja moramo zagotoviti temperaturno razliko med obema stranema elementa. To dosežemo tako, da eno stran segrejemo, drugo stran pa ohranjamo na konstantni temperaturi ali pa jo hladimo. Izhodna moč se proporcionalno viša s temperaturno razliko med stranskima ploskvama elementa.

2.1 Termoelektrični element

Termoelektrični elementi so zgrajeni iz polprevodniških parov [2]. En takšen par predstavlja spoj N- tipa polprevodnika s P- tipom polprevodnika. Takšni polprevodniški pari so povezani v serijo in vstavljeni v keramično ohišje (Slika 2.1).



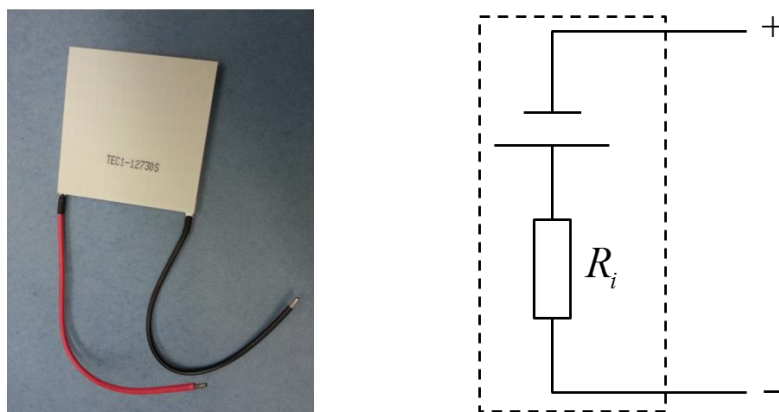
Slika 2.1: Prečni prerez elementa

(vir: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Peltier_element_detail.jpg)

Pomemben podatek pri izbiri termoelektričnega elementa je Seebeckov koeficient, ki podaja razmerje med napetostjo in temperaturno razliko. V elementu je uporabljen polprevodnik iz bizmutovega telurida (Bi_2Te_3), ki ima takšen Seebeckov koeficient, da je element primeren za uporabo kot generator električne energije. Z višanjem Seebeckovega koeficienta se večja tudi

električna upornost, kar predstavlja problem pri večini aplikacij, kjer element deluje kot generator električne energije. Zato je smiselno poiskati zadovoljivo razmerje med notranjo upornostjo in Seebeckovim koeficientom elementa.

Vsak takšen element ima oznako, ki vsebuje podatke o številu termočlenov in maksimalnim dovoljenim tokov, če element obratuje kot porabnik električne energije. Oznaka našega elementa je TEC1 – 12730S. Število 127 nam pove, koliko termočlenov je povezanih v serijo v samem elementu. En termočlen predstavlja spoj N- tipa polprevodnika s P- tipom polprevodnika. Število 30 pa nam pove maksimalni tok skozi element. Notranjost elementa je električno izolirana od okolja z izolacijskim premazom, za povezavo pa sta nameščena dva električna vodnika (Slika 2.2).

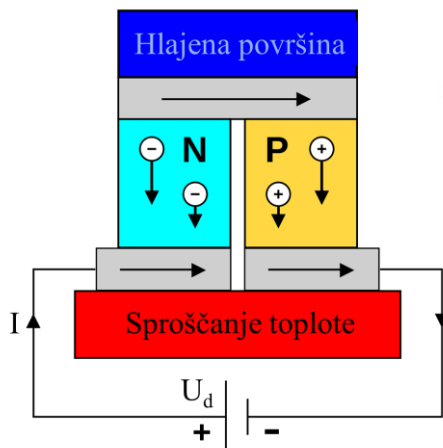


Slika 2.2: Termoelektrični element in njegovo nadomestno vezje

Pomemben podatek o elementu so še dimenzije. Naš element je ime dimenzije 62 mm x 62mm in debelino 3,9 mm.

2.2 Peltierjev pojav

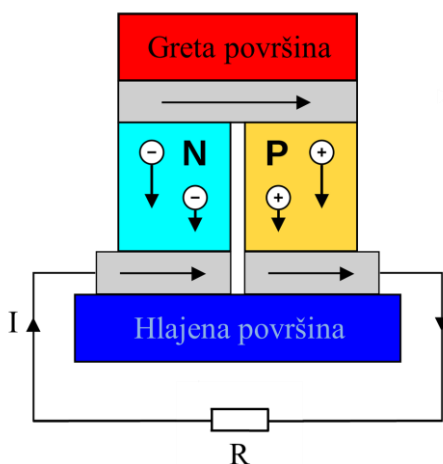
Do Peltierjevega pojava [3] pride na spoju dveh različnih prevodnikov, skozi katera teče električni tok. Pri tem pojavu pride do segrevanja enega in ohlajanja drugega spojnega mesta. Ohlajanje oziroma segrevanje spojnega mesta je sorazmerno s količino električnega toka, ki teče skozi spoj. Enako kot za kovine velja tudi za polprevodnike, ki so različno dopirani (Slika 2.3).



Slika 2.3: Peltierjev pojav v polprevodniku [3]

2.3 Seebeckov pojav

Do Seebeckovega pojava [3] pride na spojnih mestih dveh različnih prevodnikov električnega toka. Če se spoja nahajata na različnih temperaturah, se med njima ustvari razlika potencialov, ki je sorazmerna s temperaturno razliko med spojnima mestoma. Ta pojav je nasproten Peltierjevemu pojavu (Slika 2.4).



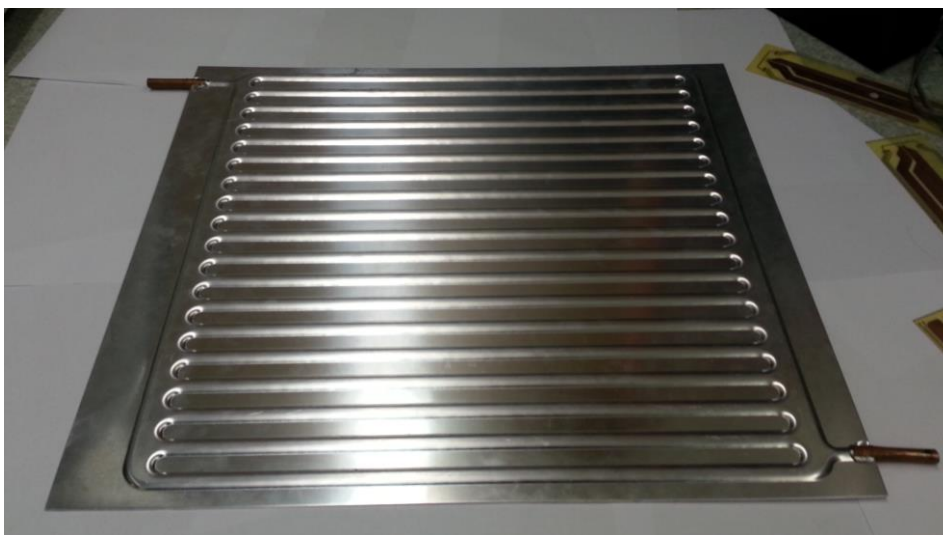
Slika 2.4: Seebeckov pojav v polprevodniku [3]

3 TESTNI SISTEM

Sistem za testiranje termoelektričnih elementov smo zasnovali na osnovi že prej predstavljene strukture [1]. Ker pa smo hoteli izdelati sistem za testiranje termoelektričnih elementov, fotoelektrične plasti nismo predvideli. Sistem je tako vseboval hladilno telo iz aluminija, na katero so bili nameščeni termoelektrični elementi. Na termoelektrične elemente pa smo namestili vmesno telo, ki je služilo za enakomernejšo porazdelitev toplote.

3.1 Hladilni sistem

Hladilni sistem smo zgradili iz plošče, ki je bila ustrezno pripravljena (Slika 3.1). Skozi to ploščo smo s pomočjo pretočne črpalke pretakali hladno vodo. Vodo, ki se je med pretokom skozi ploščo segrela, smo vračali nazaj v zbiralnik, kjer se je ohladila. Tako smo ploščo uspeli ohranjati na konstantni temperaturi.



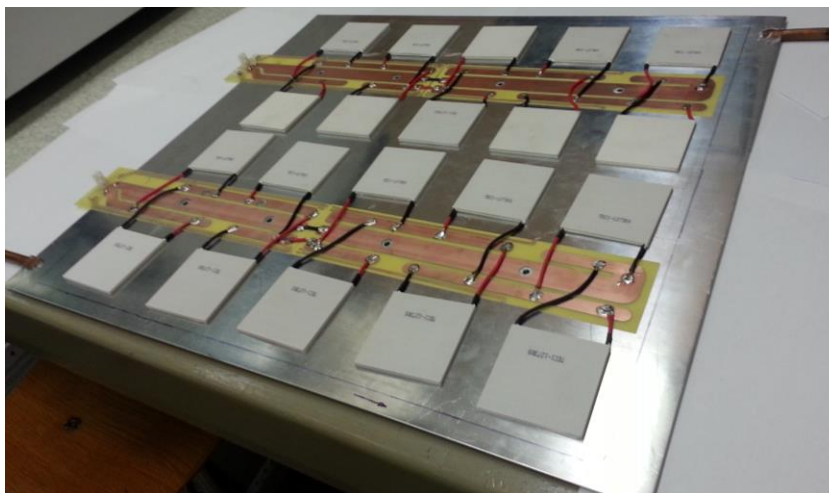
Slika 3.1: Hladilna plošča

Na ploščo je bilo potrebno narediti priključke za cevi. Te smo izdelali iz bakra in jih namestili na ploščo. Spojna mesta smo zalili z ustrezno maso, da smo preprečili odtekanje vode.

3.2 Namestitev termoelektričnih elementov

Na hladilno ploščo smo namestili 20 termoelektričnih elementov. Povezali smo jih preko ustrezno narejenih tiskanih vezij, na katerih so bile tako močnostne linije, kot tudi signalne linije za merjenje temperature vroče strani. Naredili smo dve veji, v vsaki pa smo povezali 10

elementov. Elemente v vsaki veji smo povezali paroma vzporedno, posamezne pare pa v serijo (Slika 3.2). S takšno vezavo smo skušali kompenzirati temperaturna nihanja vzdolž plošče. Na izhodni strani pa bi bila rezultat takšne vezave, v primerjavi s serijsko vezavo elementov, nižja izhodna napetost. S takšno izvedbo smo ugodno vplivali na notranjo upornost celotnega sistema.



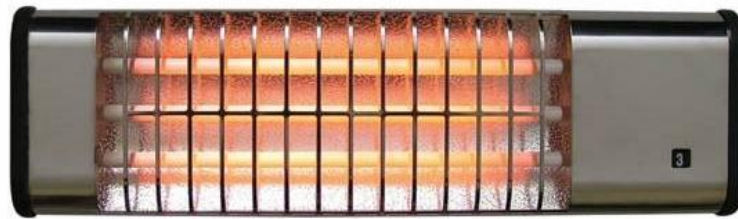
Slika 3.2: Povezani elementi na hladilni plošči

Na tiskanih vezjih smo načrtovali tudi močnostni priključek za odvzem energije, pa tudi signalne priključke za opravljanje meritev.

Na tako nameščene elemente smo dodali še vmesno telo, ki je služilo razporeditvi toplote po celotni površini. Vmesno telo smo pritrdili na hladilno telo z vijaki, ki smo jih ustrezno toplotno izolirali. Za čim boljši temperaturni stik smo na območja, kjer so elementi nalegali na plošči, nanesli termalno pasto.

3.3 Ogrevalni sistem

Nazadnje smo izdelali še sistem za ogrevanje zgornje površine sistema. V ta namen smo uporabili kvarčne grelce (Slika 3.3), ki smo jih namestili na stojalo tako, da smo lahko spreminjali višino, s katere smo sistem grel.



Slika 3.3: Kvarčni grelec

(vir: <http://www.kontakt-p.si/images/SLIKE/Image1.jpg>)

Namestili smo tri take grelce, da smo pokrili čim večjo površino našega sistema. Grelce smo namestili na začetno višino, približno 15 cm nad vmesno telo. Po prvem priklopu ogrevanja smo opazili, da se vmesno telo ne greje. Razlog je bil v odbojnosti aluminija, ki je zelo visoka za infrardeče sevanje. Problem smo rešili tako, da smo vmesno telo z grete strani obarvali na črno. Tako smo zelo vplivali na količino sprejete energije vmesne plošče.

4 DELOVANJE SISTEMA

Sistem smo testirali pod obremenitvijo, kasneje pa smo preverili tudi nivo napetosti neobremenjenega sistema. Deset parov vzporedno vezanih elementov smo vezali v serijo. Po podatkih iz podatkovnega lista [2] ima en termoelektrični element ohmsko upornost $R_i = 0,27 \Omega$, pri temperaturi vroče strani $T_H = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ oziroma ohmsko upornost $R_i = 0,31 \Omega$, pri temperaturi vroče strani $T_H = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. V naslednjem koraku smo izračunali nadomestno notranjo upornost sistema po enačbi (4.1):

$$R_{nad} = N_{parov} \cdot \frac{R_i}{2} \quad (4.1)$$

Za izračun smo uporabili višjo vrednost notranje upornosti elementa z namenom, da bi določili najvišjo notranjo upornost sistema. Izračun je pokazal, da ohmska upornost sistema znaša $R_{nad} = 1,55 \Omega$.

4.1 Omejitve

Že pri prvem zagonu smo naleteli na dva glavna problema:

- neprimerna vezava,
- neenakomerno segrevanje vmesnega telesa.

Neprimerna vezava:

S prvimi meritvami smo ugotovili, da na izhodu dobimo zelo malo moč, ki je bila zelo pod našimi pričakovanji. Po krajšem preverjanju delovanja in logičnem sklepanju smo ugotovili, da vzporedna vezava dveh elementov ni dobra. S tem, da smo dva elementa povezali vzporedno, nismo kompenzirali temperaturnih nihanj. Posledica vzporedne vezave je bilo medsebojno napajanje med elementoma, če nista bila na enaki temperaturi.

Ta problem smo rešili z zaporedno vezavo vseh 10 elementov v posamezni veji. Tako je vsak element prispel svoj delež energije in izhodna moč se je povečala. Da smo to lahko naredili, smo morali modificirati naše tiskano vezje. Postavitev elementov je ostala enaka, odstranili smo samo nekaj povezav na vezju.

S to spremembo pa smo vplivali tudi na notranjo upornost sistema, ki smo jo sedaj izračunali po enačbi (4.2):

$$R_{nad} = N_{elementov} \cdot R_i \quad (4.2)$$

Tako se je nadomestna notranja upornost spremenila iz $R_{nad} = 1,55 \Omega$ na $R_{nad} = 6,02 \Omega$, kar je približno štirikrat več.

Neenakomerno segrevanje vmesnega telesa:

Ker se je vmesno telo na sredini segrevalo dosti hitreje kot ob straneh, se je začelo upogibati – na sredini je nastala izboklina. Ta izboklina pa je imela zelo negativen vpliv na naš sistem, saj je vmesna plošča odstopila od elementov. Stika med elementi in ploščo več ni bilo, meritve pa so pokazale zelo znižano izhodno moč. To težavo smo skušali rešiti na več načinov.

Prvi način je bil, da smo odstranili vijake, ki so povezovali vmesno ploščo s hladilno ploščo. Tako smo vmesno ploščo samo prislonili na elemente. Stik med elementi in ploščo je bil malo slabši. Kot se je izkazalo, s tem nismo rešili problema, saj se je plošča spet izbočila.

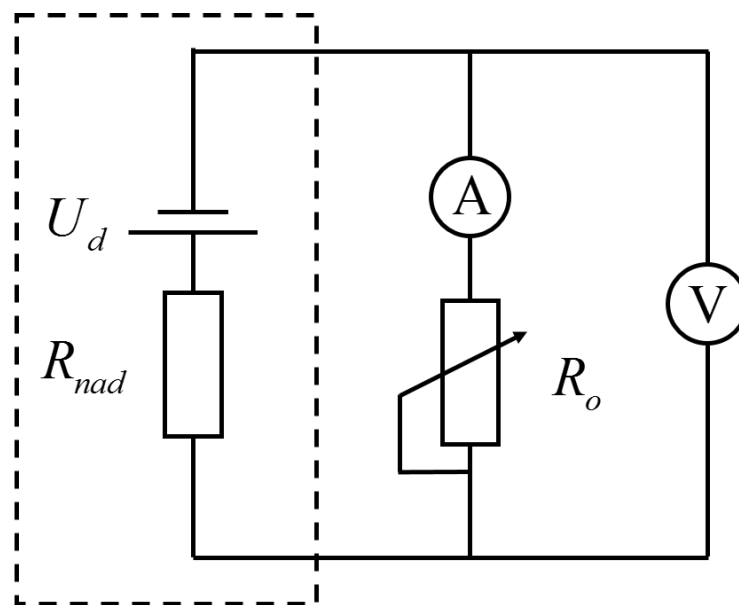
Drug način, s katerim smo skušali rešiti težavo, je bila odstranitev vmesne plošče. Tako smo direktno obsevali termoelektrične elemente, katerih zgornje strani smo zaradi večje vpojnosti svetlobe obarvali na črno. Ta rešitev je odstranila problem raztezanja plošče, ki je v tem primeru ni bilo. Meritve pa so pokazale občutno nižje merjene veličine. Razlog za to smo našli v segrevanju površin termoelektričnih elementov, ki se kljub črni barvi niso kaj dosti segrevale.

Pri tretjem način smo delali spet z vmesno ploščo. Da bi se izognili izboklini na sredini, smo dodali manjši kos aluminija na sredino plošče. Kos aluminija je bil približno 3-krat debelejši od vmesne plošče, vendar manjših dimenzij. S tem dodatkom smo upočasnili segrevanje sredine vmesne plošče, saj je dodatni aluminijast kos sprejel določeno količino energije. Vmesne plošče pa še vedno nismo mogli pritrditi na hladilno ploščo, saj se je v primeru pritrditve vmesna plošča spet izbočila.

Tako smo rešili eno težavo, hkrati pa dodali drugo - nepopolni stik vseh elementov z obema ploščama. S tem, da obe plošči nista fiksno pritrjeni ena na drugo, smo izgubili stike med robnimi elementi in vmesno ploščo.

4.2 Meritve

Meritve smo opravljali z ustreznim merilnim vezjem (Slika 4.1), ki je vključevalo drsni upor, ampermeter in voltmeter. Prva meritev je bila meritev tokov, napetosti in moči pod obremenitvijo. Tukaj smo ohranjali konstantno temperaturno razliko, spreminjali pa bremensko ohmsko upornost. Tabela 4.1 prikazuje opravljene meritve.



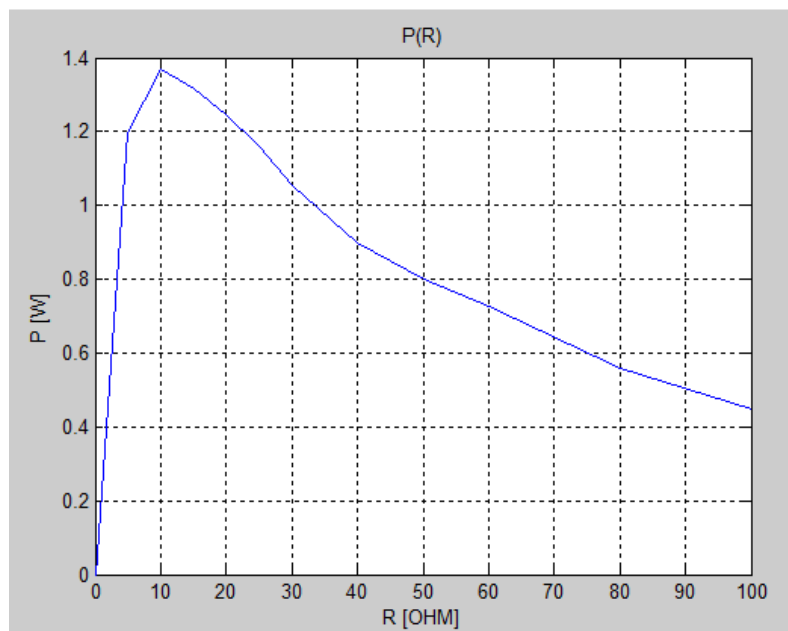
Sistem termoelektričnih elementov

Slika 4.1: Merilno vezje

Tabela 4.1: Meritve sistema pod obremenitvijo

R [Ω]	U [V]	I [mA]	P [W]
0	0	640	0
5	2,6	460	1,196
10	3,8	360	1,368
15	4,7	280	1,316
20	5,2	240	1,248
25	5,4	215	1,161
30	5,8	182	1,056
40	6,2	145	0,899
50	6,4	125	0,8
60	6,6	110	0,726
80	6,8	82	0,558
100	7	64	0,448

Meritve, ki smo jih prikazali v tabeli, smo predstavili tudi v grafični obliki (Slika 4.2).



Slika 4.2: Karakteristika sistema termoelektričnih elementov

Kot je razvidno iz grafa (Slika 4.2), je moč najvišja pri določeni bremenski upornosti. Izkaže se, da je izhodna moč res največja, ko je bremenska upornost enaka notranji upornosti sistema [1].

Po opravljenih meritvah sistema pod obremenitvijo smo opravili še eno meritev. Izmerili smo napetost odprtih sponk sistema tako, da smo sistem odklopili od bremena in izmerili napetost na sponkah (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Meritev napetosti odprtih sponk

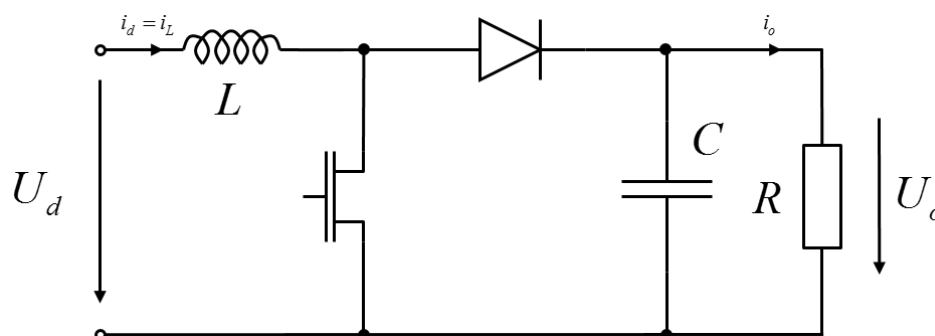
ΔT [°C]	U [V]
50	9

5 DC/DC PRETVORNIK

Glavni namen diplomskega dela je preveriti obnašanje DC/DC pretvornika, priključenega na termoelektrični sistem. Ker imajo termoelektrični elementi precej visoko notranjo upornost, težko predvidimo odziv DC/DC pretvornikov. Zato smo se odločili, da uporabimo navaden pretvornik navzgor [4] in preverimo delovanje. DC/DC pretvornik je bil nadzorovan in krmiljen z uporabo digitalnega signalnega krmilnika TMS320F28335, proizvajalca Texas Instruments. S krmilnikom smo realizirali algoritem vodenja, ki je izhodno napetost dvignil na želen nivo in ga ohranjal.

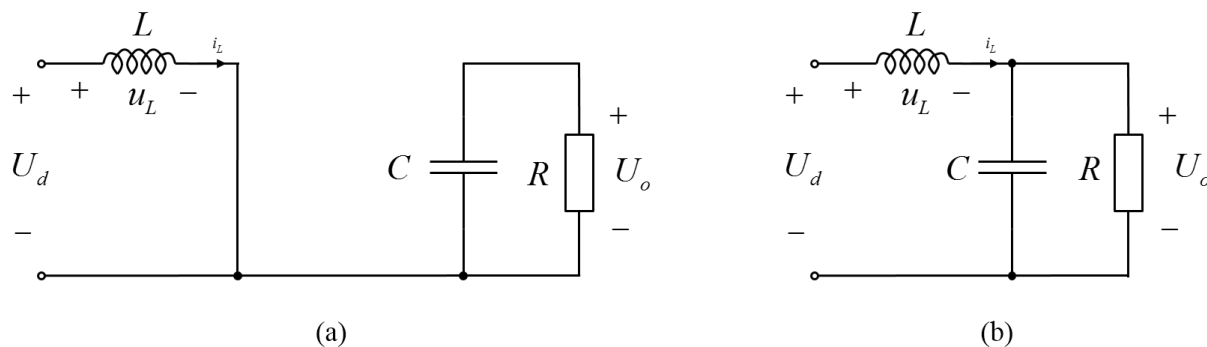
5.1 Pretvornik navzgor

Pretvornik navzgor je elektronski pretvornik, ki dvigne enosmerno vhodno napetost na višji nivo. Sestavljen je iz dušilke, stikalnega elementa, diode in kondenzatorja. Slika 5.1 prikazuje shemo pretvornika navzgor:



Slika 5.1: Pretvornik navzgor

Delovanje pretvornika navzgor je sestavljeno iz dveh režimov. Med režimi preklapljam s stikalnim elementom, ki je v našem primeru tranzistor. V režimu, ko je tranzistor vklopljen (Slika 5.2a), shranjujemo energijo iz izvora v dušilko L . Ko pa tranzistor izklopimo (Slika 5.2b), izhodna stopnja sprejema energijo iz izvora in še dodatno energijo, ki je shranjena v dušilki.



Slika 5.2: (a) Shema pretvornika v prvem režimu delovanja; (b) Shema pretvornika v drugem režimu delovanja

Model pretvornika smo dobili tako, da smo zapisali enačbe stanja za primer, ko je tranzistor odprt (5.1) in nato zaprt (5.2).

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{(R_L + R_i)}{L} i_L + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{du_o}{dt} &= -\frac{1}{RC} u_o \end{aligned} \right\} \cdot \Delta p \quad (5.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{(R_L + R_i)}{L} i_L - \frac{1}{L} i_L + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{du_o}{dt} &= \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} u_o \end{aligned} \right\} \cdot (1 - \Delta p) \quad (5.2)$$

Če zgornji enačbi seštejemo, dobimo nelinearni model pretvornika navzgor (5.3):

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{(R_L + R_i)}{L} i_L - \frac{1}{L} u_o (1 - \Delta p) + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{du_o}{dt} &= \frac{1}{C} i_L (1 - \Delta p) - \frac{1}{RC} u_o \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Pri tem zapisu modela pretvornika smo že upoštevali notranjo upornost vira, ki ni zanemarljiva.

5.2 Simulacija pretvornika

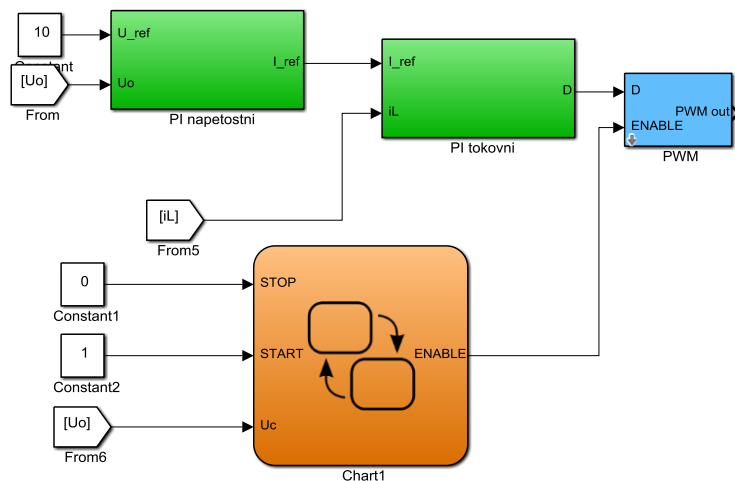
Najprej smo delovanje pretvornika simulirali v programskem orodju MATLAB/Simulink. Kot izvor energije smo uporabili blok za enosmerno napetost, kateremu smo dodali še upor, ki

Simulacijske podatke (Tabela 5.1) smo določili iz lastnosti pretvornika in določenih zahtev delovanja.

Tabela 5.1: Simulacijski podatki

Vhodna napetost	$U_d = 9 \text{ V}$
Vhodna upornost	$R_{nad} = 6.2 \text{ } \Omega$
Upornost dušilke	$R_L = 0,2 \text{ } \Omega$
Induktivnost dušilke	$L = 824 \text{ } \mu\text{H}$
Ekvivalentna serijska upornost kondenzatorja	$R_{ESR} = 0,09 \text{ } \Omega$
Kapacitivnost kondenzatorja	$C = 220 \text{ } \mu\text{F}$
Kolenska napetost diode	$U_D = 0,8 \text{ V}$
Frekvenca	$f = 100 \text{ kHz}$
Perioda	$T_s = 10 \text{ } \mu\text{s}$
Prevajalno razmerje	$\Delta p = 0,7$
Upornost bremena	$R_o = 330 \text{ } \Omega$

Ko smo potrdili pravilno delovanje modela, smo se lotili modeliranja algoritma regulacije. V model smo dodali dva proporcionalno-integralna (PI) regulatorja v kaskadni vezavi. V notranji, hitrejši zanki smo regulirali tok skozi dušilko i_L , v zunanji, počasnejši zanki pa izhodno napetost U_o . Izhode iz regulatorjev smo ustrezno omejili in dodali še algoritem za računanje prevajalnega razmerja Δp . Tako dopolnjen simulacijski model (Slika 5.4) smo preverili tako, da smo po določenem času spremenili bremensko upornost. S tem sta se spremenila napetost na izhodu U_o in izhodni tok i_L . Če je regulator deloval pravilno, se je napetost morala vrniti na želeni nivo, ki smo ga nastavili.



Slika 5.4: Algoritem vodenja

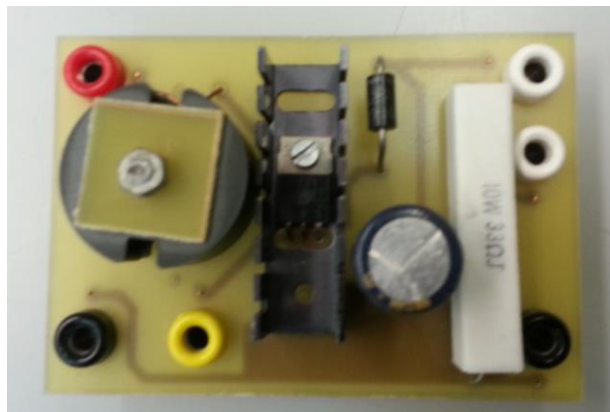
Ko smo potrdili pravilno delovanje pretvornika v virtualnem okolju, smo se lotili realnega sistema.

5.3 Realni sistem

Realni sistem je sestavljalo več komponent. Najpomembnejša komponenta je bil vsekakor pretvornik navzgor, brez katerega ne bi mogli izvajati pretvorb napetosti. Imeli smo tri vezja, za merjenje vhodne in izhodne napetosti, ter vhodnega toka. Vse skupaj pa smo priklopili na digitalni signalni krmilnik tako, da smo dobili smiselno celoto. Zaradi varnosti in preverjanja smo pretvornik najprej napajali preko laboratorijskega napajalnika. Šele kasneje smo pretvornik priklopili na sistem termoelektričnih elementov.

Pretvornik navzgor:

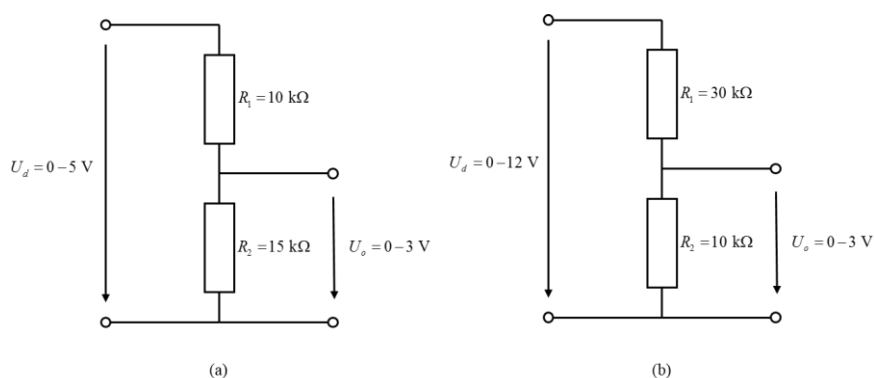
Pretvornik navzgor (Slika 5.5) je zgrajen iz dušilke, katere induktivnost je $L = 824 \mu\text{H}$, MOSFET – a oznake BUZ 11, kondenzatorja kapacitivnosti $C = 220 \mu\text{F}$, diode in bremenskega upora, ohmske upornosti $R = 33 \Omega$, ki pa ni priključen. Ploščica prav tako vsebuje priključke za žice.



Slika 5.5: Pretvornik navzgor

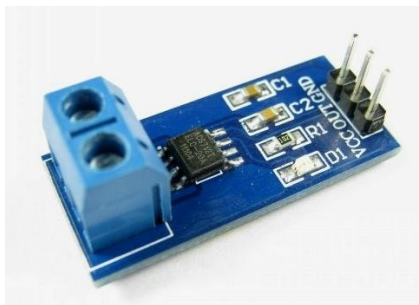
Merilniki:

Vhodno in izhodno napetost smo merili preko napetostnih delilnikov. Tako smo za vhodno napetost, ki je bila $U_d = 5\text{ V}$, izbrali upora vrednosti $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ in $R_2 = 15\text{ k}\Omega$, da smo dobili na izhodu delilnika napetost od $0\text{--}3\text{ V}$ (Slika 5.6a). Za izhodno napetost, katere najvišja vrednost je lahko bila $U_o = 12\text{ V}$, pa smo izbrali upora $R_1 = 30\text{ k}\Omega$ in $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ (Slika 5.6b).



Slika 5.6: (a) Napetostni delilnik za vhodno napetost; (b) Napetostni delilnik za izhodno napetost

Za izvedbo regulacije na krmilniku smo rabili še en podatek. Morali smo meriti tok skozi dušilko. Ta tok je bil enak vhodnemu toku v pretvornik, ki smo ga merili preko tokovnega merilnika ACS712, ki deluje na osnovi Hallovega efekta. Uporabili smo ploščico, na kateri je že pripravljeno tiskano vezje, skupaj s čipom, prilagoditvenim vezjem in seveda priključki (Slika 5.7).



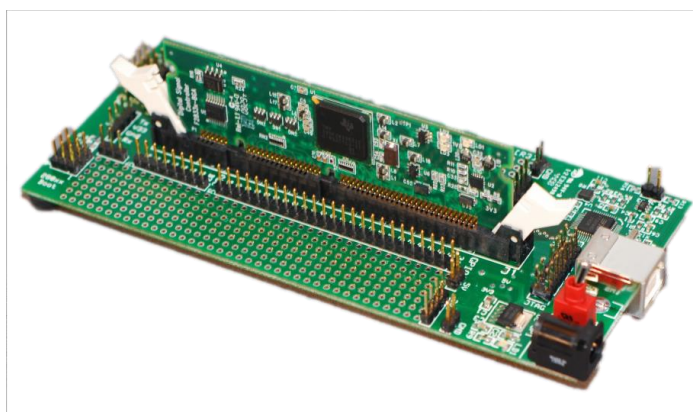
Slika 5.7: Tokovni senzor

(vir: <http://embedded-lab.com/blog/wp-content/uploads/2012/01/ActualModule.jpg>)

Ta čip potrebuje 5 V napajanje in meri tok od -5 A do 5 A. Izmerjen tok se pretvori v napetost, kjer ničlo predstavlja polovica napajanja, kar je 2,5 V. Ker naš krmilnik lahko na svoj analogni vhod sprejme napetost od 0 do 3 V, smo tudi tukaj morali uporabiti napetostni delilnik.

Digitalni signalni krmilnik:

Uporabili smo digitalni signalni krmilnik TMS320F28335 proizvajalca Texas Instruments (Slika 5.8). Ta krmilnik smo uporabili zaradi njegove zmogljivosti in predhodnih izkušenj z njim.



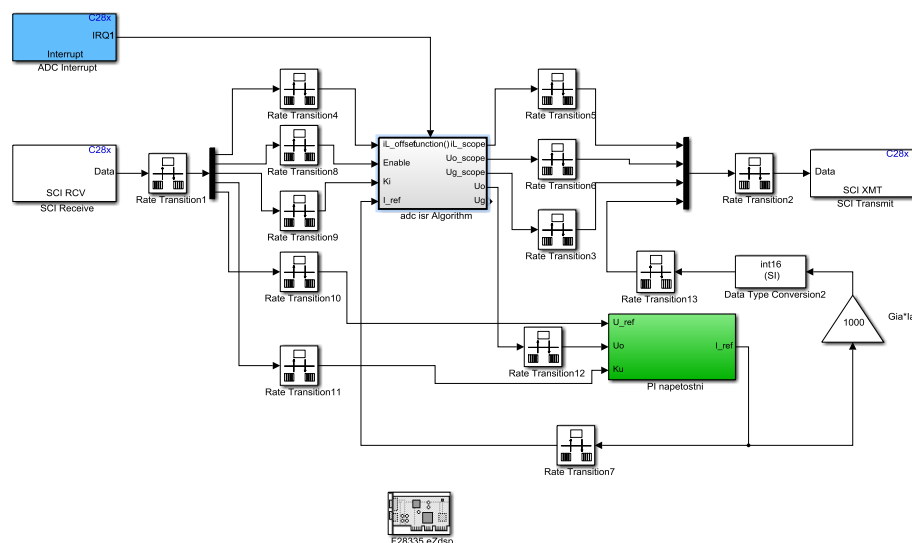
Slika 5.8: Krmilnik TMS320F28335

(vir: <http://uk.farnell.com/productimages/farnell/standard/1748915-40.jpg>)

Od perifernih enot [6] smo uporabljali 3 analogne vhode in en PWM izhod. Na treh analognih vseh smo merili vse tri napetosti in jih pretvarjali v digitalno obliko, preko A/D pretvorbe. Na PWM izhodu pa smo generirali pulzno-širinsko moduliran signal, s katerim smo potem preko gonilnika IR2118, krmilili MOSFET.

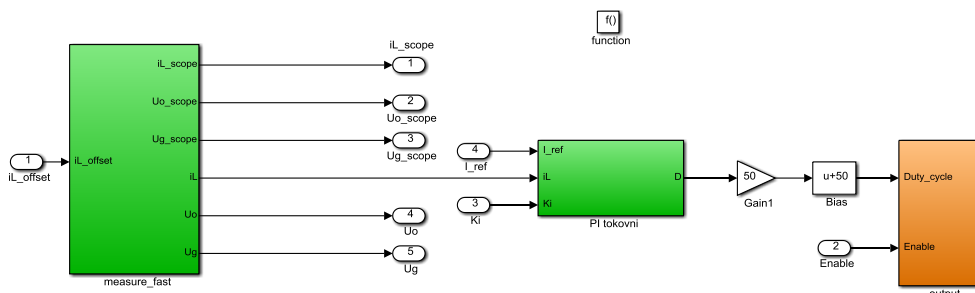
Naš krmilnik smo programirali s pomočjo MATLAB/Simulink-a. Program v obliki blokovne sheme [7] smo prevedli v C-kodo in program naložili na krmilnik preko programskega orodja Code Composer Studio v3.3.

V programu (Slika 5.9) smo poskrbeli za serijsko komunikacijo (SCI), 3 A/D pretvorbe, generacijo PWM signala in regulacijo. S pomočjo SCI smo spremljali merjene veličine, ki smo jih v programu pretvarjali. Hkrati pa smo lahko spreminjali vhodne podatke v sistem. Tako smo na primer spreminjali prevajalno razmerje PWM signala v zgodnjih fazah testiranja. V nadaljevanju pa smo lahko spreminjali parametre regulacije. Te smo morali spremeniti, saj se naš ciljni sistem razlikuje od laboratorijskega napajalnika, za katerega lahko rečemo, da je skoraj idealni vir energije.



Slika 5.9: Program v Simulink-u

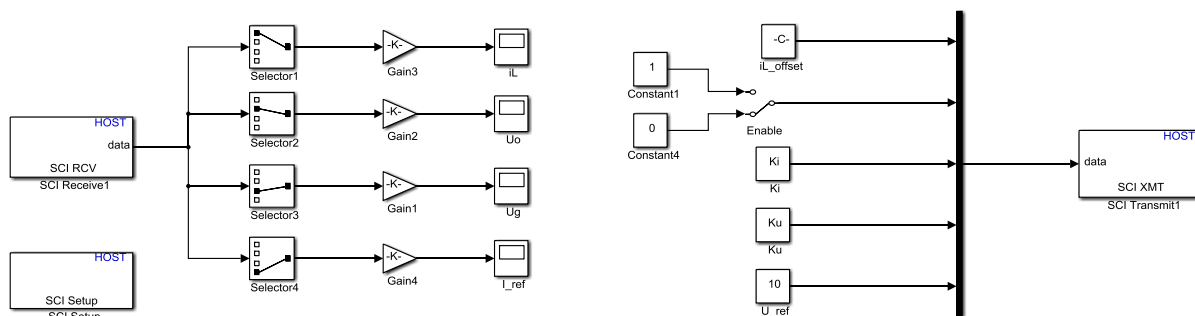
Kot vidimo iz sheme (Slika 5.9), se koda v bloku »*adc_isr Algorithm*« izvede, ko pride do konca pretvorbe A/D pretvornika, ki proži prekinitvev. V tem bloku (Slika 5.10) potem prikažemo rezultate meritev in izvajamo regulacijo toka, ki je hitrejša. Zunaj tega bloka pa se izvaja komunikacija in počasnejša napetostna regulacija.



Slika 5.10: Vsebina bloka "adc isr Algorithm"

Komunikacijo med digitalnim signalnim krmilnikom in gostujočim računalnikom pa smo nadzorovali z uporabniškim programom (Slika 5.11), ki je vseboval bloke za prikaz meritev in bloke za spreminjanje parametrov.

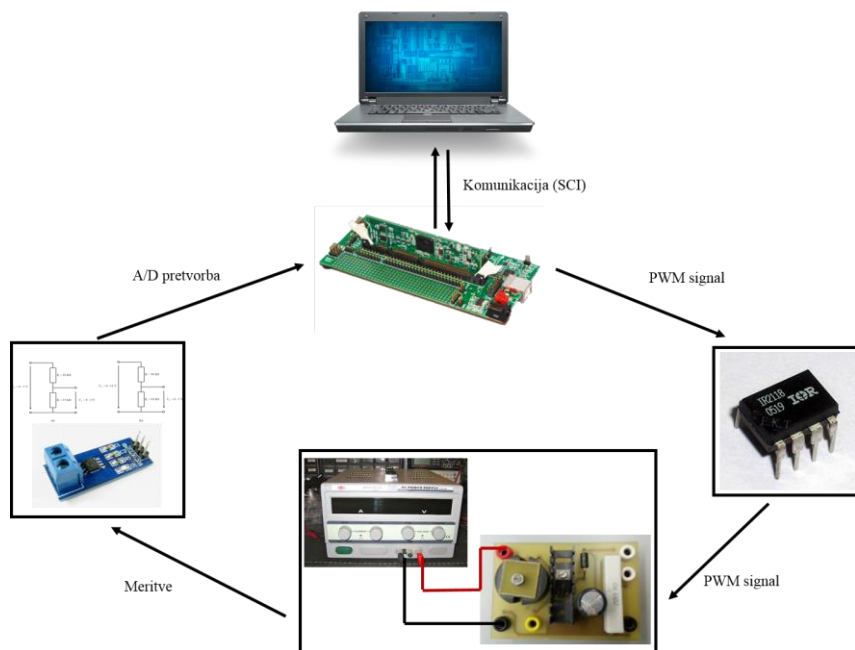
Host-Side Monitor



Slika 5.11: Uporabniški vmesnik - program

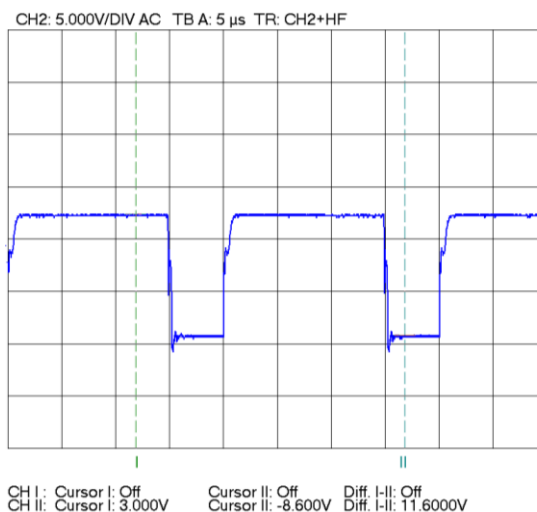
5.4 Celotni sistem in test delovanja

Ko smo zbrali vse komponente sistema, smo jih sestavili v zaključeno celoto (Slika 5.12). Tako smo preverili delovanje sistema, napajane preko laboratorijskega usmernika. Sistem smo testirali z laboratorijskim usmernikom zato, ker smo lahko preverili delovanje vseh komponent in ker smo imeli dodatno zaščito našega sistema v smislu tokovnih in napetostnih limit, ki jih omogoča napajalnik.



Slika 5.12: Celotni sistem

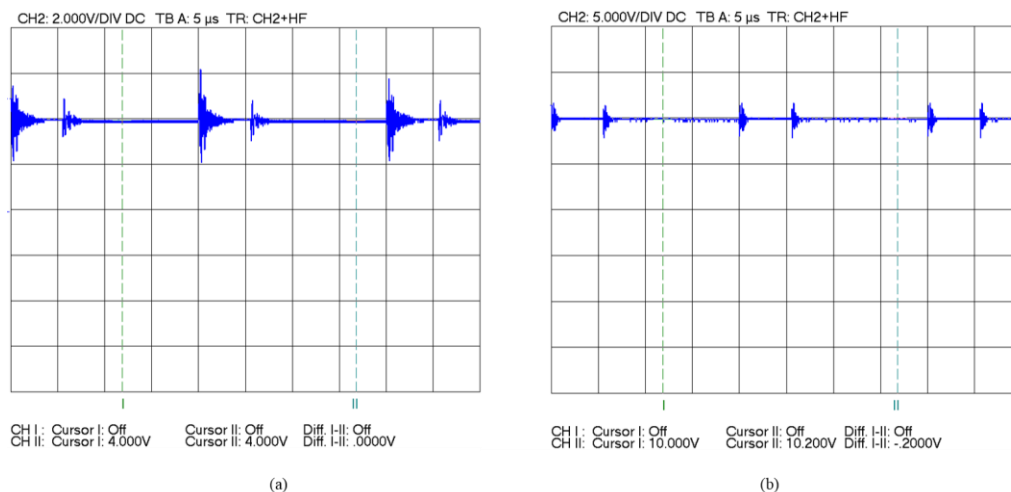
Med testiranjem in spreminjanjem podatkov smo posneli tudi nekaj potekov napetosti. Posneli smo pulzno-širinsko moduliran signal (Slika 5.13), vhodno (Slika 5.14a) in izhodno napetost (Slika 5.14b). Pretvornik je bil obremenjen z variabilnim ohmskim uporom. Obremenitev smo lahko spreminjali od 33Ω do 363Ω .



Slika 5.13: PWM signal iz gonilnika

Izhodna napetost je bila posneta v stacionarnem stanju. Referenčna napetost regulatorja je bila nastavljena na 10 V. Ugotovili smo, da regulacija deluje v omejenem območju, saj se prenosna funkcija sistema spreminja v odvisnosti od elementov, ki so prav tako podvrženi vplivom

okolja. Glavna ugotovitev oziroma dosežek je stabilna regulacija v območju, kjer bo pretvornik deloval.

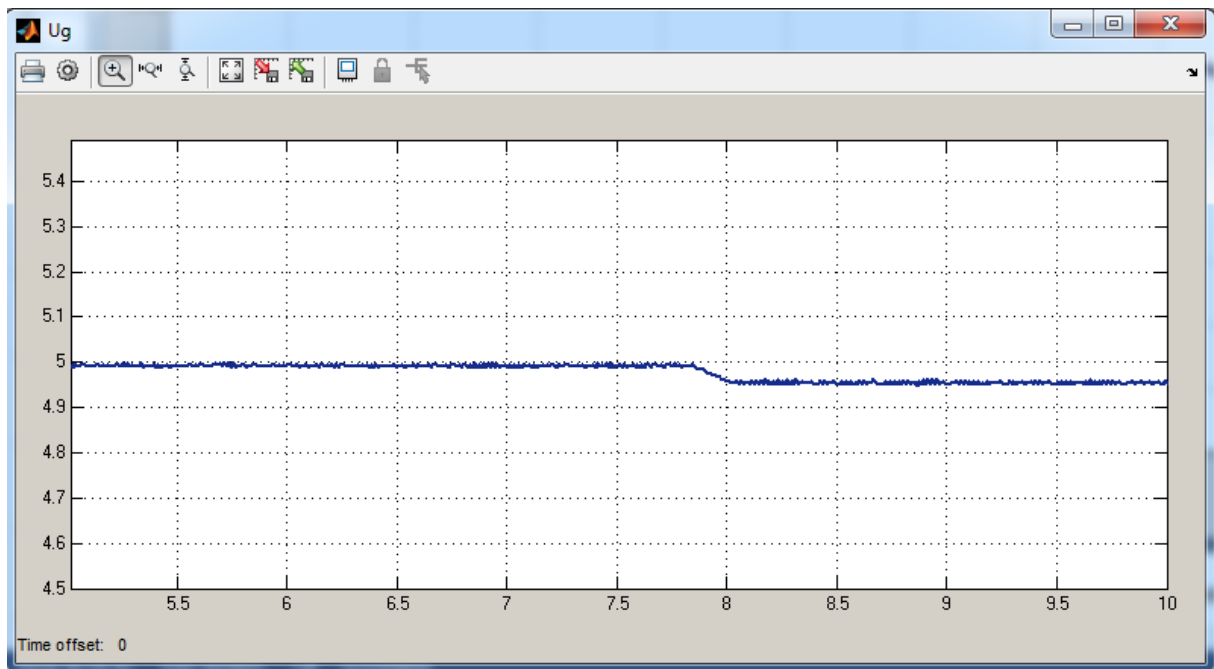


Slika 5.14: (a) Vhodna napetost U_d ; (b) Izhodna napetost U_o

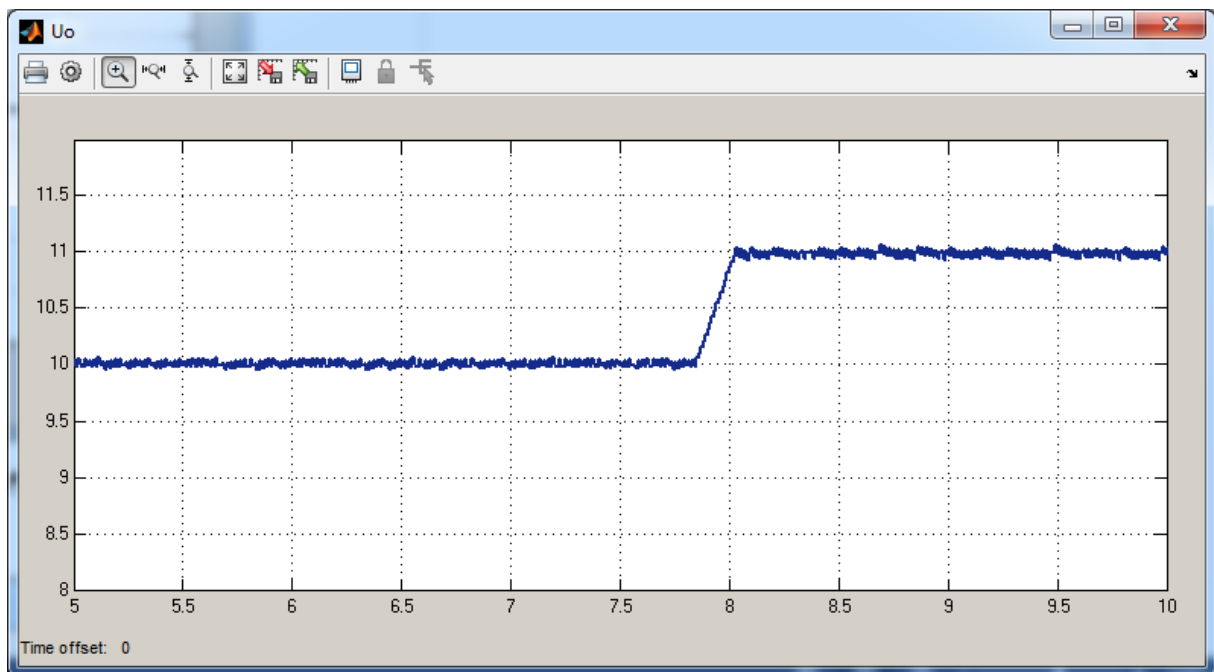
Prišli smo do ugotovitve, da naša regulacija deluje, če spreminjamo vhodno napajalno napetost od 4 V do 6 V oziroma če spreminjamo breme v določenih mejah. Pri konstantni vhodni napetosti 5 V pa smo uspeli dvigniti izhodno napetost na katerokoli vrednost v območju od 9 do 12 V.

Prikaz meritev v uporabniškem programu (Slika 5.15, Slika 5.16 in Slika 5.17) je zelo dobro sledil meritvam na merilnih instrumentih, kar je potrdilo delovanje A/D pretvorbe in preračuna v programu.

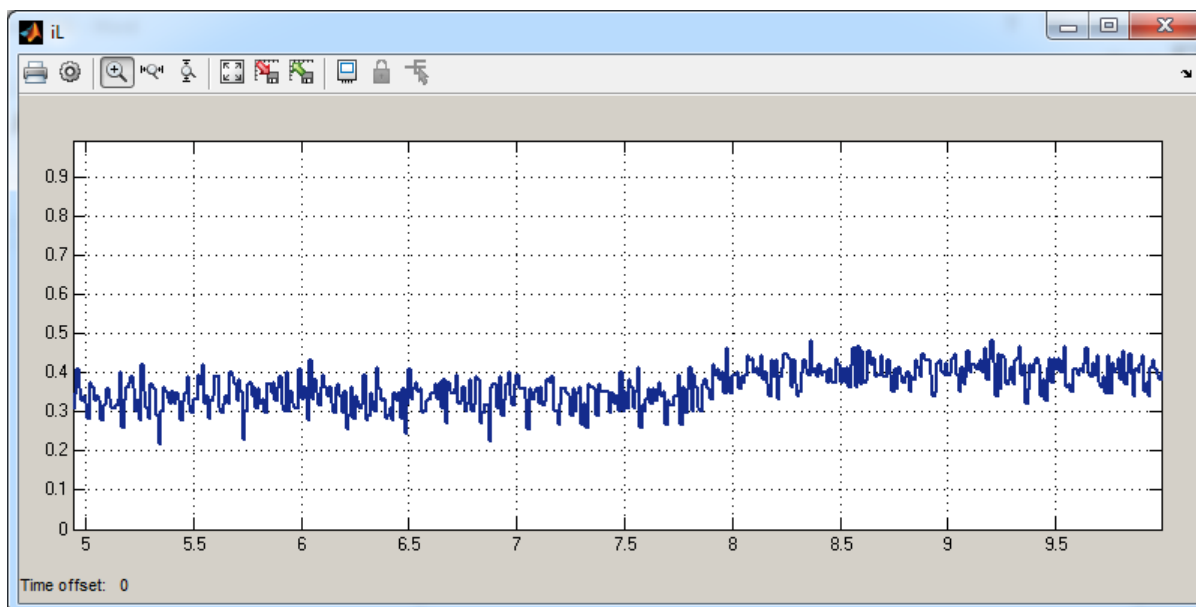
Pri meritvi toka skozi dušilko smo opazili relativno velika nihanja v vrednosti izmerjenega toka. Ta nihanja so posledica šuma, katerega glavni vzrok je laboratorijsko okolje, ki je precej onesnaženo. Srednja vrednost merjenega toka pa vseeno sovпада z vrednostjo, ki smo jo dobili preko meritve toka z analognim merilnim instrumentom.



Slika 5.15: Meritev iz digitalnega signalnega krmilnika – vhodna napetost



Slika 5.16: Meritev iz digitalnega signalnega krmilnika - izhodna napetost



Slika 5.17: Meritev iz digitalnega signalnega krmilnika - tok skozi dušilko

5.5 Ciljni sistem

Na pretvornik smo priklopili naš ciljni sistem. Ker smo hoteli, da pretvornik dviguje napetost v točki maksimalne moči, smo morali izenačiti upornost pretvorniškega sistema in notranjo upornost vira. Da smo to lahko storili, smo rabili povezavo med navidezno vhodno upornostjo pretvornika navzgor in bremenskim uporom pretvornika. To povezavo smo izpeljali iz enačb statične karakteristike pretvornika navzgor (5.4).

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} I_L - \frac{1}{L} U_o (1 - \Delta p) + \frac{1}{L} U_d = 0 \quad (5.4)$$

$$\frac{dU_o}{dt} = \frac{1}{C} I_L (1 - \Delta p) - \frac{1}{RC} U_o = 0 \quad (5.5)$$

Iz (5.5), smo izstavili veličino U_o :

$$U_o = R_o I_L (1 - \Delta p) \quad (5.6)$$

Nato smo (5.6) vstavili v (5.4) in dobili povezavo med bremensko upornostjo in navidezno upornostjo na vhodu pretvornika:

$$R_{vH} = \frac{U_d}{I_L} = R_L + R_o (1 - \Delta p)^2 \quad (5.7)$$

Na izmerjeni karakteristiki (Slika 4.2) lahko vidimo, da je točka maksimalne moči sistema pri bremenu 10Ω . Iz tega podatka lahko izračunamo potrebno bremensko upornost na izhodu pretvornika navzgor, da sistem deluje v točki maksimalne moči. Za izračun uporabimo rahlo preoblikovano enačbo (5.7):

$$R_o = \frac{R_{vH} - R_L}{(1 - \Delta p)^2} \quad (5.8)$$

Po izračunu dobimo vrednost bremenske upornost $R = 110 \Omega$. Ker pa se elementi segrevajo, se s temperaturo spreminja tudi notranja upornost sistema. Prav tako vidimo, da je bremenska upornost odvisna od kvadrata prevajalnega razmerja, ki pa se spreminja.

Tako ne moremo natančno določiti bremenske upornosti na izhodu, ki bi vedno zagotovila delovanje v točki maksimalne moči. Zato smo se odločili, da preizkusimo delovanje regulacije pri dveh različnih bremenskih uporih.

Izbrali smo dve vrednosti uporov:

- prva vrednost bremenskega upora $R_o = 135 \Omega$,
- druga vrednost bremenskega upora $R_o = 260 \Omega$.

Pri prvi upornosti smo uspeli zagotoviti stabilno delovanje regulacije v območju od 6–8 V, pri drugi bremenski upornosti pa v območju od 8–10 V.

6 REZULTATI

Naš cilj pri diplomskem delu je bil, da preverimo odziv pretvornika navzgor, na naš sistem za preizkušanje termoelektričnih elementov. Pretvornik smo uspešno povezali s sistemom za preizkušanje termoelektričnih elementov in izvedli osnovni nivo regulacije izhodne napetosti pretvornika.

Pri meritvah smo opazili, da sistem, za razliko od laboratorijskega napajalnika, ni zmožen napajanja velikih bremen, saj se napetost sesede. Normalno obratovanje se začne pri točki maksimalne moči, ki je določena z notranjo upornostjo sistema termoelektričnih elementov.

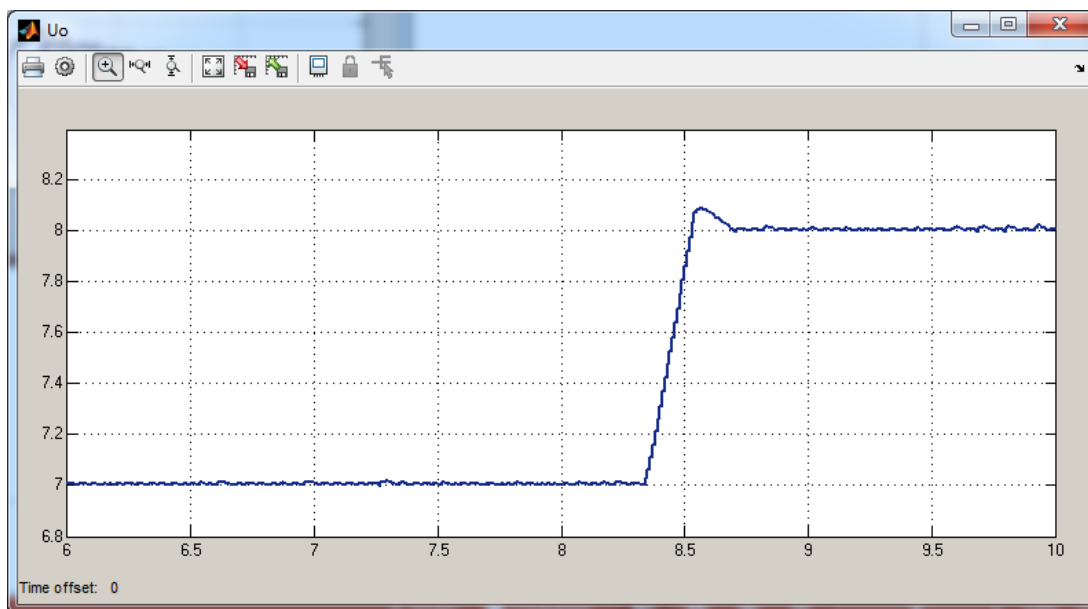
Z višanjem ohmske upornosti bremena bi lahko še bolj dvignili izhodno napetost na račun dvignjene vhodne napetosti. Vendar se z večanjem bremenske upornosti vedno bolj oddaljujemo od točke maksimalne moči. Z dovolj velikim bremenom na izhodu več ne bi imeli vhodnega toka oziroma bi bil zanemarljiv. Brez merljivega vhodnega toka pa pretvornik navzgor ne more delovati pravilno. Zato je smiselno, da sistem testiramo v neposredni okolici točke maksimalne moči.

V nadaljevanju smo podrobneje predstavili rezultate. Prikazan je prehodni pojav na izhodu pretvornika (Slika 6.1) in na vhodu pretvornika (Slika 6.2). Z omenjenima slikama lahko potrdimo delovanje regulacije. Na poteku izhodne napetosti (Slika 6.1) opazimo tudi prenehaj.

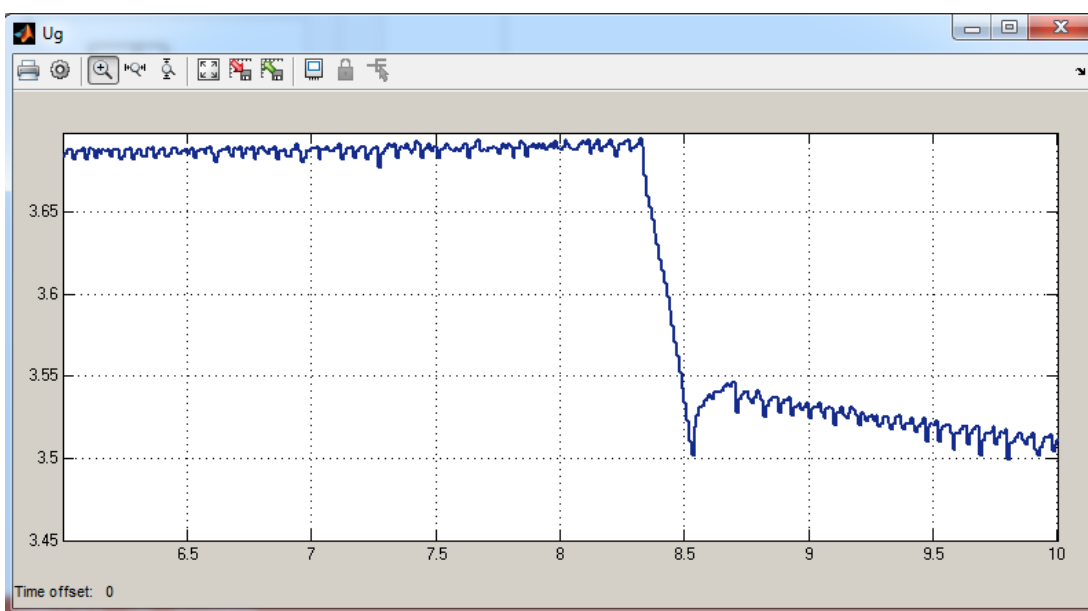
Ko podrobneje analiziramo meritev vhodne napetosti (Slika 6.2), vidimo, da napetost na vhodu pade. To je posledica večjega vhodnega toka, ki je potreben, da se v dušilko shrani več energije, ki je potrebna za dvig izhodne napetosti na višji nivo (iz 7 V na 8 V).

Ker je naš sistem zmožen proizvesti le 1,4 W električne energije, trenuten pretvornik (pretvornik navzgor) ni najbolj primeren za dvigovanje izhodne napetosti. Pokazala se je potreba po načrtovanju pretvornika, ki bo nizko vhodno napetost dvignil vsaj za faktor 5. Nizko vhodno napetost smo predvideli zaradi:

- večjega vhodnega toka, ki je potreben za shranjevanje energije v dušilko,
- obratovanje v točki maksimalne moči, kjer je napetost nižja.



Slika 6.1: Potek izhodne napetosti



Slika 6.2: Potek vhodne napetosti

Preverili smo tudi odziv regulacije na spremembo bremena. Breme smo preko drsnega upora spremenili in ugotovili, da regulacija deluje v primeru majhnih sprememb bremenske upornosti. Če pa breme spremenimo v večjem obsegu, pa regulacija ne deluje več. To se zgodi zaradi enakega razloga, kot smo ga že prej omenili. Naš sistem ne zmore napajanja večjih bremen. Ker je moč konstantna, je napetost padla na račun toka, ki se je povečal. Ker pa se je tok zelo povečal, je napetost padla na zelo nizki nivo in pretvornik navzgor ni deloval pravilno.

7 SKLEP

Iz zapsanega v prejšnjih poglavjih je razvidno, da je že sam sistem za testiranje termoelektričnih elementov kompleksen. Pri gradnji in meritvah smo naleteli na ogromno težav, katerih nismo takoj predvideli. Možnih je ogromno izboljšav, s katerimi bi v prvi vrsti morali izboljšati stike med elementi in obema ploščama, ter enakomernejši prenos toplote na vmesno ploščo.

Prav tako bi podrobnejša študija o tem, kako povezati termoelektrične elemente, gotovo pripomogla k mogoče boljšemu načinu povezovanja elementov in s tem k večjemu iznosu energije.

Zgoraj omenjene izboljšave so gotovo del nadaljnjega dela na tem projektu.

Na splošno se je sistem pozitivno odzval na priklop pretvornika navzgor in njegove regulacije. V izbranih območjih smo uspeli regulirati izhodno napetost v območju 2-3 V. Ker pa delamo s sistemom majhne moči, ki je v rangi 1-2 W, je vhodna napetost nihala v odvisnosti od obremenitve. Eden od vzrokov, da je temu tako, je dušilka, ki je za naš sistem prevelika. V času, ko je bil tranzistor vklopljen in je bila dušilka kratko sklenjena z namenom shranjevanja energije, je iz sistema stekel velik tok. Ker je stekel večji tok, se je napetost na vhodu pretvornika znižala, da je moč ostala enaka.

V nadaljevanju je predvideno načrtovanje in uporaba kompleksnejšega pretvornika, ki je specifičen za naš sistem. Pogoj za uporabo takšnega pretvornika je boljše poznavanje obnašanja sistema in njegove izvedbe. Prav tako je dobrodošla implementacija MPPT algoritma, ki zagotavlja delovanje v točki maksimalne moči.

Nadaljnje delo predstavlja posodobitev sistema za preizkušanje termoelektričnih elementov in odvzemanje moči z naprednim pretvorniškimi sistemom, ki vključuje delovanje pretvornika v točki maksimalne moči. To zagotavlja največjo količino pridobljene energije tega sistema. Naslednja faza po teh izboljšavah pa je vključitev termoelektričnih elementov v že obstoječe solarne panele in sinhronizacijo z njimi.

Iz predstavljenih rezultatov lahko zaključimo, da trenutna izvedba sistema za preizkušanje termoelektričnih elementov omogoča napajanje manjših naprav. Glavna omejitev je doseganje in ohranjanje dovolj visoke temperaturne razlike. Ena od omejitev je tudi sam material, iz katerega so narejeni termočleni elementa.

Proizvajanje večje izhodne moči omogočajo termoelektrični elementi, ki prenašajo zelo visoke temperature. Področje uporabe takšnih elementov je v raznih industrijskih aplikacijah, kjer se iz procesa obdelave izloča veliko odpadne energije v obliki toplote. Tam je vedno zagotovljena visoka temperatura, ki je odvisna od procesa in tako zagotavlja konstantno temperaturno razliko, če je zagotovljeno primerno vzdrževanje hladne strani na konstantni temperaturi. Z zagotovljeno konstantno temperaturno razliko pa iz termoelektričnih elementov dobimo konstantno električno moč.

8 VIRI, LITERATURA

- [1] [svetovni splet] Dajiang Yang, Huiming Yin. Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization. IEEE Transactions on energy conversion (Junij 2011), vol. 26, no. 2, str. 622-670. Dostopno na: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05738324&tag=1> [21.8.2013]
- [2] [svetovni splet] Thermoelectric Cooler TEC1-12730, podatkovni list. Dostopno na: <http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12730.pdf> [21.8.2013]
- [3] [svetovni splet] Wikipedia, Thermoelectric Effect, Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect [26.8.2013]
- [4] Milanovič, M., Močnostna elektronika, univerzitetni učbenik, Ponatis, 1. izd., Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2010.
- [5] MathWorks, SimPowerSystems uporabniški priročnik, Dostopno na: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phymod/powersys/powersys.pdf [26.8.2013]
- [6] [svetovni splet] Texas Instruments, TMS320F28335/F28334/F28332/F28235/F28234/F28232 Digital Signal Controllers, podatkovni list, Junij 2007 [prenovljeno Avgust 2012], Dostopno na: <http://www.ti.com/lit/ds/sprs439m/sprs439m.pdf> [26.8.2013]
- [7] MathWorks, Embedded Target for the TI TMS320C2000 DSP Platform, Dostopno na: http://www.isep.pw.edu.pl/ZakladNapędu/lab-skp/tic2000_ug.pdf [26.8.2013]