



Tine Konjedic

# **ENOSTOPENJSKI DC-AC PRETVORNIK ZA SOLARNE SISTEME**

Diplomsko delo

Maribor, november 2009



Diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa

## **ENOSTOPENJSKI DC-AC PRETVORNIK ZA SOLARNE SISTEME**

Študent: Tine Konjedic  
Študijski program: Gospodarsko inženirstvo - Elektrotehnika  
Smer: Močnostna elektrotehnika  
Mentor: dr. Miro Milanovič, red. prof.  
dr. Vojko Potočan, izr. prof.

Maribor, november 2009

## UNIVERZA V MARIBORU

---

 (ime fakultete oz. visoke strokovne šole)

Številka: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**SKLEP O DIPLOMSKEM DELU**

1. \_\_\_\_\_, študent-ka univerzitetnega (visokošolskega strokovnega) študija \_\_\_\_\_, izpolnjuje pogoje, zato se mu dovoljuje izdelati diplomsko delo.
2. Tema diplomskega dela je s področja katedre/oddelka/inštituta \_\_\_\_\_, pri predmetu \_\_\_\_\_.  
Mentor-ica: \_\_\_\_\_  
Somentor-ica: \_\_\_\_\_
3. Naslov diplomskega dela: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
4. Vsebina diplomskega dela: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
5. Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo diplomskega dela« in ga oddati v \_\_\_\_\_ izvodih do \_\_\_\_\_ v referatu za študentske zadeve.

Predstojnik katedre/oddelka/inštituta:

Dekan-ica:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Mentor:

\_\_\_\_\_

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Miru MILANOVIČU za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela. Prav tako se za koristne napotke in pomoč zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Vojku POTOČANU.

Hvala tudi celotni ekipi Laboratorija za energetska elektronika, za strokovne nasvete in pomoč pri realizaciji predmeta mojega diplomskega dela.

Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij in vsem mojim najbližjim, ki so mi stali ob strani in me spodbujali v času študija.

## ENOSTOPENJSKI DC-AC PRETVORNIK ZA SOLARNE SISTEME

**Ključne besede:** fotonapetostni sistem, sončne celice, podpore električni energiji iz obnovljivih virov, DC-DC pretvornik, DC-AC pretvornik, enostopenjski DC-AC pretvornik, pulzno-širinska modulacija, načrtovanje pretvornika, stroškovna analiza, stroški, prodajna cena, ekonomska upravičenost

**UDK:** 621.318.2:621.311.245(043.2)

### POVZETEK

V diplomskem delu so predstavljene posamezne komponente fotonapetostnih sistemov, podpore proizvodnji električne energije iz obnovljivih virov in osnove DC-DC ter DC-AC pretvornikov. Opisano je načrtovanje in preizkušanje enostopenjskega DC-AC pretvornika, ki se lahko uporablja kot omrežni razsmernik v sistemu sončne elektrarne. Za proženje stikal je uporabljena pulzno-širinska modulacija, ki je izvedena z uporabo digitalnega signalnega procesorja. Z namenom uvrstitve pretvornika v fotonapetostni sistem je določena prodajna cena izdelka, ki temelji na njegovi lastni ceni. Za potrebe določitve lastne cene je izvedena stroškovna analiza. V končni fazi je predstavljena še ekonomska upravičenost proizvodnje električne energije z omrežno priključenim fotonapetostnim sistemom, ki uporablja enostopenjski DC-AC pretvornik.

# **SINGLE-STAGE DC-AC CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

**Key words:** photovoltaic system, solar cells, support for renewable energy sources electricity, DC-DC converter, DC-AC converter, single-stage DC-AC converter, pulse-width modulation, converter design, cost analysis, costs, selling price, economic justification

**UDK:** 621.318.2:621.311.245(043.2)

## **ABSTRACT**

This report presents design and experimental testing of single-stage DC-AC converter for photovoltaic systems. Its main attribute is the fact that it generates an AC output voltage larger than the DC input, depending on instantaneous duty cycle. Output voltage is controlled with pulse-width modulation, which is done by using of a digital signal processor. With intention of placing single-stage DC-AC converter into a residential photovoltaic system the cost analysis of the converter is made and its selling price has been evaluated. Economic justification of electricity production with a micro photovoltaic power plant is rated in the final chapter. This work also presents the main components used in photovoltaic systems, basics of DC-DC and DC-AC converters and a short summary of legislation and support schemes for electricity produced from renewable energy sources in Slovenia.

## VSEBINA

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1	NAMEN RAZISKAVE .....	1
1.2	VSEBINA NALOGE .....	3
<b>2</b>	<b>FOTONAPETOSTNI SISTEMI .....</b>	<b>4</b>
2.1	SONČNE CELICE .....	5
2.1.1	<i>Vrste sončnih celic.....</i>	<i>6</i>
2.2	FOTONAPETOSTNI MODULI .....	7
2.2.1	<i>Sončni generator .....</i>	<i>9</i>
2.3	RAZSMERNIKI .....	10
2.4	ZAKONODAJA IN SPODBUDE NA PODROČJU E-OVE V SLOVENIJI .....	11
2.4.1	<i>Energetski zakon.....</i>	<i>12</i>
2.4.2	<i>Deklaracije za proizvodne naprave in potrdila o izvoru električne energije..</i>	<i>13</i>
2.4.3	<i>Podpore električni energiji proizvedeni iz obnovljivih virov .....</i>	<i>13</i>
<b>3</b>	<b>PRETVORNIŠKI SISTEM .....</b>	<b>17</b>
3.1	DC-DC PRETVORNIKI.....	17
3.1.1	<i>Pretvornik navzdol.....</i>	<i>19</i>
3.1.2	<i>Pretvornik navzgor .....</i>	<i>21</i>
3.2	DC-AC PRETVORNIKI (RAZSMERNIKI).....	25
3.2.1	<i>Enofazni razsmernik .....</i>	<i>25</i>
3.2.2	<i>Trifazni razsmernik.....</i>	<i>27</i>
3.3	ENOSTOPENJSKI DC-AC PRETVORNIK.....	27
<b>4</b>	<b>PROJEKTIRANJE IN PREIZKUŠANJE PRETVORNIŠKEGA SISTEMA ....</b>	<b>30</b>
4.1	PROJEKTNE ZAHTEVE.....	30
4.2	NAČRTOVANJE ELEMENTOV VEZJA .....	31
4.2.1	<i>Dušilka.....</i>	<i>32</i>
4.2.2	<i>Kondenzator .....</i>	<i>37</i>
4.2.3	<i>Stikalo .....</i>	<i>38</i>
4.2.4	<i>Prožilna stopnja.....</i>	<i>40</i>



4.3	MIKORARAČUNALNIŠKE KOMPONENTE IN DIGITALNI SIGNALNI PROCESOR.....	40
4.4	NAČRTOVANJE TISKANEGA VEZJA .....	45
4.5	EKSPERIMENTALNI REZULTATI .....	47
<b>5</b>	<b>STROŠKOVNA ANALIZA IN OBLIKOVANJE PRODAJNE CENE</b>	
	<b>IZDELKA .....</b>	<b>54</b>
5.1	SPLOŠNO O STROŠKIH, KALKULACIJAH IN LASTNI CENI.....	54
	5.1.1 Vrste stroškov .....	54
	5.1.2 Razvrščanje stroškov .....	57
	5.1.3 Kalkulacije in lastna cena .....	57
5.2	STROŠKI RAZVOJA IN IZDELAVE 0. PROTOTIPA.....	59
	5.2.1 Neposredni stroški materiala .....	60
	5.2.2 Neposredni stroški storitev .....	61
	5.2.3 Neposredni stroški dela .....	61
	5.2.4 Posredni in celotni stroški .....	63
5.3	PREDVIDENI STROŠKI RAZVOJA IN IZDELAVE 1. PROTOTIPA.....	63
	5.3.1 Neposredni stroški materiala .....	63
	5.3.2 Neposredni stroški storitev .....	65
	5.3.3 Neposredni stroški dela .....	66
	5.3.4 Posredni in celotni stroški .....	66
5.4	LASTNA CENA IZDELKA PRI PROIZVODNJI 10.000 KOSOV .....	67
	5.4.1 Neposredni stroški materiala .....	68
	5.4.2 Neposredni stroški storitev .....	70
	5.4.3 Ostali stroški.....	70
	5.4.4 Lastna cena.....	71
5.5	DOLOČITEV PRODAJNE CENE IZDELKA .....	72
<b>6</b>	<b>EKONOMSKA UPRAVIČENOST PROIZVODNJE ELEKTRIČNE</b>	
	<b>ENERGIJE S FOTONAPETOSTNIM SISTEMOM .....</b>	<b>74</b>
6.1	REFERENČNI OBJEKT .....	75
6.2	FOTONAPETOSTNI SISTEM.....	77
	6.2.1 Sončni generator .....	77
	6.2.2 Cena celotnega sistema .....	80

6.3	ČAS VRAČANJA INVESTICIJE .....	81
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>84</b>
<b>8</b>	<b>VIRI IN LITERATURA .....</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>PRILOGE.....</b>	<b>87</b>
9.1	IZRAČUN VALOVITOSTI TOKA SKOZI DUŠILKO .....	87
9.2	IZRAČUN POTREBNE KAPACITIVNOSTI .....	89
9.3	IZPELJAVA FUNKCIJE PREVAJALNEGA RAZMERJA .....	91
9.4	VEZALNE SCHEME IN NAČRT TISKANEGA VEZJA .....	92
9.5	REZULTATI TRŽNE ANALIZE PV MODULOV .....	99
9.6	EKONOMSKA UPRAVIČENOST MSE .....	100
9.6.1	<i>Ročni izračun.....</i>	<i>100</i>
9.6.2	<i>Analiza s pomočjo programskega orodja RETScreen.....</i>	<i>106</i>
9.7	SEZNAM SLIK .....	108
9.8	SEZNAM TABEL.....	110
9.9	KRATEK ŽIVLJENJEPIS.....	111

**UPORABLJENI SIMBOLI**

$A$	preseki jedra dušilke
$\bar{B}$	gostota magnetnega pretoka
$C$	kapacitivnost
$f_s$	stikalna frekvenca
$g$	dolžina zračne reže
$G'_m$	napetostno ojačanje
$\vec{H}$	magnetna poljska jakost
$i$	stopnja inflacije
$i_C$	trenutna vrednost toka skozi kondenzator
$I_d$	srednja vrednost toka na vhodu pretvornika
$i_D$	trenutna vrednost toka skozi diodo
$I_L$	srednja vrednost toka skozi dušilko
$i_L$	trenutna vrednost toka skozi dušilko
$I_{Lmax}$	maksimalna dopustna srednja vrednost toka skozi dušilko
$I_{MPP}$	tok pri maksimalni moči
$I_O$	srednja vrednost toka na izhodu pretvornika
$I_{sc}$	kratkostični tok
$L$	induktivnost
$l_c$	povprečna dolžina magnetnih silnic
$n$	število obdobj

$P$	delovna moč
$P_{\text{MPP}}$	maksimalna (vršna) moč
$PV_n$	prihodnja vrednost po $n$ obdobjih
$R$	upornost
$R_b$	bremenska upornost
$SV$	sedanja vrednost
$t_{\text{on}}$	časovni interval v katerem stikalo prevaja
$t_{\text{off}}$	časovni interval v katerem stikalo ne prevaja
$T_s$	stikalna perioda
$t_{(\text{ON})}$	vklopni čas tranzistorja
$t_{(\text{OFF})}$	izklopni čas tranzistorja
$t_{(\text{PR.ST.})}$	zakasnitev prožilne stopnje
$\hat{U}$	temenska vrednost napetosti
$u_1, u_2$	trenutna vrednost napetosti na posamezni veji pretvornika
$U_d$	srednja vrednost napetosti na vhodu pretvornika
$U_{\text{DC}}$	enosmerna komponenta napetosti
$U_{\text{d,max}}$	maksimalna srednja vrednost napetosti na vhodu pretvornika
$U_{\text{d,min}}$	minimalna srednja vrednost napetosti na vhodu pretvornika
$u_L$	trenutna vrednost napetosti na dušilki
$U_{\text{MPP}}$	napetost pri maksimalni moči
$U_n$	nazivna napetost

$U_o$	srednja vrednost napetosti na izhodu pretvornika
$u_o$	trenutna vrednost napetosti na izhodu pretvornika
$U_{oc}$	napetost odprtih sponk
$V$	volumen
$W_b$	energija, ki jo potrebuje breme v času ene stikalne periode
$W_c$	magnetna energija shranjena v jedru dušilke
$W_g$	magnetna energija shranjena v zračni reži
$W_m$	magnetna energija shranjena v dušilki
$\Delta i_L$	valovitost toka skozi dušilko
$\Delta p$	prevajalno razmerje
$\Delta Q$	sprememba naboja na kondenzatorju
$\Delta U_o$	valovitost izhodne napetosti
$\delta$	stikalna funkcija
$\mu_0$	permeabilnost praznega prostora
$\mu_r$	relativna permeabilnost

## UPORABLJENE KRATICE

AC	izmenični električni tok (ang. alternating current)
AR	protiodbojen (ang. anti-reflexive)
BI	enostopenjski DC-AC pretvornik navzgor (ang. boost inverter)
DC	enosmerni električni tok (ang. direct current)
DC-AC	enosmerno - izmenični pretvornik
DC-DC	enosmerni pretvornik
DSP	digitalni signalni procesor (ang. digital signal processor)
E-OVE	električna energija iz obnovljivih virov
GaAsP	polprevodniška spojina iz galija, arzena in fosforja
IGBT	bipolarni tranzistor z izoliranimi vrati (ang. insulated gate bipolar transistor)
KE	količinska enota
kWp	enota za vršno moč (ang. kilowatt-peak)
ME	merska enota
MOSFET	MOSFET tranzistor (ang. metal oxide semiconductor field effect transistor)
MPPT	sledenje točki maksimalne moči (ang. maximum power point tracking)
MSE	mikro sončna elektrarna
OVE	obnovljivi viri energije
PoI	potrdila o izvoru električne energije
PV	fotonapetosten (ang. photovoltaic)
PWM	pulzno-širinska modulacija (ang. pulse-width modulation)
SMD	površinsko nameščen element (ang. surface mount device)

# 1 UVOD

Vse večje onesnaževanje okolja in porast cen fosilnih goriv sta pripomogla k razmahu uporabe obnovljivih virov za pridobivanje električne energije. Obnovljivi viri imajo zelo pomembno vlogo predvsem v državah, ki nimajo obsežnih zalog energentov. Mednje spadajo tudi članice Evropske unije, ki želijo s spodbujanjem rabe obnovljivih virov, zmanjšati odvisnost od največjih svetovnih izvoznikov fosilnih goriv ter prispevati k čistejšemu in okolju prijaznejšemu zadovoljevanju potreb po energiji.

Med obnovljive vire prištevamo energetske potencial vodotokov, vetrno, sončno in geotermalno energijo ter biomaso. Tako kot se razlikujejo posamezni viri, se razlikujejo tudi načini njihovega izkoriščanja in posledično naprave za pretvarjanje v električno energijo. Glede na način obratovanja jih delimo na otočne sisteme, ki običajno služijo za napajanje porabnikov na odročnih mestih in omrežno priključene sisteme, ki proizvedeno električno energijo pošiljajo v omrežje.

Poleg vodnih in vetrnih elektrarn, sončne elektrarne prispevajo največji delež k svetovni proizvodnji električne energije iz obnovljivih virov. Zaradi enostavne montaže je skoraj vsaka stanovanjska hiša ali nekoliko večja zgradba primerna za namestitev takšnega sistema. Vse večje število sončnih elektrarn in masovna proizvodnja sončnih celic so pripomogli k občutnemu znižanju cen fotonapetostnih sistemov. Obstaja pa še veliko možnih izboljšav, ki bi te sisteme naredile privlačnejše za širšo množico investitorjev. Tukaj imamo v mislih predvsem zniževanje cen posameznih komponent ter posledično krajše čase vračanja vloženih sredstev.

## 1.1 Namen raziskave

Pri omrežno priključenih sončnih elektrarnah je ob fotonapetostnih modulih najpomembnejši in najdražji člen sistema razsmernik. Naloga omrežnega razsmernika je, da enosmerno energijo sončnih celic pretvori v izmenični tok in napetost lokalnega

elektroenergetskega omrežja. Običajno je poleg samega razsmerjanja potrebna tudi prilagoditev na ustrezen napetostni nivo. To se običajno izvede s klasičnimi dvostopenjskimi pretvorniki, ki so sestavljeni iz DC-DC pretvornika navzgor in razsmernika ali pa kombinacijo razsmernika in transformatorja. Če se poglobimo v topološke sheme enofaznih razsmernikov ugotovimo, da je med njimi veliko takšnih, ki teoretično zagotavljajo enako kvaliteto izhodnih signalov, enak izkoristek ter enako zanesljivost delovanja kot omenjene klasične vezave. Med njimi je še posebej zanimiv enostopenjski DC/AC pretvornik (ang. boost inverter), ki je opisan v [1] in [2]. Med njegove odlike štejemo pretvorbo na višji napetostni nivo in razsmerjanje v eni stopnji, ki omogoča delovanje pretvornika brez »DC-link« kondenzatorja in neposredno priključitev na omrežje, brez uporabe izhodnih filtrov. V primerjavi s klasičnimi omrežnimi razsmerniki pa so za delovanje, namesto šestih, potrebni le štirje stikalni elementi. Z namenom doseganja čim daljše življenjske dobe omrežnih razsmernikov se za izdelavo uporabljajo visokokvalitetni materiali in komponente, ki pa v lastni ceni takšnega pretvornika zajemajo velik delež. Na osnovi manjšega števila elementov v vezju lahko pričakujemo nižje materialne stroške pri proizvodnji in posledično možnost določitve nižje prodajne cene oziroma doseganja višjega dobička na posamezno enoto. Z uporabo takšnega pretvorniškega sistema v omrežno priključeni sončni elektrarni, bi uspeli znižati vrednost začetne investicije in skrajšati čas vračanja vloženih sredstev, kar bi vsekakor pritegnilo nove investitorje.

S tem namenom smo izdelali prototip enostopenjskega DC/AC pretvornika, ga preizkusili, analizirali s stroškovnega vidika in predvideli njegovo prodajno ceno na trgu. V končni fazi smo ga uvrstili v sistem mikro sončne elektrarne, ki vso proizvedeno električno energijo oddaja v lokalno elektroenergetsko omrežje. Za določitev časa vračanja investicije v takšno elektrarno smo morali preučiti tudi zakonodajo ter ugotoviti, kako je z odkupom električne energije proizvedene iz obnovljivih virov v Republiki Sloveniji. Na osnovi dobljenih rezultatov smo ovrednotili ekonomsko upravičenost proizvodnje električne energije s fotonapetostnim sistemom, ki je nameščen na strehi povprečne stanovanjske hiše.



## 1.2 Vsebina naloge

Predstavljeno delo je razdeljeno na sedem poglavij, ki se navezujejo na področje fotonapetostnih sistemov in močnostnih pretvornikov. Obravnavana sistema sta skozi poglavja opisana in analizirana tako s tehničnega kot z ekonomskega vidika.

Prvo poglavje zajema uvod, v katerem sta na kratko opisana področje raziskav in namen uvedbe novega tipa močnostnega pretvornika v sistem omrežno priključene sončne elektrarne.

V drugem poglavju so predstavljeni fotonapetostni sistemi in njihove ključne komponente. Opisana je tudi zakonodaja in državne spodbude na področju proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov.

Tretje poglavje je usmerjeno v teoretično razlago in opis močnostnih pretvornikov. Pod drobnogled sta vzeti DC-DC in DC-AC pretvorbi, ki sta pomembni za razumevanje delovanja enostopenjskega DC-AC pretvornika, predstavljenega ob koncu poglavja.

V četrtem poglavju je podrobno opisana celotna izvedba prototipa enostopenjskega DC-AC pretvornika, ki vključuje načrtovanje posameznih elementov in komponent vezja, načrtovanje tiskanega vezja, izbiro ter programiranje mikroračunalniških komponent in izdelavo samega pretvornika. V sklopu poglavja so prikazani tudi rezultati laboratorijskega preizkušanja pretvornika in podane njihove obrazložitve.

Peto poglavje je posvečeno stroškovni analizi izdelave prototipa obravnavanega pretvornika in določanju njegove lastne ter prodajne cene v primeru proizvodnje v podjetju.

V šestem poglavju je pretvornik, za katerega je bila določena prodajna cena, uvrščen v sistem omrežno priključene mikro sončne elektrarne. Predstavljene so tudi osnove projektiranja takšnega sistema in rezultati tržne analize fotonapetostnih modulov. V končni fazi je ob uporabi različnih vrst modulov izvedena analiza časa vračanja vloženih sredstev v sončno elektrarno.

Sedmo poglavje zajema zaključek, v katerem so predstavljene končne ugotovitve, ki temeljijo na rezultatih posameznih poglavij. Daljši računski postopki, tabele, sheme in načrt tiskanega vezja ter sezname prikazanih slik in tabel se nahajajo v prilogi.

## 2 FOTONAPETOSTNI SISTEMI

Sonce je osrednje telo našega planetarnega sistema in nam najbližja zvezda. Približno  $\frac{3}{4}$  njegove mase predstavlja vodik, katerega jedra se zlivajo s protoni v helij, pri tem pa se sproščajo velike količine energije, ki gre v vesolje v obliki toplotnega sevanja in svetlobe [3]. Izsevana moč sonca je ocenjena na približno  $3,8 \cdot 10^{26}$  W. Zemlja letno od Sonca prejme okrog  $4 \cdot 10^{24}$  J energije, kar je nekaj tisočkrat več, kot znaša celotna letna poraba energije iz vseh primarnih virov. Sončna energija je čista, dostopna skoraj povsod na Zemlji in bo v neomejenih količinah na voljo še nekaj prihodnjih milijard let. Možno jo je izkoriščati s toplotnimi sistemi za ogrevanje vode, prostorov in objektov ali pa s fotonapetostnimi (ang. *photovoltaic*, v nadaljevanju PV) sistemi, ki služijo za neposredno pretvorbo sončnega sevanja v električno energijo. Proces fotonapetostne pretvorbe poteka v sončnih celicah. PV sistemi se v praksi pojavljajo kot samostojni objekti ali pa kot deli zgradbe, ki so običajno nameščeni na strehe in fasade [4].

Glede na način obratovanja delimo PV sisteme na:

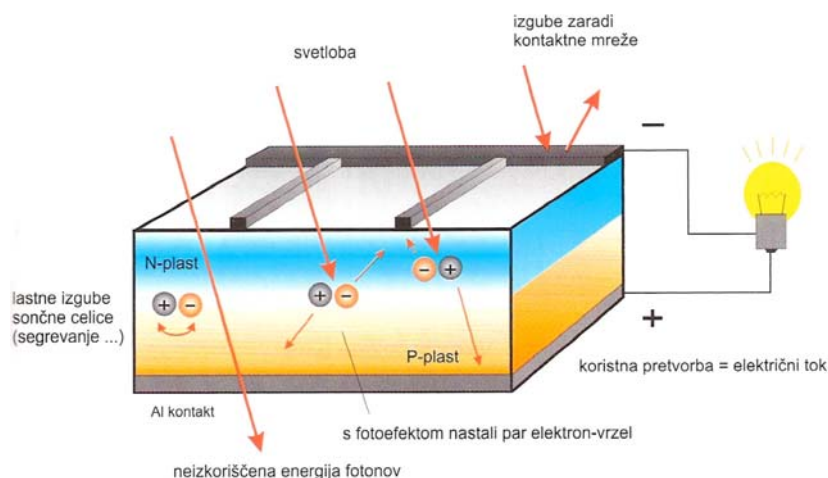
- otočne sisteme in
- omrežno priključene sisteme.

**Otočni sistemi** so rešitev za oskrbo z električno energijo v regijah, kjer ni možnosti priklopa na javno omrežje. Proizvedeno enosmerno električno energijo iz sistema sončnih celic je možno neposredno uporabljati za napajanje enosmernih porabnikov, ali jo preko razsmernika pretvoriti v izmenično. Višek proizvedene električne energije se shranjuje v akumulatorskih baterijah, od koder jo črpamo kadar ni dovolj sončnega sevanja. Akumulatorske baterije predstavljajo velik del stroškov otočnega PV sistema, hkrati pa imajo med vsemi elementi najkrajšo življenjsko dobo. Zaradi tega se uporabljajo regulatorji polnjenja, ki ščitijo baterije pred prenapolnjenjem in pred preglobokim praznjenjem.

**Omrežno priključeni sistemi** se gradijo na področjih, kjer so ugodni pogoji za priključitev na javno omrežje. Poleg PV modulov predstavlja ključno komponento v takšnem sistemu DC/AC pretvornik, ki enosmerno energijo sončnih celic pretvori v izmenični tok in napetost javnega elektroenergetskega omrežja (230 V, 50 Hz).

## 2.1 Sončne celice

Sončna celica je osnovni element, s katerim energijo svetlobe pretvarjamo v električno energijo. Najpogostejši osnovni material za izdelavo sončnih celic je silicij, uporabljajo pa se tudi drugi materiali. Zgradba in način delovanja sončne celice je prikazan na sliki 2.1. Vrhnja plast sončne celice, ki je izpostavljena svetlobi, je zelo tanka ( $< 1 \mu\text{m}$ ), saj mora svetloba doseči PN-spoj. Zaželeno je, da je površina sončne celice čim večja ter da se svetloba na površini celice ne odbija, saj to zmanjšuje izkoristek. Ko svetloba z dovolj veliko energijo v plasti PN izbije elektrone, nastajajo pari elektron-vrzel (fotoefekt). Pod vplivom električnega polja se elektroni pomikajo iz zaporne plasti v N-tip polprevodnika, vrzeli pa potujejo v nasprotno smer in se nabirajo v območju P-tipa na spodnji strani celice. Zaradi vedno večjega števila sproščenih elektronov in vrzeli iz zaporne plasti se v N-tipu pojavlja presežek negativnega naboja (elektroni), v P-tipu pa presežek pozitivnega naboja (vrzeli). Posledica tega je električna napetost med priključnima sponkama sončne celice [4].



Slika 2.1: Zgradba in način delovanja sončne celice [4]

### 2.1.1 Vrste sončnih celic

Danes obstaja na trgu veliko vrst sončnih celic, ki se razlikujejo po materialu, zgradbi, načinu izdelave in izkoristku. Slednji je odvisen od številnih dejavnikov, med katerimi je najpomembnejša širina spektra svetlobe, katere energijo celica še lahko pretvori v elektriko. Na izkoristek vplivajo tudi lastne izgube sončne celice, ki nastopajo predvsem zaradi kontaktne mreže, notranje upornosti celice in zaradi odboja sončnega sevanja na površini celice. Za praktično uporabo so najpomembnejše celice iz silicija, kadmijevega telurida (CdTe) in baker-indijevega selenida (CuInSe - CIS). Njihove značilnosti so prikazane v tabeli 2.1. Drugi materiali, kot so GaAs, GaInP in GaInAs se za izdelavo sončnih celic zelo redko uporabljajo. Takšne celice imajo zelo dober izkoristek, zaradi visoke cene pa je uporaba omejena skoraj izključno na vesoljsko tehniko [4].

Tabela 2.1: Značilnosti najpogosteje uporabljenih sončnih celic [4]

Material	Debelina	Izkoristek	Oblika/Barva
<b>Silicij</b>			
monokristalne sončne celice	0,3 mm	14-20 %	kvadratne oblike ali kvadratne z zaobljenimi vogali / temno modra, črna z AR plastjo, siva brez AR plasti
polikristalne sončne celice	0,3 mm	13-15 %	kvadratne oblike / modra z AR plastjo, srebrno siva brez AR plasti
EFG – sončne celice	0,28 mm	14 %	pravokotne ali kvadratne oblike / modra z AR plastjo

hibridne sončne celice (HIT)	0,2 mm	18 %	kvadratne oblike / temno modra do črna
tankoplastne kristalne sončne celice	0,13 mm	8 %	kvadratne oblike v obliki trakov / modra z AR prevleko
amorfne sončne celice	0,0001 mm + 3 mm substrat	10 %	oblika po izbiri / rdeče-modra, črna
<b>Drugi materiali</b>			
CIS/CIGS (baker-indijev selenid)	0,003 mm + 3 mm substrat	10 % (modul)	oblika po izbiri / črna
CdTe (kadmijev telurid)	0,008 mm + 3 mm substrat	9 % (modul)	oblika po izbiri / temno zelena, črna

## 2.2 Fotonapetostni moduli

PV modul je v osnovi električno zaporedna vezava enakih sončnih celic in predstavlja najmanjši, ob okvari še zamenljivi del fotonapetostnega polja oziroma sončnega fotonapetostnega generatorja. Običajno so moduli obdani z aluminijastim okvirjem ali z okvirjem iz kakšnega drugega materiala. Ustrezati morajo predpisanim standardom (SIST EN 61730-1, SIST EN 61730-1), ki določajo električne in tudi mehanske lastnosti modulov, kar zagotavlja njihovo dolgotrajno, zanesljivo in varno delovanje [4].

Vezava več sončnih celic v serijo (niz) da želimo napetost modula, katero lahko ob predpostavki, da so vse celice v nizu enake, izračunamo z naslednjo enačbo:

$$U = nU_i \quad (2.1)$$

kjer je:

$U$  - napetost PV modula (V)

$U_i$  - napetost  $i$ -te celice (V)

$n$  - število celic v modulu

Osnovne električne parametre modula navajajo proizvajalci v točki maksimalne moči (ang. *Maximum Power Point - MPP*) [4]:

- vršna moč  $P_{MPP}$  (Wp)
- napetost odprtih sponk  $U_{oc}$  (V)
- tok kratkega stika  $I_{sc}$  (A)
- napetost pri nazivni (vršni) moči  $U_{MPP}$  (V)
- tok pri nazivni moči  $I_{MPP}$  (A)

Podajajo pa se še številni drugi podatki, kot so temperaturni koeficienti v raznih obratovalnih stanjih, nazivna temperatura celice, najvišja napetost sistema, izkoristek modula, tolerance moči, idr.

V praksi se najpogosteje uporabljajo PV moduli iz kristalnih silicijevih celic. Tipične moči takšnih modulov segajo od nekaj W do 300 W, izkoristek pa je med 10 % in 13 % [4]. V večini primerov lahko delujejo v temperaturnem območju med -40 °C in +95 °C, vendar je pri zelo visokih temperaturah izkoristek manjši. Življenjska doba modulov z monokristalnimi celicami je več kot 25 let. Pri tem proizvajalci jamčijo doseganje 90 % nazivne moči modula po 20 letih delovanja in 80 % nazivne moči modula po 25 letih. Nekoliko slabši so polikristalni moduli, saj 90 % nazivne moči dosegajo po 10 letih in 80 % po 20 letih. Izbiro med monokristalnimi in polikristalnimi moduli pogojujeta predvsem razpoložljiv prostor in cena. Polikristalni se uporabljajo v primerih, kjer je na voljo več prostora, saj nudijo primerljive lastnosti monokristalnim za nižjo ceno. Kjer pa se zahteva čim večja izhodna moč pri čim manjši površini modulov se običajno namestijo monokristalni.

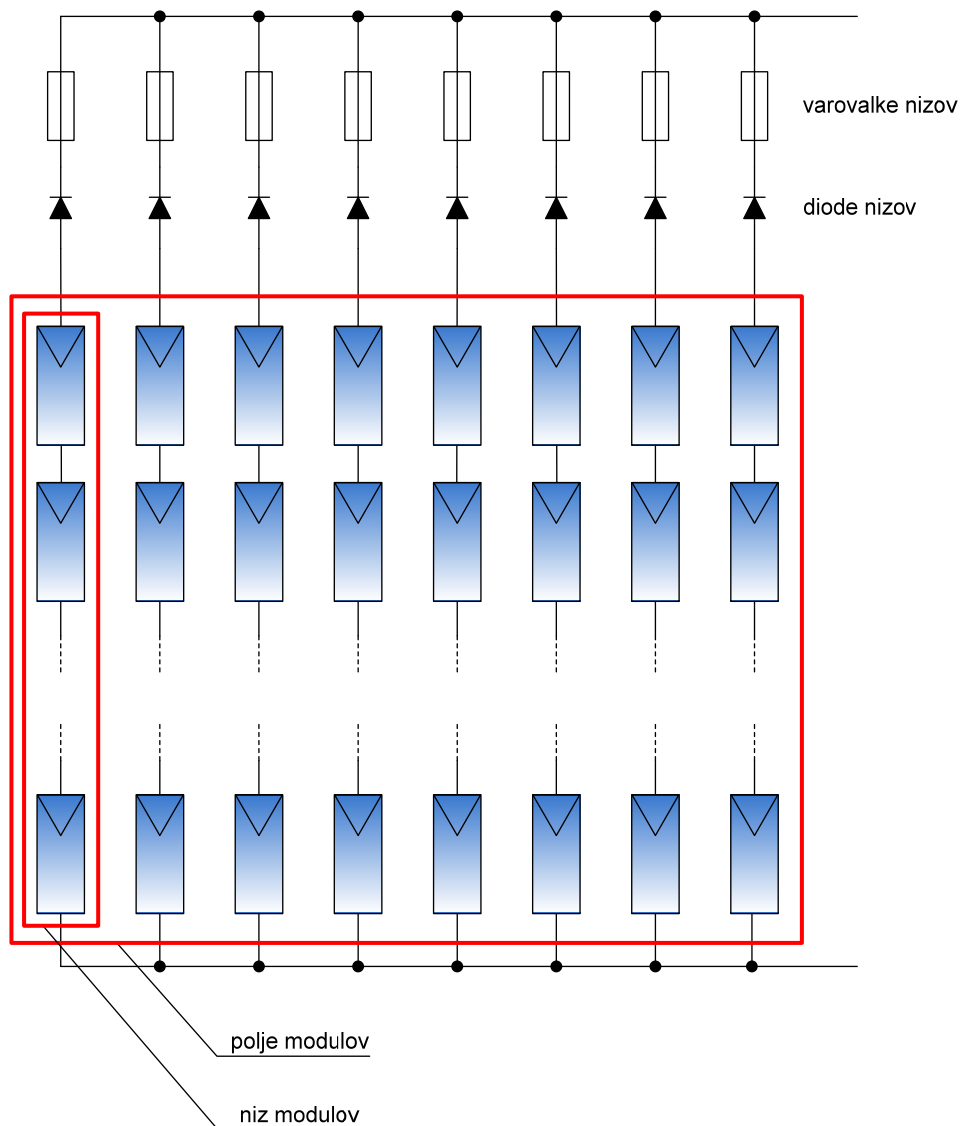
Prednosti PV modulov iz amorfne silicija predstavljajo zelo dobre lastnosti v pogojih slabše osvetljenosti in dobro izkoriščanje difuznega sevanja v primerjavi s kristalnimi moduli. Izkoristek amorfni modulov v prvih nekaj mesecih delovanja upada in se nato ustali na vrednosti med 6 % in 8 %. Nazivna moč takšnih modulov se podaja kot moč v ustaljenem stanju (po začetnem upadu), zato je pri načrtovanju sistemov treba upoštevati največjo moč na začetku delovanja. Uporaba silicijevih amorfni modulov je raznovrstna, saj zajema klasične module, kovinsko in fleksibilno strešno kritino, module za oblogo fasad objektov, pojavljajo pa se tudi pri napajanju prenosnih računalnikov, mobilnih telefonov, ipd. [4]

### 2.2.1 Sončni generator

Generator sončne elektrarne predstavlja polje PV modulov, ki je zgrajeno v obliki matrike, njegovi sestavni deli pa so [4]:

- moduli – najmanjši še zamenljivi deli polja oziroma sončnega generatorja,
- paneli – v en nosilni okvir nameščeni moduli, ki tvorijo mehansko celoto,
- nizi – zaporedno vezani moduli in
- podpolja – več vzporedno vezanih nizov.

Module se v polje povezuje na osnovi parametrov pretvornikov moči, najvišje dopustne napetosti sistema in dosege največje možne zanesljivosti delovanja. Tipičen način povezovanja sta zaporedno povezovanje modulov v niz in vzporedno združevanje nizov (sl. 2.2). Število modulov v nizu omejuje najvišja dopustna napetost sistema, število zaporedno vezanih nizov v polje pa določa moč razsmernika. Vsak niz bi naj imel lastno stikalo ali avtomatski odklopnik, ki omogoča izključitev posameznega dela PV sistema ob okvari, vzdrževanju ali popravilu. Zaradi možnosti poškodb ali preboja posameznih modulov, morajo biti nizi med seboj ločeni z diodami.



Slika 2.2: Povezava modulov v polje in uporaba zaščitnih elementov (diod in varovalk) [4]

### 2.3 Razsmerniki

Razsmernik je najpomembnejši del povezave PV sistema z javnim elektroenergetskim omrežjem. Njegova naloga je preoblikovati enosmerne vhodne veličine (napetost, tok) v izmenične izhodne veličine. Delovanje bo podrobneje opisano v poglavju 3.2. Razsmerniki, ki so namenjeni uporabi v omrežnih PV sistemih, morajo izpolnjevati vrsto strogih kriterijev s stališča motenj in vplivov na omrežje. Tok, napetost in frekvenca na izhodu razsmernika morajo biti skladni s parametri javnega elektroenergetskega omrežja.





Slika 2.3: Omrežni razsmerniki

Omrežni razsmerniki (sl. 2.3) običajno ne regulirajo izhodne napetosti, pač pa delujejo kot tokovni izvor. Napetost v takšnem primeru predstavlja neke vrste zaščitno funkcijo v primeru nenormalnega delovanja omrežja, ne pa parameter regulacije. Razsmerniki, ki so namenjeni uporabi v samostojnih (otočnih) PV sistemih, so enostavnejši, izhodni signal je pravokotne oblike, v nekaterih primerih filtriran z izhodnim nizkopasovnim filtrom [4].

Glede na namen uporabe, moč in nekatere druge lastnosti ločimo več vrst omrežnih razsmernikov. Trifazni samostojni razsmerniki se uporabljajo za velike moči, in sicer od 10 kW do 300 kW. Z uporabo povezave »master - slave« pa se lahko povezujejo v skupine do moči 1 MW ali več. Za manjše moči, do 10 kW, se običajno uporabljajo enofazni razsmerniki, pri katerih je prav tako na voljo možnost povezave »master – slave« [4]. Pri takšnem povezovanju glavni razsmernik določa, kdaj se bodo vklopljali ostali.

## 2.4 Zakonodaja in spodbude na področju E-OVE v Sloveniji

Obnovljivi viri energije (v nadaljevanju OVE) so pomemben vir primarne energije v Sloveniji, povečevanje njihovega deleža pa je ena od prioritet energetske in okoljske politike države. V skladu z Nacionalnim energetskega programom se izvajajo naslednje

oblike spodbujanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov (v nadaljevanju E-OVE) [5]:

- investicijske subvencije in oprostitve taks (neposredne subvencije, ugodni krediti s subvencioniranjem obrestne mere, olajšave pri plačevanju CO<sub>2</sub> takse) ter
- sistem zagotovljenih fiksnih odkupnih cen električne energije ali premij za odkup električne energije od elektrarn na OVE.

Osnovna zakonodaja na področju E-OVE v Sloveniji zajema: Energetski zakon, Uredbo o izdaji deklaracij za proizvodne naprave in potrdil o izvoru električne energije, Akt o načinu določanja deležev posameznih proizvodnih virov električne energije, Uredbo o podporah električni energiji, proizvedeni iz obnovljivih virov energije in Nacionalni energetski program.

#### 2.4.1 Energetski zakon

Energetski zakon (Uradni list RS, št. 27/07) [6] na področju E-OVE določa kvalificirane proizvajalce električne energije, ki v posameznih proizvodnih objektih proizvajajo električno energijo z nadpovprečno dejansko doseženim izkoristkom pri soproizvodnji toplote in električne energije ali izkoriščajo OVE na način, ki je skladen z varstvom okolja. Določa pa tudi način spodbujanja E-OVE, ki jo proizvedejo kvalificirani proizvajalci. Sistemski operater distribucijskega oziroma prenosnega omrežja je odgovoren za odkup celotne električne energije od vseh kvalificiranih proizvajalcev, ki so priključeni na njegovo omrežje po ceni, ki jo določi vlada. Kvalificirani proizvajalci električne energije pa lahko vso ali del proizvedene električne energije prodajo samostojno in so v tem primeru za to energijo upravičeni do plačila premije, ki jo prav tako določi vlada. Premijo proizvajalcu plača sistemski operater na katerega omrežje je kvalificirana elektrarna priključena. Nadalje energetski zakon določa izdajo potrdil o izvoru električne energije, ki jo proizvedejo kvalificirani proizvajalci in vsebino sistemskih obratovalnih navodil, ki vključuje tudi tehnične in druge pogoje za priključitev na omrežje ter določbe o stroških tehničnih ukrepov, ki so potrebni za priključitev novih proizvajalcev električne energije.

#### 2.4.2 Deklaracije za proizvodne naprave in potrdila o izvoru električne energije

Uredba o izdaji deklaracij za proizvodne naprave in potrdil o izvoru električne energije (Uradni list RS, št. 8/09) [7] določa pogoje in postopek za pridobitev deklaracije za proizvodne naprave, ki proizvajajo električno energijo iz obnovljivih virov in v soproizvodnji z visokim izkoristkom ter izdajanje potrdil o izvoru električne energije (v nadaljevanju PoI). Določa tudi vse postopke in operacije v zvezi z obema instrumentoma, kot so vodenje registrov, nadzor in transakcije.

Deklaracija za proizvodno napravo je odločba, ki jo izda Javna agencija Republike Slovenije za energijo proizvajalcu električne energije za posamezno napravo za proizvodnjo električne energije, s katero se potrjuje, da proizvodna naprava izpolnjuje pogoje, predpisane za soproizvodnjo z visokim izkoristkom ali proizvodnjo električne energije iz obnovljivih virov. Na proizvodni napravi morajo biti zagotovljene meritve in registracija vseh energijskih tokov, na podlagi katerih se določa količina električne energije, ki je upravičena do PoI [7].

PoI je javna listina, ki dokazuje, da je določena količina električne energije proizvedena v soproizvodnji z visokim izkoristkom ali iz obnovljivih virov energije. Izda se lahko le za električno energijo, ki je bila proizvedena med veljavnostjo deklaracije za proizvodno napravo [7]. Glavna značilnost potrdil je, da omogočajo pregledno dokazovanje porekla električne energije in preprečevanje morebitne večkratne prodaje okoljske vrednosti električne energije, ki izhaja iz tega porekla.

#### 2.4.3 Podpore električni energiji proizvedeni iz obnovljivih virov

Uredba o podporah električni energiji, proizvedeni iz obnovljivih virov (Uradni list RS, št. 37/09) določa [8]:

- vrste proizvodnih naprav za proizvodnjo električne energije iz obnovljivih virov (v nadaljevanju: proizvodne naprave OVE), ki lahko prejemajo podpore,
- razvrstitev proizvodnih naprav OVE v velikostne razrede,
- podrobnejšo opredelitev podpor,
- način določanja referenčnih stroškov proizvodnje električne energije iz OVE,

- način določanja cen za zagotovljeni odkup električne energije, proizvedene v proizvodnih napravah OVE,
- način določanja višine podpor, ki se izvajajo kot finančna pomoč za tekoče poslovanje proizvodnih naprav OVE,
- pogoje za pridobitev podpore,
- način pridobitve podpore in
- način prejemanja podpor.

Med proizvodne naprave OVE se štejejo energetske tehnologije, ki izkoriščajo energetski potencial vodotokov, vetrno, sončno in geotermalno energijo ter energijo pridobljeno iz biomase, bioplina, odlagališčnega plina, biološko razgradljivih odpadkov in drugih virov, ki ustrezajo opredelitvi obnovljivih virov energije iz Energetskega zakona. Glede na nazivno električno moč se proizvodne naprave OVE po tej uredbi delijo na naslednje velikostne razrede:

- 1) mikro: nazivne električne moči manjše od 50 kW,
- 2) male: nazivne električne moči manjše od 1 MW,
- 3) srednje: nazivne električne moči od 1 MW do vključno 10 MW,
- 4) velike: nazivne električne moči od 10 MW do vključno 125 MW in
- 5) proizvodne naprave OVE nazivne električne moči večje od 125 MW.

Podpore električni energiji iz proizvodnih naprav OVE se izvajajo v obliki zagotavljenega odkupa električne energije in finančne pomoči za tekoče poslovanje. Pri napravah z nazivno električno močjo do 5 MW obstaja možnost izbire med obema oblikama podpore, pri napravah z nazivno električno močjo od 5 MW do 125 MW pa je na voljo le finančna pomoč za tekoče poslovanje. V primeru zagotavljenega odkupa električne energije, center za podpore ne glede na ceno električne energije na trgu odkupi vso prevzeto neto proizvedeno električno energijo, za katero je proizvodna naprava OVE prejela potrdilo o izvoru, po zagotavljenih cenah električne energije. Finančna pomoč za tekoče poslovanje (obratovalna podpora) pa se dodeli neto proizvedeni električni energiji, za katero je prejeto potrdilo o izvoru in ki jo proizvajalci električne energije iz OVE prodajo sami na trgu ali jo porabijo kot lastni odjem, pod pogojem, da so stroški proizvodnje te energije višji od cene, ki jo je za to električno energijo mogoče doseči na trgu z električno energijo.

Za proizvodne naprave OVE, ki prejemajo podpore v obliki zagotovljenega odkupa proizvedene električne energije, veljajo cene za zagotovljeni odkup, navedene v tabeli 2.2. Višina obratovalnih podpor pa se določa kot razlika med referenčnimi stroški proizvodnje električne energije v posameznih proizvodnih napravah OVE in referenčno tržno ceno električne energije. Referenčni stroški proizvodnje električne energije temeljijo na objavljenih strokovnih podatkih o investicijskih in obratovalnih stroških za posamezne energetske tehnologije in velikosti proizvodnih naprav OVE, ekonomskih in finančnih parametrov vlaganja in obratovanja, cenah energentov ter drugih stroških, povezanih s proizvodnjo električne energije v Republiki Sloveniji. Višina obratovalnih podpor je prikazana v tabeli 2.2.

Tabela 2.2: Cene zagotovljenega odkupa električne energije in obratovalne podpore glede na uporabljeni OVE in velikostni razred proizvodne naprave [8]

Vrsta proizvodne naprave OVE glede na primarni vir energije	Velikostni razred	Cena zagotovljenega odkupa (EUR / MWh)	Obratovalna podpora (EUR / MWh)
hidroenergija	mikro (< 50 kW)	105,47	49,57
	mala (< 1 MW)	92,61	36,71
	srednja (do 5 MW)	82,34	23,84
	velika (do 125 MW)	/	18,07
vetrna energija	mikro (< 50 kW)	95,38	43,38
	mala (< 1 MW)		
	srednja (do 5 MW)		
	velika (do 125 MW)	/	30,84
sončna energija (na stavbah ali gradbenih konstrukcijah)	mikro (< 50 kW)	415,46	358,26
	mala (< 1 MW)	380,02	322,82
	srednja (do 5 MW)	315,36	256,21
	velika (do 125 MW)	/	215,71
sončna energija (samostojni objekt)	mikro (< 50 kW)	390,42	333,22
	mala (< 1 MW)	359,71	302,51
	srednja (do 5 MW)	289,98	230,83
	velika (do 125 MW)	/	204,22

geotermalna energija	mikro (< 50 kW)		1
	mala (< 1 MW)	152,47	92,67
	srednja (do 5 MW)		
	velika (do 125 MW)	/	1
lesna biomasa	mikro (< 50 kW)	1	1
	mala (< 1 MW)	224,35	165,20
	srednja (do 5 MW)	167,43	107,63
	velika (do 125 MW)	/	1
bioplín (iz biomase)	mikro (< 50 kW)	160,05	102,85
	mala (< 1 MW)	155,76	96,61
	srednja (do 5 MW)	140,77	80,97
	velika (do 125 MW)	/	/
odlagališni plín	mikro (< 50 kW)	99,33	39,53
	mala (< 1 MW)	67,47	7,67
	srednja (do 5 MW)	61,67	2,52
	velika (do 125 MW)	/	/
biološko razgradljivi odpadki	mikro (< 50 kW)	/	/
	mala (< 1 MW)	77,44	17,64
	srednja (do 5 MW)	74,34	14,54
	velika (do 125 MW)	/	/

<sup>1</sup> Določí se za vsak posamezen primer posebej

Do pridobitve podpor so upravičene nove in pretežno nove proizvodne naprave OVE, ki imajo veljavno deklaracijo za proizvodno napravo. Lastnik proizvodne naprave OVE mora Agenciji za energijo predložiti vlogo za dodelitev podpore, ta pa mu izda odločbo o dodelitvi podpore, ki predstavlja temelj za sklenitev pogodbe o zagotavljanju podpore.

### 3 PRETVORNIŠKI SISTEM

Odstopanja med obliko energije, ki jo ponuja izvor in obliko, ki jo zahteva breme so privedla do razvoja pretvorniških sistemov. Pretvorniki močnostne elektronike so vezja, ki napetost, tok ali frekvenco pretvorijo v neko drugo napetost, tok ali frekvenco [9]. Zaradi uporabe polprevodniških stikalnih elementov (tranzistorji, tiristorji, diode) jih imenujemo tudi stikalni pretvorniki. Za njih je značilna pretvorba z visokim izkoristkom in možnost regulacije izhodnih veličin, ki je običajno izvedena z uporabo pulzno-širinske modulacije (PWM).

Pretvorniški sistem močnostne elektronike je zasnovan na štirih osnovnih pretvorbah, ki jih označujemo kot AC-AC, AC-DC, DC-AC in DC-DC pretvorbe [9]. AC-AC pretvorniki omogočajo spreminjanje frekvence ali amplitude napetosti in toka izmeničnega izvora energije, AC-DC pretvorba pa se izvaja z uporabo usmerniških vezij, ki izmenično napetost in tok spremenijo v enosmerno. V nadaljevanju bo nekoliko podrobneje predstavljena še DC-DC in DC-AC pretvorba, ki predstavlja osnovo za izvedbo enostopenjskega DC-AC pretvornika.

#### 3.1 DC-DC pretvorniki

DC-DC pretvorniki se uporabljajo za napajanje enosmernih porabnikov, kot so osebni računalniki, medicinski aparati, telekomunikacijske naprave, polnilci baterij in pogoni enosmernih motorjev. Enosmerna napetost pridobljena z diodnim usmerjanjem in filtriranjem omrežne napetosti ali iz spremenljivih izvorov energije (fotonapetostne celice, gorivne celice,...) je običajno neregulirana. DC-DC pretvorniki pa omogočajo regulacijo enosmerne napetosti in tako porabnikom na izhodu zagotavljajo napetost, kakršna je potrebna za njihovo pravilno delovanje. Poleg omenjenega lahko opravljajo še funkcijo galvanske ločitve pri enosmernem napajanju elektronskih naprav.

Izhodna napetost DC-DC pretvornika se regulira z uporabo stikalnih manipulacij in je funkcija časa prevajanja stikala  $t_{\text{on}}$  in stikalne frekvence  $f_s$  (sl. 3.1) oziroma prevajalnega razmerja  $\Delta p$ , ki je definirano kot:

$$\Delta p = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} \quad (3.1)$$

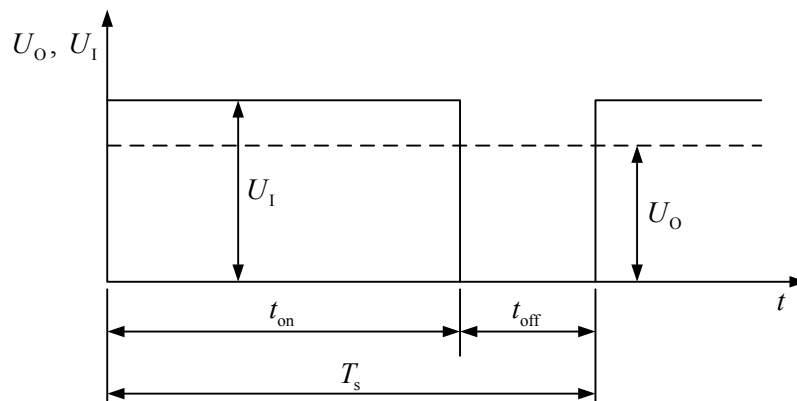
Glede na obliko izhodnega toka pretvornika ločimo dva načina delovanja [9, 10]:

- zvezno področje delovanja (trenutna vrednost izhodnega toka v periodi delovanja nikoli ne doseže vrednosti nič) in
- nezvezno področje delovanja (področje trganega toka, trenutna vrednost izhodnega toka v periodi delovanja doseže vrednost nič).

DC-DC pretvorniki so na osnovi funkcije, ki so jo sposobni izvesti, razdeljeni v štiri osnovne skupine [9]:

- pretvornik navzdol,
- pretvornik navzgor,
- pretvornik navzgor/navzdol in
- Čuk-ov pretvornik.

V nadaljevanju bosta predstavljena pretvornik navzdol in pretvornik navzgor, saj je razumevanje njunega delovanja potrebno za razlago delovanja enostopenjskega DC-AC pretvornika.

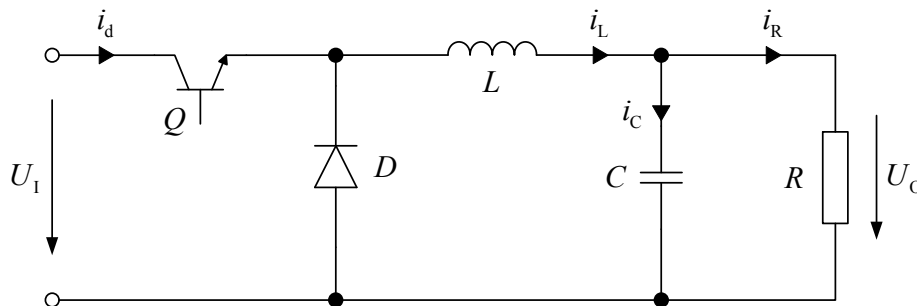


Slika 3.1: Časovni potek napetosti in prevajalno razmerje DC-DC pretvornika



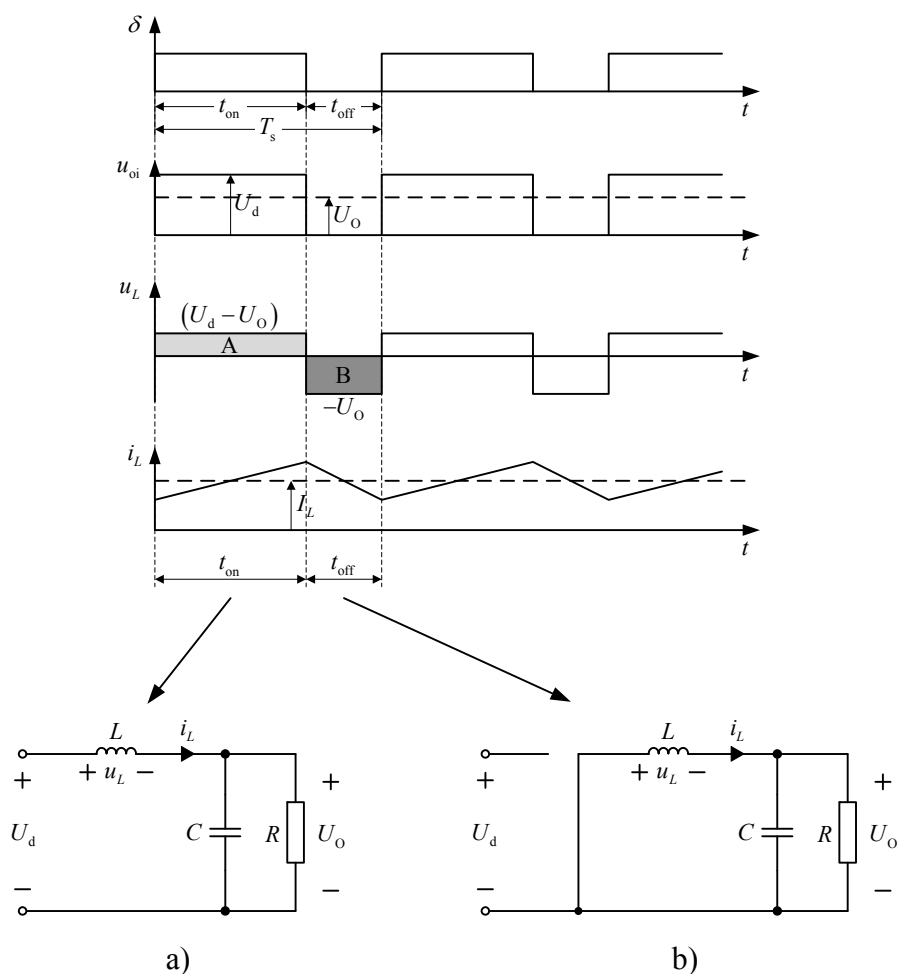
### 3.1.1 Pretvornik navzdol

Pretvornik navzdol (ang. *buck converter*) na svojem izhodu proizvaja nižjo srednjo vrednost napetosti, kot je priključena na vходу. Njegova praktična uporaba je povsod tam, kjer je prisotna potreba po enosmerni napetosti na bremenu, ki je nižja od enosmerne vhodne napajalne napetosti [9]. Na sliki 3.2 je prikazano osnovno vezje pretvornika navzdol.



Slika 3.2: Pretvornik navzdol

Na izhodno napetost  $U_o$  vplivamo s spreminjanjem prevajalnega razmerja  $\Delta p$ . Časovni potek stikalne funkcije  $\delta(t)$  in poteki napetosti ter tokov idealnega pretvornika navzdol v zveznem režimu delovanja so prikazani na sliki 3.3. Ko je stikalo sklenjeno (sl. 3.3 a)) se energija pretaka iz izvora proti bremenu. Ob predpostavki, da je dušilka idealna, tok skozi dušilko  $i_L$  linearno narašča. Tok teče skozi stikalo (tranzistor), dušilko, kondenzator in bremenski upor, dioda pa je v tem času zaporno polarizirana. Ko pa je stikalo razklenjeno (sl. 3.3 b)), se breme napaja z energijo, ki je ostala shranjena v dušilki in kondenzatorju.



Slika 3.3: Časovni potek stikalne funkcije, napetosti in tokov ter nadomestno vezje pretvornika navzdol pri a) vklopljenem stikalu in b) izklopljenem stikalu

Iz časovnega poteka toka skozi dušilko  $i_L$  v zveznem režimu delovanja pretvornika (sl. 3.3) je razvidno, da je srednja vrednost toka konstantna. Posledično je srednja vrednost napetosti na dušilki  $u_L$  enaka 0. Na osnovi te ugotovitve lahko določimo razmerje med izhodno  $U_O$  in vhodno  $U_d$  napetostjo:

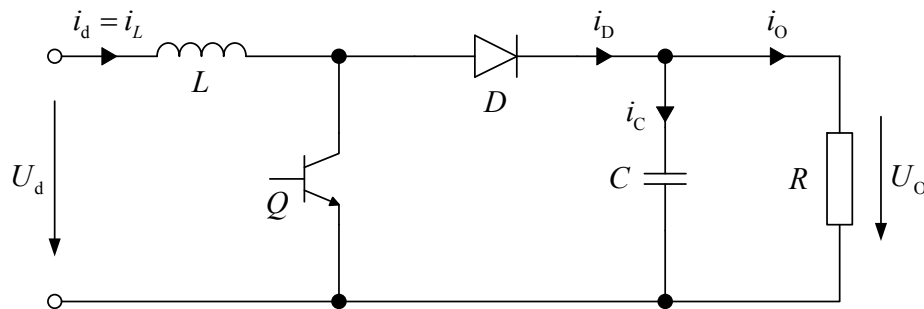
$$A=B$$

$$(U_d - U_O)t_{\text{on}} = U_O (T_s - t_{\text{on}})$$

$$\frac{U_O}{U_d} = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} = \Delta p \quad (3.2)$$

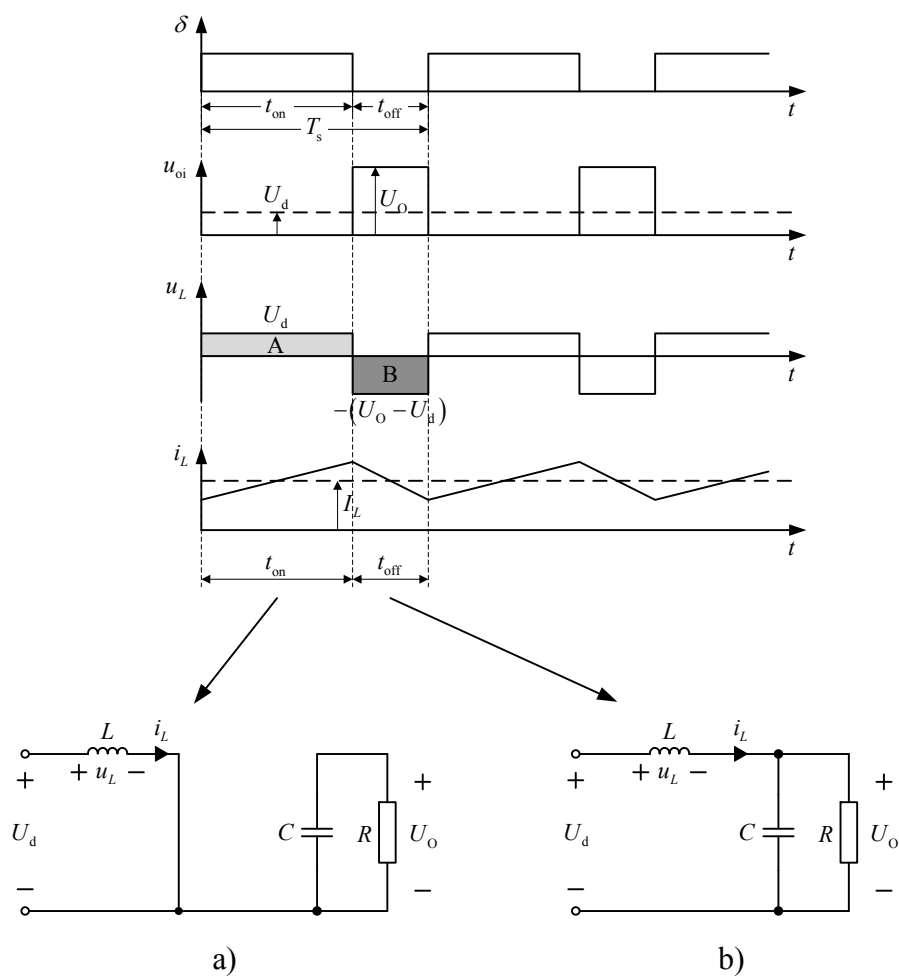
### 3.1.2 Pretvornik navzgor

Slika 3.4 prikazuje osnovno vezje pretvornika navzgor (ang. *boost converter*), ki na svojem izhodu generira višjo srednjo vrednost napetosti, kot je priključena na vходу. Uporablja se v enosmernih napajanjih, enosmernih motornih pogonih in pri proizvodnji električne energije iz obnovljivih virov.



Slika 3.4: Pretvornik navzgor

Na sliki 3.5 so prikazani časovni poteki napetosti in tokov idealnega pretvornika navzgor v zveznem področju delovanja. V časovnem intervalu  $t_{on}$ , ko je stikalo (tranzistor) vključeno (sl. 3.5 a)), je dioda zaporno polarizirana, izhod pa je ločen od vhodnega dela. V tem času se energija pretaka od izvora k dušilki. Ko pa je stikalo izključeno (sl. 3.5 b)), sprejema izhodna stopnja energijo iz izvora in še dodatno energijo, ki je bila shranjena v dušilki. Na takšen način se na izhodu doseže višja vrednost napetosti, kot je priključena na vходу.



Slika 3.5: Časovni potek stikalne funkcije, napetosti in tokov ter nadomestno vezje pretvornika navzgor pri a) vklopljenem stikalu in b) izklopljenem stikalu

Tudi pri pretvorniku navzgor lahko na osnovi časovnega poteka toka skozi dušilko  $i_L$  in napetosti na dušilki  $u_L$  v zveznem področju delovanja (sl. 3.5), določimo razmerje med izhodno  $U_o$  in vhodno  $U_d$  napetostjo:

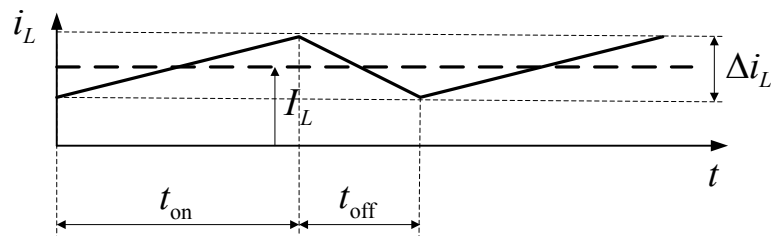
$$A=B$$

$$U_d t_{\text{on}} = (U_o - U_d)(T_s - t_{\text{on}})$$

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} = \frac{1}{1 - \Delta p} \quad (3.3)$$

O pretvorniku navzgor bo v nadaljevanju še veliko govora, zato moramo v tej točki omeniti še dva pomembna pojma, ki se velikokrat znajdetata na seznamu osnovnih zahtev pri načrtovanju pretvornikov. To sta valovitost toka skozi dušilko in valovitost izhodne napetosti.

Valovitost toka skozi dušilko  $\Delta i_L$  v bistvu pomeni nihanje okrog srednje vrednosti toka  $I_L$ , kar je prikazano v časovnem poteku na sliki 3.6. Zaradi preklapljanja stikala in posledične spremembe polaritete napetosti na dušilki  $u_L$ , tok ves čas narašča in pada. Pri načrtovanju dušilke je običajno izhodišče maksimalna dopustna valovitost toka, ki jo izrazimo glede na srednjo vrednost toka skozi dušilko, z razmerjem  $\frac{\Delta i_L}{I_L}$ .



Slika 3.6: Valovitost toka skozi dušilko

Ob predpostavki, da v času  $t_{on}$  tok skozi dušilko naraste za  $\Delta i_L$ , lahko zapišemo enačbo:

$$U_d = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{t_{on}} \quad (3.4)$$

iz katere izrazimo  $\Delta i_L$  in dobimo:

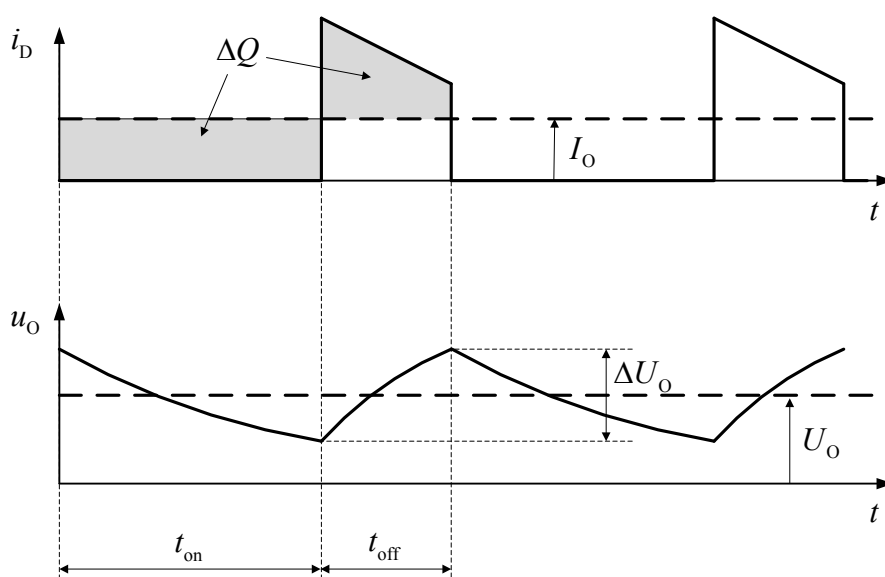
$$\Delta i_L = \frac{U_d t_{on}}{L} \quad (3.5)$$

Iz enačbe (3.5) je razvidno, da bo pri večji induktivnosti  $L$  valovitost toka  $\Delta i_L$  manjša. To nas privede do ugotovitve, da lahko z izbiro dušilke z dovolj veliko vrednostjo induktivnosti nihanje toka omejimo.

Drug pomemben pojem je valovitost izhodne napetosti  $\Delta U_o$ , ki predstavlja nihanje okrog srednje vrednosti izhodne napetosti. Razlog za valovitost napetosti je v stikalnem režimu

delovanja pretvornika, saj se v času  $t_{\text{on}}$  breme napaja iz kondenzatorja, ki se pri tem »prazni«, v času  $t_{\text{off}}$  pa se kondenzator »polni« in breme napaja iz izvora. Na osnovi časovnih potekov tokov in napetosti na sliki 3.7 lahko zapišemo enačbo za valovitost izhodne napetosti  $\Delta U_o$  kot spremembo naboja  $\Delta Q$ , ki priteče na plošče kondenzatorja v času  $t_{\text{on}}$ :

$$\Delta U_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o t_{\text{on}}}{C} = \frac{U_o t_{\text{on}}}{R C} \quad (3.6)$$



Slika 3.7: Časovni potek toka skozi diodo  $i_D$  in izhodne napetosti  $u_o$  za analizo valovitosti izhodne napetosti

Tako kot pri valovitosti toka, se tudi podatek o valovitosti napetosti običajno podaja glede na vrednost izhodne napetosti, in sicer kot razmerje  $\frac{\Delta U_o}{U_o}$ . Valovitost izhodne napetosti sodi med ključne podatke za določanje kapacitivnosti  $C$  pri načrtovanju pretvornika navzgor. S preoblikovanjem enačbe (3.6) lahko zapišemo izraz za minimalno potrebno kapacitivnost za doseg želene valovitosti napetosti:

$$C \geq \frac{t_{\text{on}}}{R(\Delta U_o / U_o)} \quad (3.7)$$

## 3.2 DC-AC pretvorniki (razsmerniki)

Pretvorniki enosmernih signalov v izmenične so znani tudi pod imenom razsmerniki (ang. *inverter*). Uporabljajo se pri izmeničnih motornih pogonih, induktivnem segrevanju, rezervnih napajalnikih, sistemih neprekinjenega napajanja (UPS), ... Vhod lahko napajamo iz akumulatorjev, gorivnih celic, sončnih celic ali drugih enosmernih virov.

Razsmernik pretvarja enosmerno napetost v simetrično izmenično napetost želene amplitude in frekvence. Izhodno napetost lahko spreminjamo s spreminjanjem vhodne enosmerne napetosti ali s spreminjanjem ojačenja razsmernika, ki je običajno izvedeno s pomočjo pulzno-širinske modulacije (PWM) [11]. Ojačenje razsmernika je definirano kot razmerje med izmenično izhodno napetostjo in enosmerno vhodno napetostjo.

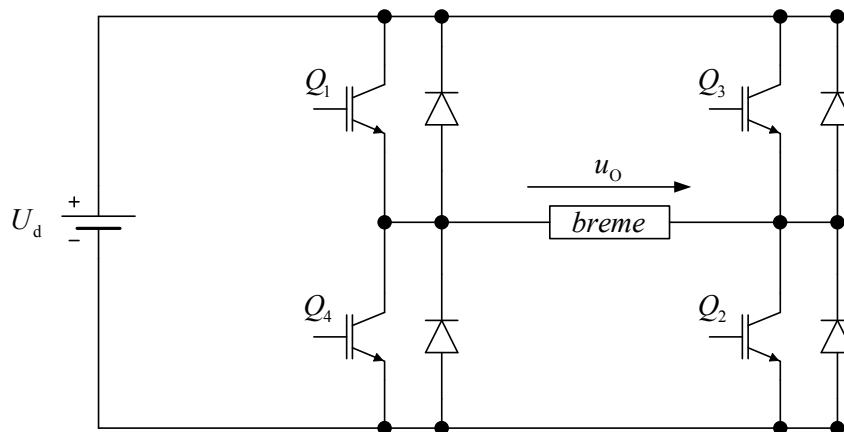
Izhodna napetost idealnega razsmernika naj bi bila sinusne oblike, vendar so dejanski izhodni signali razsmernikov nesinusni in zato vsebujejo določene višjeharmonske komponente. Za aplikacije nizke in srednje moči so napetosti pravokotne ali kvazi-pravokotne oblike še sprejemljive, medtem ko so za razsmernike visokih moči potrebni sinusni izhodni signali z nizkim popačenjem. Uporaba hitrih močnostnih polprevodnikov in naprednih stikalnih tehnik omogoča minimizacijo harmonske vsebine v izhodni napetosti [11].

V splošnem delimo razsmernike na enofazne razsmernike in trifazne razsmernike. Zgrajeni so iz krmiljenih polprevodniških stikal, ki so v večini primerov prožena z uporabo PWM. Glede na vrsto napajanja ločimo razsmernike [11]:

- s konstantnim napetostnim izvorom (ang. *voltage source inverter - VSI*)
- s konstantnim tokovnim izvorom (ang. *current source inverter - CSI*)
- s spremenljivim enosmernim povezovalnim krogom (ang. *variable DC link inverter*)

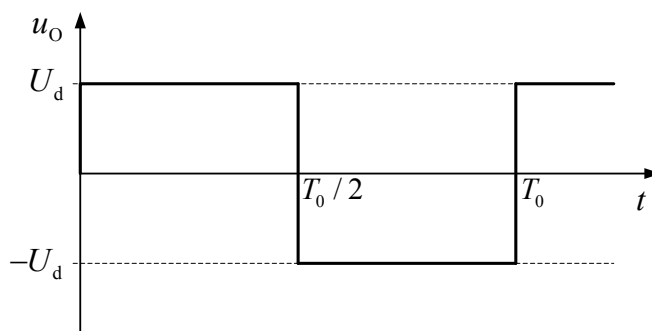
### 3.2.1 Enofazni razsmernik

Na sliki 3.8 je prikazan enofazni tranzistorski mostični razsmernik. Sestavljen je iz štirih stikal, ki so sestavljena iz kombinacije tranzistorja in diode. Takšna konfiguracija stikal omogoča dvosmerni pretok toka, kar je zahteva vseh ohmsko-induktivnih bremen [9].



Slika 3.8: Enofazni razsmernik

Časovni potek ene periode delovanja takšnega razsmernika za čisto ohmsko breme prikazuje slika 3.9. V prvi polovici periode sočasno prevajata tranzistorja  $Q_1$  in  $Q_2$ . V tem intervalu je na bremenu celotna vhodna napetost  $U_d$ . V drugi polovici periode, ko sočasno prevajata  $Q_3$  in  $Q_4$  pa napetost na bremenu spremeni predznak in ima vrednost  $-U_d$ . Za pravilno delovanje takšnega razsmernika je pomembno, da tranzistorja v isti veji ( $Q_1, Q_4$  ali  $Q_3, Q_2$ ) nikoli ne prevajata sočasno, saj bi bil s tem izvor enosmerne napetosti kratko sklenjen.

Slika 3.9: Časovni potek izhodne napetosti  $u_o$  enofaznega razsmernika pri čistem ohmskem bremenu

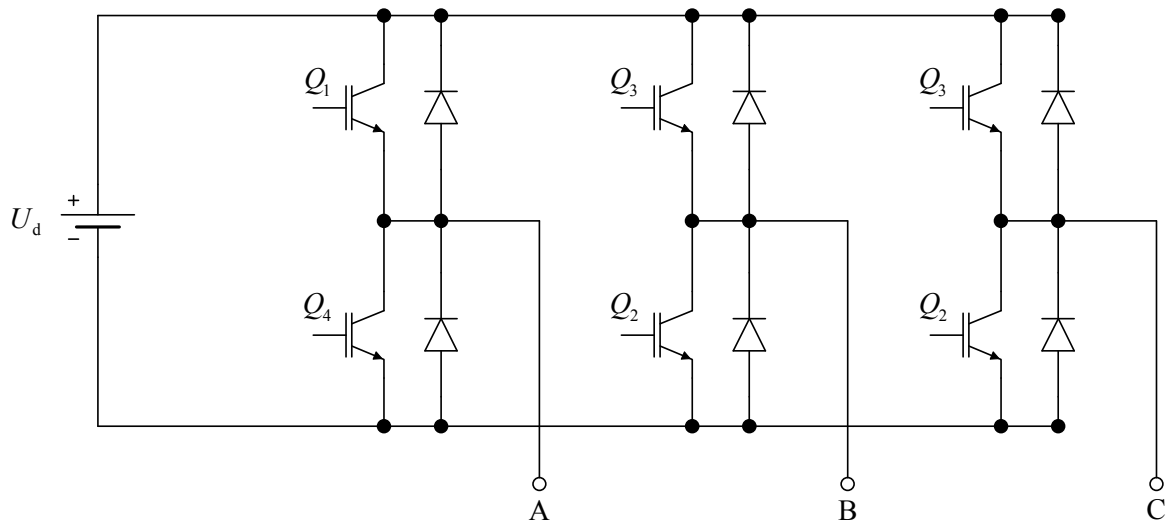
Če se poglobimo v vezje enofaznega mostičnega razsmernika (sl. 3.8) in predpostavimo ohmsko-induktivno breme na izhodu, opazimo, da je v bistvu sestavljen iz dveh



pretvornikov navzdol (sl. 3.2), ki sta prožena izmenično. Iz tega lahko sklepamo, da lahko takšen razsmernik na svojem izhodu proizvaja izmenično napetost z enako (idealni razsmernik) ali nižjo srednjo vrednostjo glede na velikost enosmerne napetosti na vhodu.

### 3.2.2 Trifazni razsmernik

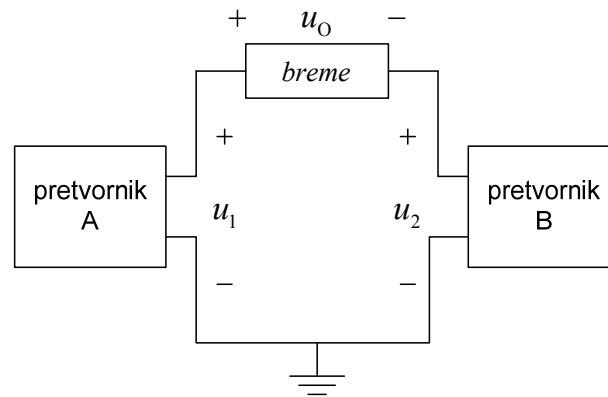
Na sliki 3.10 je prikazan trifazni tranzistorski razsmernik. Konfiguracija elementov je podobna kot pri enofaznem mostičnem razsmerniku (sl. 3.8), s tem da je dodana še ena veja dveh tranzistorjev in diod. Delovanja podrobneje ne bomo opisovali, saj so predmet obravnave tega diplomskega dela enofazni močnostni pretvorniki.



Slika 3.10: Trifazni razsmernik

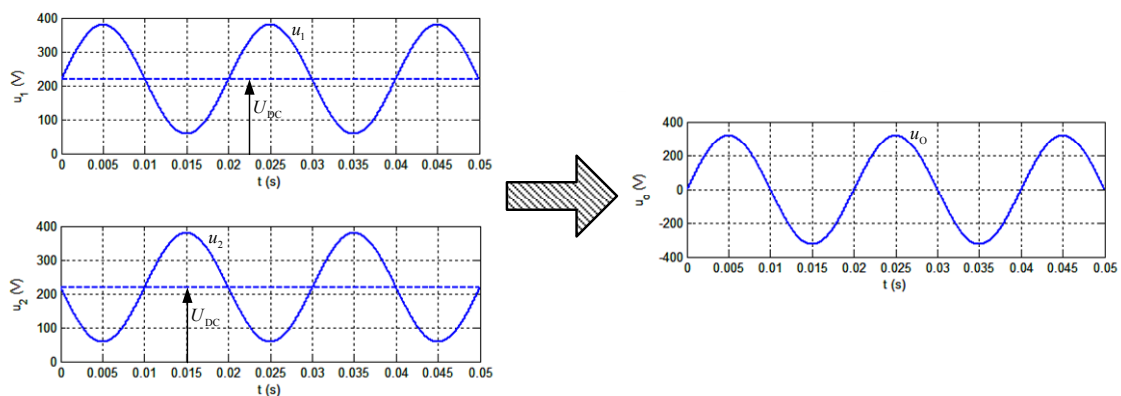
### 3.3 Enostopenjski DC-AC pretvornik

Enostopenjski DC-AC pretvornik (ang. *boost inverter*, v nadaljevanju BI) lahko na svojem izhodu proizvaja izmenično napetost z nižjo ali višjo efektivno vrednostjo glede na velikost enosmerne vhodne napetosti [1]. Sestavljen je iz dveh DC-DC pretvornikov navzgor med katera je priključeno breme (sl. 3.11).



Slika 3.11: Blokovna shema BI

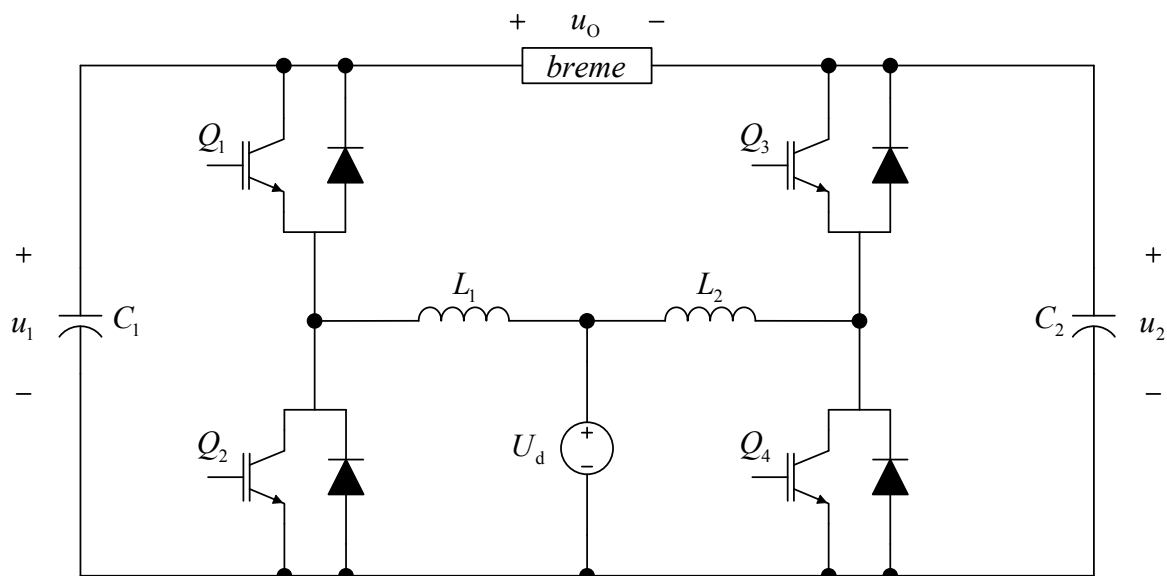
Sinusno pulzno modulirana pretvornika A in B na svojem izhodu proizvajata unipolarno napetost sinusne oblike, v kateri je prisotna enosmerna komponenta (sl. 3.12). Napetosti  $u_1$  in  $u_2$  morata biti med seboj premaknjeni za kot  $180^\circ$ , da se na bremenu doseže največja možna amplituda izmenične napetosti. Pomembno je tudi, da sta obe »veji« BI simetrični, saj bosta v tem primeru tudi enosmerni komponenti  $U_{DC}$  v napetostih  $u_1$  in  $u_2$  enako veliki, tako da se bosta medsebojno izničili in bo na izhodu pretvorniškega sistema čista izmenična napetost sinusne oblike  $u_0$ , brez prisotnosti enosmerne komponente.



Slika 3.12: Časovni poteki napetosti na izhodu pretvornika A in B ter izhodne napetosti BI

Osnovna topološka shema BI (sl. 3.13) je zasnovana na »mostični« vezavi dveh pretvornikov navzgor, ki morata omogočati pretok energije v obe smeri [1]. Slednje je izvedeno z uporabo dvosmernih stikal, ki so sestavljena iz tranzistorja in diode. Vhoda

obeh pretvornikov sta priključena na skupen izvor enosmerne napetosti  $U_d$ , na visokonapetostne izhodne sponke pa je priključeno breme. Zaradi zahteve po simetričnosti obeh »vej« BI morajo biti enaka vsa uporabljena stikala ( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ ) in oba kondenzatorja ( $C_1 = C_2$ ) ter dušilki ( $L_1 = L_2$ ).



Slika 3.13: Enostopenjski DC-AC pretvornik navzgor

Na osnovi enačbe (3.3) lahko izpeljemo enačbo za razmerje med izhodno  $U_o$  in vhodno  $U_d$  napetostjo BI v zveznem režimu delovanja. Ob predpostavki, da sta napetosti  $u_1$  in  $u_2$  medsebojno premaknjeni za  $180^\circ$ , lahko zapišemo [1]:

$$U_o = U_1 - U_2 = \frac{U_d}{1 - \Delta p} - \frac{U_d}{\Delta p} \quad (3.8)$$

in izrazimo razmerje  $\frac{U_o}{U_d}$ :

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{2\Delta p - 1}{\Delta p(1 - \Delta p)} \quad (3.9)$$

Iz (3.9) je razvidno, da je pri prevajalnem razmerju  $\Delta p = 0,5$  izhodna napetost  $u_o$  enaka nič, v primeru sinusnega nihanja prevajalnega razmerja okoli te točke pa na izhodu dobimo čisto izmenično napetost sinusne oblike.

## 4 PROJEKTIRANJE IN PREIZKUŠANJE PRETVORNIŠKEGA SISTEMA

Osrednji del diplomske naloge predstavlja projektiranje in preizkušanje pretvorniškega sistema. Osnovno vezje BI, ki je prikazano na sliki 3.13, zgleđa zelo enostavno, vendar se pri realizaciji lahko pojavijo številne težave, ki jih s teoretičnimi izračuni in modeliranjem ni mogoče predvideti. To so predvsem parazitne kapacitivnosti in induktivnosti, motnje ter vse lastnosti komponent vezja, ki odstopajo od idealnih. Upoštevati je potrebno tudi dejstvo, da je kvaliteta signalov in nasploh delovanje pretvornika močno odvisno od načrtovanja in izbire elementov ter njihove razporeditve. Realizacijo prototipa BI smo izvedli po naslednjih korakih:

- določitev projektnih zahtev,
- načrtovanje in izbira elementov,
- načrtovanje in izdelava tiskanega vezja
- ter preizkušanje pretvornika.

### 4.1 Projektne zahteve

V prvi fazi je bilo potrebno določiti projektne zahteve, ki so v nadaljevanju predstavljale izhodišče pri načrtovanju in izbiri elementov ter izdelavi pretvornika. Želeli smo izdelati prototip BI z naslednjimi tehničnimi podatki:

- moč pretvornika  $P = 1 \text{ kW}$
- enosmerna vhodna napetost  $U_d = 26 \div 50 \text{ V}$
- izmenična izhodna napetost  $U_o = 230 \text{ V}$
- stikalna frekvenca  $f_s = 25 \text{ kHz}$

- dvosmerni pretok energije
- simetričnost obeh vej BI
- uporaba digitalnega signalnega procesorja DSP TMS320F2812

Poleg naštetih pa seveda obstajajo še zahteve po kvalitetnih izhodnih parametrih, visokem izkoristku, veliki zanesljivosti delovanja in čim manjših dimenzijah ter masi pretvornika. Generiranje pulzno-širinskih signalov smo želeli izvesti z uporabo digitalnega signalnega procesorja, pri tem pa nas je v prvi vrsti zanimalo ali je mogoče zgolj z uporabo modulacije na izhodu pretvornika doseči čisti sinusni signal.

## 4.2 Načrtovanje elementov vezja

Načrtovanje in izbira elementov vezja je ključnega pomena za delovanje vsake električne kot tudi katerekoli druge naprave. Elemente, ki sestavljajo vezje BI v osnovi delimo na aktivne in pasivne. Med pasivne elemente štejemo kondenzatorje in dušilke, med aktivne pa izvore energije ter tranzistorje. Pri izbiri elementov moramo vedno upoštevati najslabše možne razmere, ki se lahko pojavijo v vezju. To pomeni, da jih moramo načrtovati na največji možen tok in napetost, pri tem pa je potrebno upoštevati tudi pojav tokovnih in napetostnih konic, ki lahko prav tako uničijo element. Na osnovi povedanega bi si lahko ustvarili predstavo, da je smiselno vse komponente vezja krepko predimenzionirati in se tako izogniti morebitnim okvaram in uničenju. To sicer drži, vendar je s stroškovnega vidika in s strani kvalitete signalov ter dimenzij naprave nesprejemljivo. Opisano ponazarja problem načrtovanja in izbire ustreznih elementov, pri čemer je ob uporabi rezultatov analitičnih metod in simulacij, dobrodošla tudi pomoč izkušenega načrtovalca vezij.

V nadaljevanju bo opisana izbira in ključni izračuni posameznih komponent BI. Pri tem bomo vezje BI razdelili na dve veji (sl. 3.11), od katerih vsaka predstavlja DC-DC pretvornik navzgor. Na podlagi zahteve o simetričnosti pretvorniške strukture bodo elementi določeni za eno vejo, uporabljeni tudi za drugo.

#### 4.2.1 Dušilka

Dušilka je pasivni element, ki je sposoben hraniti energijo. Sestavljena je iz tuljavnika, navitja in v določenih primerih tudi jedra. Navitje je običajno izvedeno z bakreno žico ustreznega preseka, ki je navita na tuljavnik. Gostota električnega toka v navitju pa se običajno giblje med 2 in 10 A/mm<sup>2</sup>. Izgube v navitju dušilke se pojavljajo kot posledica ohmske upornosti žice, efekta bližine (ang. proximity effect) in skin efekta. Slednji se pojavi kadar je dušilka izpostavljena delovanju pri visokih frekvencah (nekaj kHz do 1 MHz). Z namenom preprečitve tega pojava se za navitje uporabljajo žilni vodniki. Takšen vodnik je sestavljen iz večjega števila izoliranih žičk, ki so spletene v določen vzorec, tako da ima magnetno polje celotnega vodnika enak vpliv na vsako žičko in je tok v vodniku enakomerno porazdeljen.

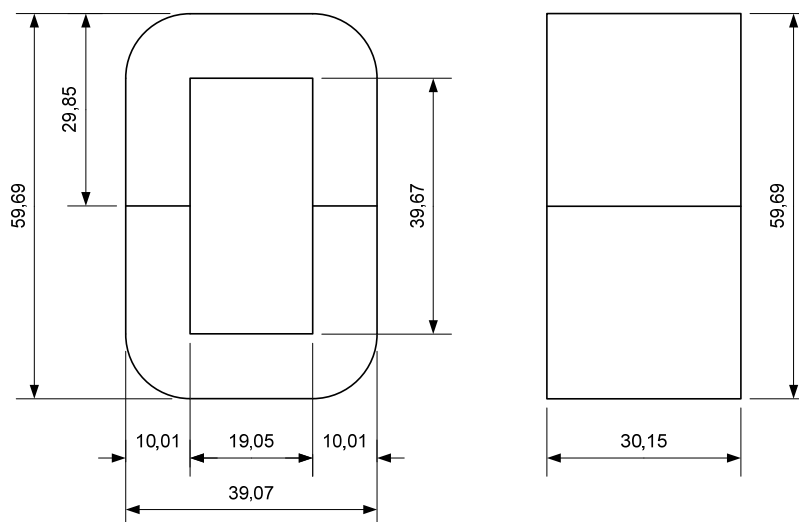
Dušilka je lahko zračna ali pa vsebuje jedro iz magnetnega materiala. Jedra se med seboj razlikujejo po obliki in materialu iz katerega so izdelana, običajno pa se uporabljajo v primerih, ko imamo zahteve po večji shranjeni energiji in induktivnosti, ki jih z zračno dušilko ne moremo doseči. Poleg izgub v navitju so pri dušilki prisotne tudi izgube v jedru. Delimo jih na vrtilčne in histerezne. Obojne so sorazmerne s frekvenco, tako da moramo biti pri izbiri jedra za uporabo v visokofrekvenčnih aplikacijah še posebej pozorni. Za zmanjšanje histereznih izgub izbiramo magnetne materiale s čim ožjo histerezno zanko pri predvideni frekvenci delovanja, saj površina zanke predstavlja histerezne izgube. Z namenom zmanjšanja vrtilčnih izgub pa za dušilke, ki bodo delovale v frekvenčnem področju med 20 kHz in 1MHz, uporabljamo materiale z visoko specifično upornostjo.

Pri izbiri dušilke je potrebno upoštevati naslednje zahteve:

- Zagotoviti je potrebno primerno vrednost induktivnosti.
- Dušilka mora shraniti vsaj toliko energije, kolikor je breme potrebuje v eni periodi.
- Z namenom prihranka prostora in denarja morajo biti fizične dimenzije dušilke čim manjše.
- Dušilka med delovanjem ne sme zaiti v področje nasičenja.

V našem primeru smo imeli na voljo dve enaki, industrijsko izdelani dušilki. Vsaka je bila sestavljena iz dveh parov C-jeder MH-205 A 11 (sl. 4.1), skozi katera je bilo speljano

navitje iz žilnega vodnika. Jedra so bila izdelana iz zlitine železa (97 %) in silicija (3%), ki se na trgu pojavlja pod imenom Microsil.



Slika 4.1: Uporabljeno C – jedro MH-205 A 11 (vse dimenzije so v mm)

Naša naloga je bila, da z analitičnim izračunom preverimo, ali so te dušilke sploh primerne za uporabo v naši aplikaciji. Najprej smo preverili ustreznost induktivnosti, ki jo pri načrtovanju močnostnih pretvornikov običajno določamo na osnovi maksimalne dopustne valovitosti toka. Z meritvijo smo ugotovili, da je induktivnost vsake dušilke  $L = 300 \mu\text{H}$ , kot maksimalno dopustno valovitost toka pa smo določili  $\frac{\Delta I_L}{I_{L\max}} = 0,15$ . Izračuna smo se

lotili po metodi, ki je uporabljena v [2]. Izvedli smo ga v dveh skrajnih točkah, in sicer pri minimalni vhodni napetosti  $U_{d,\min} = 26 \text{ V}$  ter maksimalni vhodni napetosti  $U_{d,\max} = 50 \text{ V}$ .

Najprej smo morali na osnovi projektnih zahtev določiti potrebno maksimalno vrednost napetosti  $U_{\max}$  na izhodu posamezne veje pretvornika in bremensko upornost  $R_b$ . Izhajali smo iz časovnih potekov na sliki 3.12. Upoštevali smo tudi zahtevo, da mora pretvornik ves čas delovati v »boost« režimu, kar pomeni, da minimalna trenutna vrednost napetosti posamezne veje nikoli ne sme biti nižja od vhodne napetosti  $U_d$ . Tako smo lahko zapisali

enačbi za  $U_{\max}$  (4.1) in za srednjo vrednost napetosti posamezne veje oziroma enosmerno komponento napetosti  $U_{\text{DC}}$  (4.2):

$$U_{\max} = 1,2U_d + U_{\text{Omax}} = 1,2U_d + \sqrt{2}U_o \quad (4.1)$$

$$U_{\text{DC}} = 1,2U_d + \frac{U_{\text{Omax}}}{2} = 1,2U_d + \frac{\sqrt{2}U_o}{2} \quad (4.2)$$

Iz projektnih zahtev smo morali izračunati še bremensko upornost  $R_b$  in stikalno periodo  $T_s$ :

$$R_b = \frac{U_o^2}{P} \quad (4.3)$$

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (4.4)$$

V naslednjem koraku smo s preoblikovanjem enačbe (3.3) določili maksimalno prevajalno razmerje  $\Delta p_{\max}$ :

$$\Delta p_{\max} = 1 - \frac{U_d}{U_{\max}} \quad (4.5)$$

Za izračun maksimalnega toka skozi dušilko  $I_{L\max}$  smo uporabili enačbo:

$$I_{L\max} = \frac{2\Delta p_{\max} - G'_m (1 - \Delta p_{\max}) U_d}{(1 - \Delta p_{\max})^2} \frac{U_d}{R_b} \quad (4.6)$$

, kjer je  $G'_m$  neke vrste napetostno ojačanje, ki smo ga določili s pomočjo izraza (4.7).

$$G'_m = \frac{2(U_{\text{DC}} - U_d)}{U_d} \quad (4.7)$$

V enačbo (3.5) smo vpeljali  $I_{L\max}$  in v končni fazi izračunali razmerje  $\frac{\Delta I_L}{I_{L\max}}$  kot:

$$\frac{\Delta I_L}{I_{L\max}} = \frac{U_d \Delta p_{\max} T_s}{I_{L\max} L} \quad (4.8)$$



Kot rezultat smo pri vhodni napetosti  $U_{d,\min} = 26 \text{ V}$  dobili relativno valovitost toka skozi

dušilko  $\left(\frac{\Delta I_L}{I_{L\max}}\right)_{\min} = 0,0382$  in pri  $U_{d,\max} = 50 \text{ V}$  relativno valovitost toka

$\left(\frac{\Delta I_L}{I_{L\max}}\right)_{\max} = 0,1232$ . Iz tega lahko zaključimo, da je vrednost induktivnosti izbrane dušilke

primerna za izpolnitev zastavljenega pogoja o maksimalni dopustni valovitosti toka. Celoten izračun je podrobno prikazan v prilogi 9.1.

V naslednjem koraku je bilo potrebno preveriti ali lahko izbrana dušilka v času, ko je stikalo sklenjeno ( $t_{\text{on}}$ ), shrani toliko energije kot je potrebuje breme v eni stikalni periodi  $T_s$ . Energijo  $W_b$ , ki jo potrebuje breme ( $P = 1000 \text{ W}$ ) v času  $40 \mu\text{s}$  smo izračunali po enačbi:

$$W_b = PT_s = 1000 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 40 \text{ mJ} \quad (4.9)$$

Iz tega smo ugotovili, da mora dušilka v času  $t_{\text{on}}$ , shraniti najmanj 40 mJ energije, da jo lahko označimo kot ustrezno za uporabo v naši aplikaciji.

Energijo, shranjeno v dušilki, je mogoče izraziti z volumskim integralom [9]:

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dV \quad (4.10)$$

kjer je:

$W_m$  - magnetna energija shranjena v dušilki

$\vec{B}$  - gostota magnetnega pretoka

$\vec{H}$  - magnetna poljska jakost

$V$  - volumen

pri katerem pa mora volumen, čez katerega integriramo volumski integral, vsebovati tako volumen jedra kot volumen zračne reže. Ker je magnetna gostota  $\vec{B}$  enaka za obe področji nezvezne permeabilnosti, lahko izrazimo magnetno energijo  $W_m$  v dušilki kot vsoto energij shranjenih v jedru in reži:

$$W_m = W_c + W_g = \frac{|\vec{B}|^2 V_c}{2\mu_0\mu_r} + \frac{|\vec{B}|^2 V_g}{2\mu_0} = \frac{|\vec{B}|^2 Al_c}{2\mu_0\mu_r} + \frac{|\vec{B}|^2 Ag}{2\mu_0} \quad (4.11)$$

kjer je:

$W_c$  - magnetna energija shranjena v jedru

$W_g$  - magnetna energija shranjena v zračni reži

$V_c$  - volumen jedra

$V_g$  - volumen zračne reže

$A$  - presek jedra

$l_c$  - povprečna dolžina magnetnih silnic

$g$  - dolžina zračne reže

$\mu_0$  - permeabilnost praznega prostora

$\mu_r$  - relativna permeabilnost

Če izenačimo energijo shranjeno v jedru  $W_c$  in energijo shranjeno v zračni reži  $W_g$  pridemo do izraza (4.12) s katerim lahko ugotovimo, da je večji del energije shranjen v zračni reži, energija v jedru pa je zanemarljiva. Iz kataloških podatkov jedra dušilke smo razbrali, da je relativna permeabilnost jedra  $\mu_r \approx 3000$ , srednja dolžina magnetnih silnic  $l_c \approx 149$  mm, zračno režo pa smo izmerili in znaša  $g = 1,55$  mm. Vse omenjene podatke smo vnesli v izraz (4.12), s čemer smo potrdili teoretično predpostavko, da lahko energijo shranjeno v jedru zanemarimo in upoštevamo samo tisto, ki je shranjena v zračni reži.

$$g \gg \frac{l_c}{\mu_r} \Rightarrow 1,55 \gg \frac{149}{3000} \Rightarrow 1,55 \gg 0,0497 \quad (4.12)$$

Za izračun shranjene energije v dušilki potrebujemo še podatek o gostoti magnetnega pretoka. Proizvajalec C-jeder MH-205 A 11 iz Microsil-a trdi, da je gostota zasičenja dosežena pri  $B_{\max} = 1,6$  T. Velja pravilo, da se pri izračunih nikoli ne uporablja maksimalna vrednost gostote magnetnega pretoka, temveč se upošteva še neka rezerva, tako da se običajno računa z  $0,75B_{\max}$ , ki je v našem primeru znašala 1,2 T. Po enačbi za izračun energije shranjene v zračni reži (4.13) smo izračunali energijo, ki jo je naša dušilka sposobna shraniti.

$$W_m \approx W_g = \frac{|\vec{B}|^2 Ag}{2\mu_0} = \frac{1,2^2 \cdot 30,15 \cdot 10,01 \cdot 1,55 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 0,268 \text{ J} = 268 \text{ mJ} \quad (4.13)$$

Ugotovili smo, da izračunana vrednost 268 mJ celo presega naše zahteve po energiji, ki jo mora shraniti dušilka.

Kot zadnjo zahtevo pri izbiri dušilke smo navedli še, da med delovanjem ne sme zaiti v področje nasičenja. Glede na dejstvo, da ima izbran material pravokotno histerezno zanko, in da se gostota zasičenja doseže šele pri  $B_{\max} = 1,6 \text{ T}$ , lahko trdimo, da je dušilka tudi iz tega vidika ustrezna za uporabo v naši aplikaciji.

#### 4.2.2 Kondenzator

Tudi kondenzator je pasivni element in je sposoben hraniti energijo. Kakor je že bilo omenjeno, se pri pretvorniku navzgor v času  $t_{\text{on}}$  breme napaja izključno iz kondenzatorja. Pri tem se kondenzator energijsko prazni, napetost na njem pa pada in doseže minimalno vrednost v trenutku preklopa stikala. V času  $t_{\text{off}}$  se breme in kondenzator preko diode napajata z energijo iz izvora in energijo, ki je bila v času  $t_{\text{on}}$  shranjena v dušilko. V tem času napetost na kondenzatorju narašča do maksimalne vrednosti, ki jo doseže v trenutku preklopa stikala. Napetost na kondenzatorju torej ves čas niha, amplituda nihanja pa je odvisna od kapacitivnosti kondenzatorja.

Potrebno kapacitivnost za izdelavo BI smo določili na osnovi želene valovitosti izhodne napetosti  $\Delta U$ , ki smo jo izbrali glede na amplitudo izhodne napetosti  $\hat{U}_o$ . Določili smo razmerje  $\frac{\Delta U}{\hat{U}_o} = 0,015$  in po enačbi (4.14) izračunali kapacitivnost.

$$C = \frac{\Delta p T_s}{(\Delta U / \hat{U}_o) R_b} \quad (4.14)$$

Izračun smo izvedli pri minimalni vhodni napetosti  $U_{d,\min} = 26 \text{ V}$  in pri maksimalni vhodni napetosti  $U_{d,\max} = 50 \text{ V}$ . Za določitev kapacitivnosti smo upoštevali največjo izračunano

vrednost in izbrali  $C = 50 \mu\text{F}$ , ki zagotavlja želeno valovitost napetosti v obeh primerih. Podrobnejši prikaz izračuna je v prilogi 9.2.

Valovitost izhodne napetosti pa ni edini kriterij pri izbiri kondenzatorjev. Pomembno je, da slednji izpolnjujejo tudi napetostne in tokovne zahteve. Maksimalna napetost, ki se lahko v našem vezju pojavi na kondenzatorju pri normalnih obratovalnih pogojih znaša približno 400 V. Temu je potrebno prišteti še neko vrednost kot rezervo v raznih nepredvidljivih obratovalnih stanjih in dobimo napetost na katero moramo dimenzionirati kondenzatorje.

V kataloških podatkih večine kondenzatorjev pa najdemo tudi podatek o maksimalnem toku, s katerim lahko polnimo kondenzator. Ta je za nas izrednega pomena, saj je čas  $t_{\text{off}}$  v katerem polnimo kondenzator običajno zelo kratek in lahko se pojavijo velike tokovne konice. Če izvedemo teoretični izračun efektivne vrednosti izhodnega toka  $I_o$  po enačbi (4.15) ugotovimo, da v našem primeru zanaša 4,35 A. Če pri tem upoštevamo še morebitne tokovne konice, pridemo na še višjo vrednost, ki jo moramo uporabiti pri tokovnem dimenzioniranju kondenzatorjev.

$$I_o = \frac{P}{U_o} = \frac{1000}{230} = 4,35 \text{ A} \quad (4.15)$$

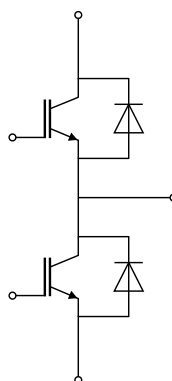
Na osnovi opisanih zahtev smo izbrali polipropilenske folijske kondenzatorje Vishay MKP 338 4 X2, ki zdržijo enosmerno napetost 630 V. Zaradi razmeroma visokih pričakovanih tokov smo se odločili, da bomo vzporedno vezali 5 kondenzatorjev s kapacitivnostjo  $10 \mu\text{F}$  in s tem omogočili porazdelitev toka. Tako smo na koncu dosegli potrebno kapacitivnost  $C = 50 \mu\text{F}$  in izpolnili napetostne ter tokovne zahteve.

### 4.2.3 Stikalo

Kot stikalni element smo uporabili tranzistor. Potrebovali smo takšnega, ki je sposoben preklapljati napetost 400 V pri toku 20 A, s stikalno frekvenco 25 kHz. Ob omenjenih zahtevah je bilo potrebno upoštevati še nekaj rezerve, ki je pri izdelavi prototipov vselej dobrodošla. Tako smo še dodatno zaostri kriterije v zvezi z napetostjo in tokom.

Na osnovi opisanih zahtev smo se odločili za uporabo IGBT tranzistorja (ang. Insulated Gate Bipolar Transistor), ki je neke vrste hibrid med bipolarnim in MOSFET tranzistorjem,

saj združuje njune dobre lastnosti. Bipolarni tranzistor za uporabo v naši aplikaciji ni primeren zaradi predolgh izklopnih časov, poleg tega pa so naše zahteve postavljene previsoko glede na področje uporabe bipolarnih tranzistorjev. MOSFET tranzistor bi s stališča zahtevanih napetosti, tokov in stikalne frekvence sicer bil sprejemljiv, vendar se pri MOSFET-ih z zapornimi napetostmi višjimi od 100 V pojavijo razmeroma velike prevodne izgube. Tako smo izbrali IGBT tranzistor SEMIKRON SK 45 GB 063 v ohišju SEMITOP<sup>®</sup>2, znotraj katerega sta v bistvu 2 stikalna elementa, ki sta povezana kakor je prikazano na sliki 4.2. Takšna vezava tranzistorjev omogoča izpolnitev projektne zahteve v zvezi z dvosmernim pretokom energije.



Slika 4.2: Vezava dveh IGBT tranzistorjev znotraj ohišja SEMITOP<sup>®</sup>2

Izbran tranzistor je sposoben preklapljati pri napetosti do 600 V in toku 45 A. Omenjen podatek o maksimalnem dopustnem toku je podan pri temperaturi  $T = 25\text{ °C}$ , pri kateri pa tranzistor v močnostnih pretvornikih le redko deluje. Potrebno je bilo preveriti še karakteristike pri višjih temperaturah. Iz kataloških podatkov smo razbrali, da je naš IGBT tudi pri temperaturi  $T = 80\text{ °C}$  še vedno sposoben preklapljati in prevajati tok 30 A, kar pa vsekakor dosega in celo presega naše zahteve.

Ker noben realni tranzistor ni sposoben preklopiti v trenutku, sta zelo pomembna podatka tudi njegov vklopni  $t_{(ON)}$  in izklopni čas  $t_{(OFF)}$ , ki opisujeta trajanje prehodnega pojava pri vklopu in izklopu. Za naš tranzistor znašata  $t_{(ON)} = 45\text{ ns}$  in  $t_{(OFF)} = 250\text{ ns}$ , kar skupaj predstavlja le 0,74 % celotne stikalne periode  $T_s$ . Tako lahko potrdimo, da je izbran IGBT ustrezen za uporabo v naši aplikaciji, saj izpolnjuje vse zastavljene kriterije.

#### 4.2.4 Prožilna stopnja

Prožilna stopnja ali IGBT driver služi kot vmesno prilagoditveno vezje. Njegovi glavni nalogi sta ojačitev PWM signala na nivo, ki je potreben za proženje tranzistorjev ter galvanska ločitev signalnega in močnostnega dela.

V našem primeru smo za generiranje PWM signala uporabili digitalni signalni procesor (v nadaljevanju DSP), ki ga je z namenom zaščite potrebno galvansko ločiti od močnostnega dela pretvornika, prav tako pa od vseh preostalih delov vezja, ki delujejo na višji napetosti kot 3,3 V. Ločitev je poleg zaščite DSP-ja potrebna tudi zaradi motenj, ki jih lahko v vezje vnašajo digitalni signali in naprave s procesorske karte. Zaradi omenjenega je v našem primeru eden izmed ključnih elementov prožilne stopnje optocoupler HCPL-3120. Ta izvede galvansko ločitev z uporabo dveh GaAsP svetlečih diod, preko katerih se signal optično prenaša iz signalnega v močnostni del pretvornika, brez fizičnega kontakta.

Vse uporabljene elektronske naprave v vezju BI za napajane zahtevajo napetost 5 V, ki pa je prenizka za proženje uporabljenih IGBT tranzistorjev. Za rešitev tega problema smo v prožilno stopnjo vključili DC-DC pretvornik NMA0515D, ki napetost 5 V dvigne na 15 V, kakršna je potrebna za krmiljenje izhodnega dela prožilne stopnje.

Poleg omenjenega smo pri načrtovanju prožilne stopnje in izbiri njenih komponent ves čas težili k temu, da bo tranzistor hitro in pravilno reagiral na krmilni signal.

### 4.3 Mikroračunalniške komponente in digitalni signalni procesor

Modulacijo in zaščitne funkcije BI smo izvedli z uporabo DSP-ja, ki je bil v našem primeru integriran na procesorsko karto eZdsp TMS320F2812. V bistvu gre za razvojno orodje, ki temelji na DSP s celoštevilsko aritmetiko (ang. fixed-point processor) in je v prvi vrsti namenjeno digitalni regulaciji motorjev ter gibanja in za uporabo v vlogi mikrokrmilnika.

Nastavitev krmilnih registrov in sestavo uporabniškega programa smo izvedli v programskem okolju Code Composer Studio v3.1, ki podpira programski jezik C. Ob

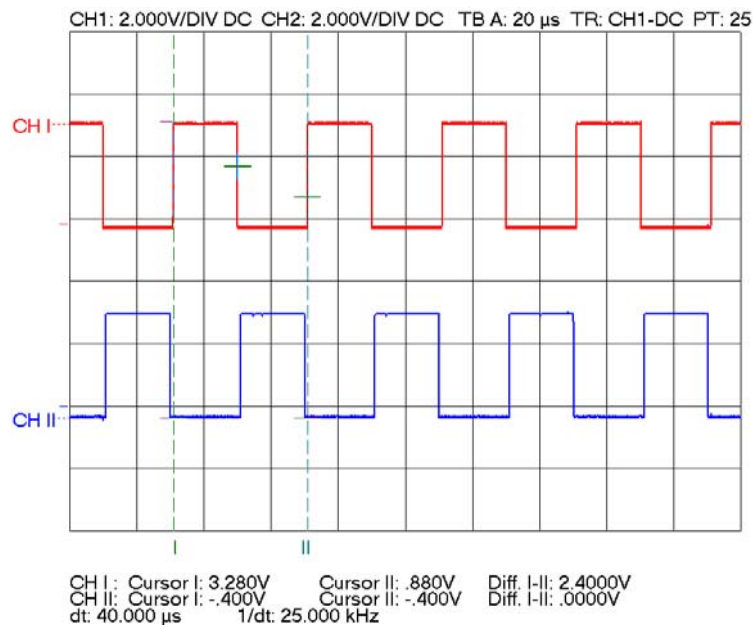
programiranju smo delovanje DSP-ja sproti preizkušali z meritvami in opazovanjem izhodnega PWM signala na osciloskopu.

Z nastavitvijo registrov smo določili način štetja časovnika, izbrali izhode DSP-ja na katerih želimo generirati PWM signal ter določili pravila za primerjavo ter medsebojno odvisnost izhodnih signalov. Ker je bilo potrebno zagotoviti, da tranzistorja v isti veji pretvornika nikoli ne prevajata hkrati, smo med PWM signale vnesli mrtve čase. Intervale mrtvih časov smo določili ob upoštevanju vklopnega  $t_{(ON)}$  in izklopnega  $t_{(OFF)}$  časa tranzistorjev ter zakasnitve  $t_{(PR.ST.)}$ , ki se pojavi ob prehodu signala skozi prožilno stopnjo. Vklopni in izklopni čas tranzistorjev smo razbrali iz kataloških podatkov, zakasnitev prožilne stopnje pa smo morali ugotoviti z meritvijo. Na en kanal osciloskopa smo pripeljali PWM signal neposredno iz izhoda DSP-ja, na drugega pa ojačan signal za proženje tranzistorjev in ju medsebojno primerjali. Odčitali smo, da znaša zakasnitev  $t_{(PR.ST.)} = 500$  ns in je predvsem posledica uporabe optocouplera. Tako smo določili skupno zakasnitev (4.16) in na podlagi tega rezultata tudi potreben mrtvi čas med preklapljanjem tranzistorjev v isti veji.

$$t_{(ON)} + t_{(OFF)} + t_{(PR.ST.)} = 45 \cdot 10^{-9} + 250 \cdot 10^{-9} + 500 \cdot 10^{-9} = 795 \text{ ns} \quad (4.16)$$

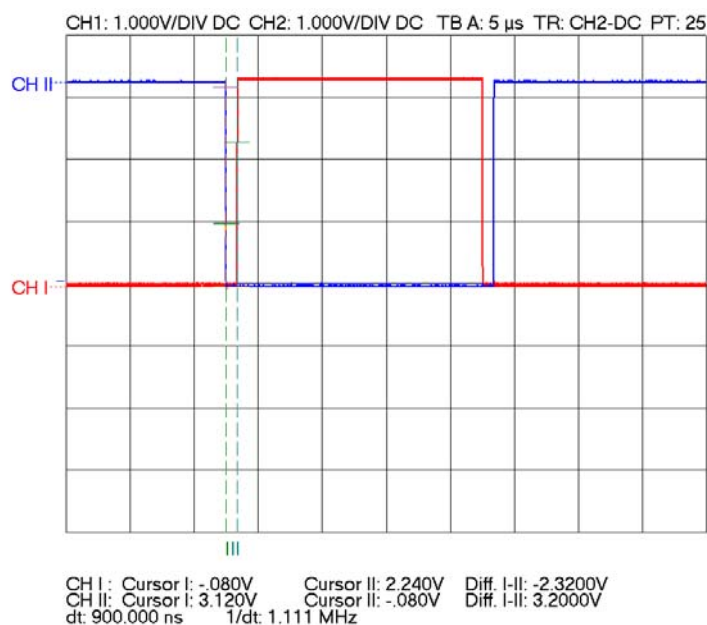
Z uporabo registra DBTCONA smo nastavili mrtvi čas na vrednost 2,25 % celotne stikalne periode, kar pri stikalni frekvenci  $f_s = 25$  kHz znaša 900 ns.

Časovni potek, na opisan način generiranih signalov z DSP je prikazan na sliki 4.3. Na prvi kanal osciloskopa (CHI) smo pripeljali signal PWM1 iz izhoda procesorske karte in na drugi kanal (CHII) signal PWM2. Iz slike je razvidno, da je PWM2 v bistvu le negiran PWM1.



Slika 4.3: Časovni potek signalov na izhodu DSP  
 (CHI: PWM1 – 2V/del; CHII: PWM2 – 2V/del; časovna baza: 20 µs)

Slika 4.4 prikazuje ista signala pri manjši časovni bazi na osciloskopu. Tukaj sta dobro vidna mrtva časa, ki se pojavita ob vsakem preklopu med maksimalno in minimalno vrednostjo obeh signalov in skrbita za to, da signala nikoli nista hkrati na logični vrednosti 1, kar v našem primeru pomeni prevajanje tranzistorja.



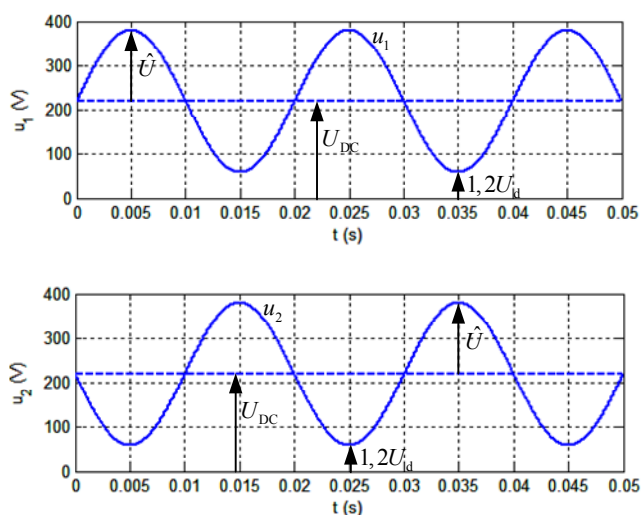
Slika 4.4: Prikaz mrtvih časov med PWM1 in PWM2  
 (CHI: PWM1 – 1V/del; CHII: PWM2 – 1V/del; časovna baza: 5 µs)



Na enak način kot smo generirali signala na izhodu PWM1 in PWM2 za proženje tranzistorjev v eni veji pretvornika, smo realizirali tudi signala za proženje druge veje pretvornika, pri katerih smo izbrali izhode PWM5 in PWM6. Na osnovi projektnih zahtev smo morali doseči, da se PWM1 prekriva s PWM6 in PWM2 s PWM5. Tako smo glede na osnovno vezje BI (sl. 3.13) določili da bo:

- PWM1 prožil stikalo  $Q_1$ ,
- PWM2 prožil stikalo  $Q_2$ ,
- PWM5 prožil stikalo  $Q_3$  in
- PWM6 prožil stikalo  $Q_4$ .

Ker pa v našem primeru na izhodu pretvornika ne želimo enosmerne napetosti, temveč sinusno napetost s frekvenco 50 Hz, je bilo potrebno izpeljati in sprogramirati funkcijo prevajalnih razmerij. Za izhodišče pri izpeljavi smo vzeli zelene časovne poteke napetosti na izhodu obeh vej pretvornika, ki so prikazani na sliki 4.5. Izpeljava je podrobneje predstavljena v prilogi 9.3, kot rezultat pa smo dobili funkciji (4.17) in (4.18) po katerih želimo, da se spreminja prevajalno razmerje znotraj ene periode izhodnega signala pretvornika.



Slika 4.5: Časovna poteka napetosti  $u_1$  in  $u_2$ , ki jih želimo generirati na izhodu obeh vej pretvornika

$$\Delta p_{1,6} = 1 - \frac{1}{1,2 + (\hat{U} / U_d)(1 + \sin(\omega t))} \quad (4.17)$$

$$\Delta p_{2,5} = 1 - \frac{1}{1,2 + (\hat{U} / U_d)(1 - \sin(\omega t))} \quad (4.18)$$

kjer je:

$\Delta p_{1,6}$  - prevajalno razmerje na izhodu PWM1 in PWM6

$\Delta p_{2,5}$  - prevajalno razmerje na izhodu PWM2 in PWM5

$\hat{U}$  - temenska vrednost sinusne napetosti na izhodu posamezne veje pretvornika

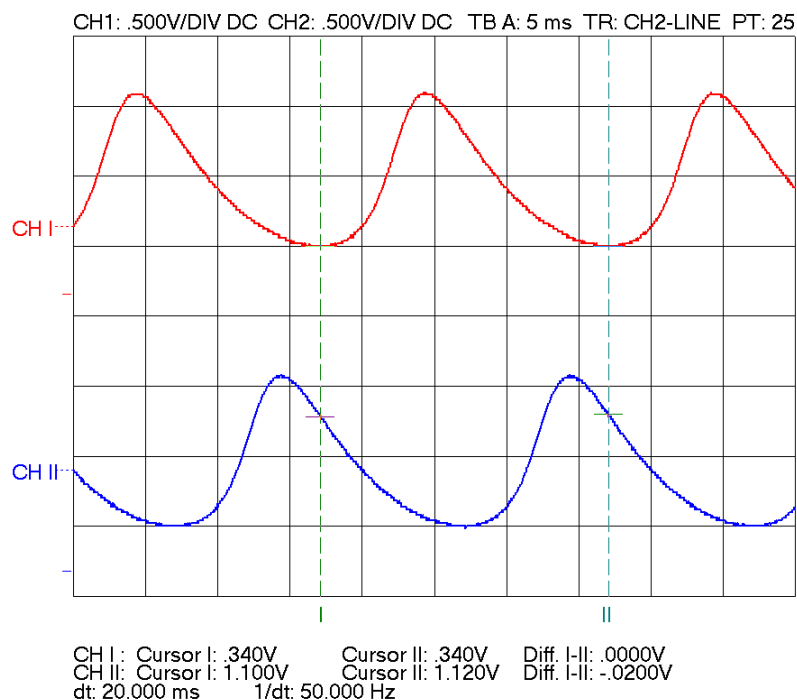
$U_d$  - enosmerna vhodna napetost

Določili smo, da se bo prevajalno razmerje na izhodih PWM1 in PWM6 spreminjalo po izrazu (4.17), na izhodih PWM2 in PWM5 pa po (4.18).

V naslednjem koraku smo morali določiti vrednosti funkcije  $\sin(\omega t)$  v obeh enačbah. Perioda zelene izhodne napetosti znaša 20 ms, kar pri stikalni periodi 40  $\mu$ s pomeni, da v eni periodi stikalo 500 krat preklopi. Na podlagi te ugotovitve smo sestavili sinusno tabelo, v kateri smo izračunali funkcijsko vrednost sinusa v vsaki od teh točk.

Kakor smo omenili že v uvodu tega podpoglavja, uporabljeni DSP podpira le operacije s celimi števili. Decimalno število 1,2 je v tej fazi predstavljajo problem pri pretvorbi obeh enačb v programsko kodo, ki pa smo ga rešili z uporabo normiranih vrednosti. Z normiranjem smo dosegli tudi večjo ločljivost pri nastavljanju razmerja  $\hat{U} / U_d$ , ki nam je služilo kot parameter za krmiljenje napetosti na izhodu pretvornika.

Na sliki 4.6 je prikazan časovni potek prefiltriranih pulzno-širinskih signalov na izhodu DSP, ki prikazuje invertirano obliko dejanskega signala za proženje tranzistorjev. Kot filter smo uporabili RC člen.



Slika 4.6: Z uporabo RC člena prefiltriran PWM signal na izhodu DSP:

$$\hat{U} / U_d = 5,5, R = 10 \text{ k}\Omega, C = 470 \text{ nF}.$$

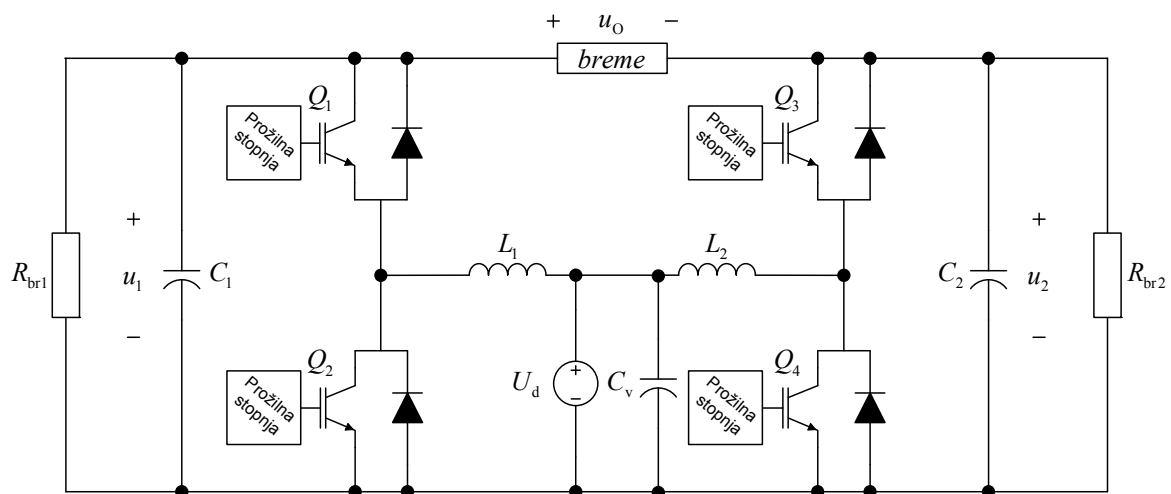
(CHI: PWM1 – 0,5V/del; CHII: PWM2 – 0,5V/del; časovna baza: 5 ms)

#### 4.4 Načrtovanje tiskanega vezja

Računalniško izrisati tiskano vezje z uporabo sodobnih programskih paketov danes ne predstavlja večjih težav. Slednjim pa se nikakor ne moremo izogniti pri načrtovanju povezav in razporeditve elementov. Pozorni moramo biti namreč na nešteto stvari, ki lahko vplivajo tako na kvaliteto signalov kot delovanje samega vezja in v najslabšem primeru tudi na uničenje posameznih elementov. Osnovno vodilo pri načrtovanju vezja je predstavljal zagotovitev simetričnosti obeh vej BI ter seveda izdelava dvostranskega tiska najmanjših možnih dimenzij s takšno razporeditvijo elementov, ki bo zagotavljala optimalno delovanje vezja ter minimalno prisotnost motenj v signalih.

V prvi fazi načrtovanja smo morali imeti v mislih ločitev močnostnega in signalnega dela vezja ter mikroprocesorske karte. Potrebna je bila tudi ločitev analogne in digitalne mase, z

namenom preprečitve širjenja digitalnih motenj po celotnem vezju. Preveriti smo morali napajalne napetosti vseh elektronskih elementov vezja in jim zagotoviti ustrezno napajanje. Pri načrtovanju močnostnega dela, ki je prikazan na sliki 3.13 smo že na samem začetku ugotovili, da bo to shemo potrebno dopolniti. Na vhod vezja smo dodali filtrski kondenzator  $C_v$ , ki služi za slabljenje visokofrekvenčnih komponent vhodnega signala. Na vratih tranzistorjev smo predvideli prožilna vezja, ki so potrebna za ojačanje prožilnih signalov in galvanško ločitev močnostnega in signalnega dela. Opazili smo tudi, da se v primeru realizacije osnovnega vezja BI s slike 3.13, kondenzatorja  $C_1$  in  $C_2$  pri delovanju pretvornika v prostem teku ne bi mogla prazniti. V praksi velja pravilo, da mora imeti pretvornik navzgor na svojem izhodu vselej priključeno breme, na katerem se bo pri delovanju brez priključenega porabnika, trošilo 10 % nazivne moči pretvornika. Posledično smo k obema izhodnima kondenzatorjema vzporedno vezali bremena  $R_{br1}$  in  $R_{br2}$  z upornostjo 5 k $\Omega$ . Z uvedbo omenjenih modifikacij smo sestavili vezje, ki je prikazano na sliki 4.7 in je primerno za realizacijo.



Slika 4.7: Topološka shema realiziranega BI

Pri načrtovanju tiskanega vezja smo morali zagotoviti primerno razdaljo med posameznimi povezavami in njihovo primerno debelino. Posebej pozorni smo morali biti v predelih, kjer smo predvideli velike potencialne razlike med povezavami, saj smo morali slednje

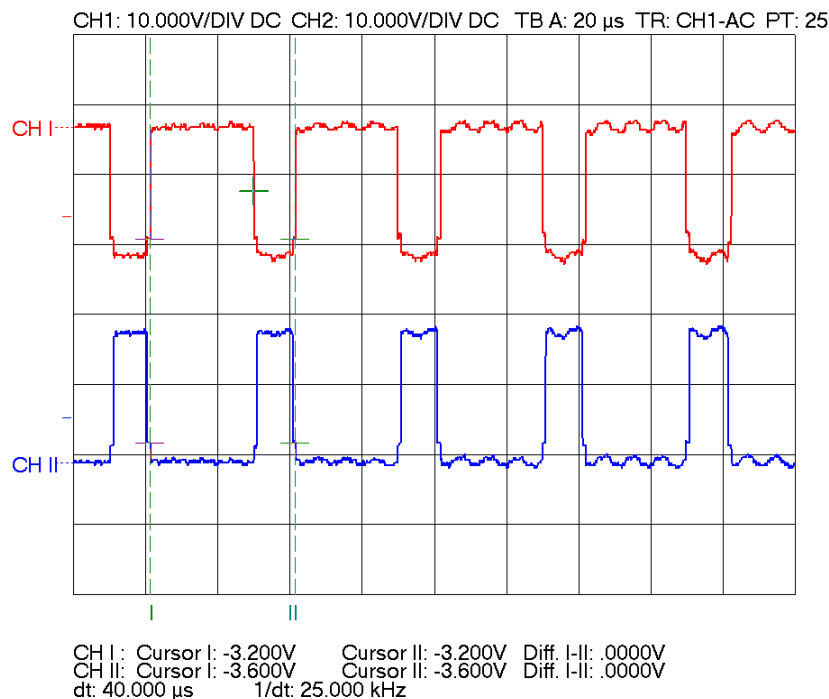
razmakniti na primerno razdaljo. Širše povezave smo predvideli le v močnostnem delu pretvornika, kjer smo tudi skrbno preračunali vse tokove, da ne bi presegli maksimalne dopustne tokovne gostote. V vseh področjih vezja smo težili k čim krajšim povezavam med elementi, v signalnem delu pa tudi k čim ožjim, saj se v ožjih pojavlja manj motenj.

V vezju smo poskrbeli tudi za ustrezne testne oziroma merilne točke, ki omogočajo priključitev merilnih instrumentov in opazovanje signalov. Poleg teh smo predvideli merilnike tokov in napetosti, ki so zasnovani na diferenčnih vezavah operacijskih ojačevalnikov. Njihove izhode smo speljali na vhode A/D pretvornikov procesorske karte, preko katerih bo v nadaljnjih fazah razvoja pretvornika mogoče izvesti regulacijo.

Vežalne sheme in načrt izdelanega tiskanega vezja se nahajajo v prilogi 9.4.

#### **4.5 Eksperimentalni rezultati**

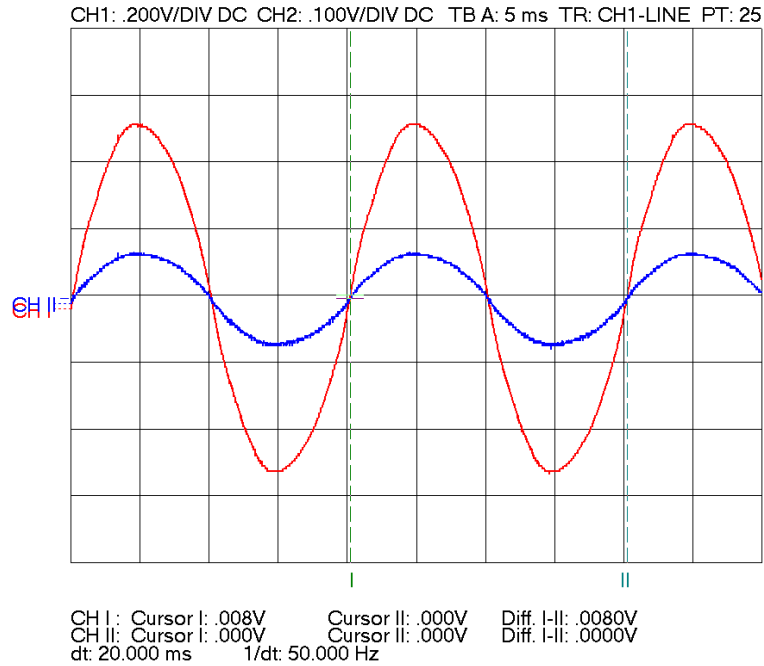
Po fizični izdelavi pretvornika je bilo najprej potrebno preveriti ali vsi elektronski elementi v vezju dobijo ustrezno napajalno napetost, ki je v našem primeru znašala +5 V. V naslednjem koraku smo želeli preveriti še delovanje prožilne stopnje, ki mora pulzno-širinski signal iz DSP ojačati na nivo, ki je potreben za proženje stikal. Na osciloskop smo pripeljali signal iz vrat tranzistorjev in na zaslonu sta se nam prikazala prožilna signala s časovno spreminjajočim prevajalnim razmerjem. Časovni potek je prikazan na sliki 4.8, iz katere so razvidni mrtvi časi med vklopnimi pulzi in amplituda pulzov, ki znaša približno 15 V.



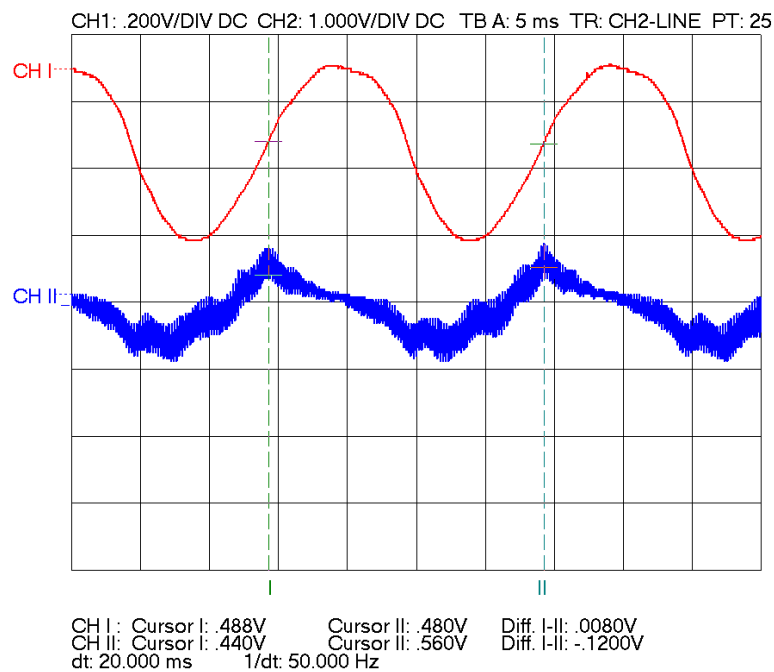
Slika 4.8: Časovni poteki pulzov stikalne funkcije PWM1 in PWM2  
 (CHI: PWM1 – 10V/del; CHII: PWM2 – 10V/del; časovna baza: 20  $\mu$ s)

Po uvodnem preverjanju signalnega in prožilnega dela pretvornika je sledilo preizkušanje celotnega sistema. Žal nismo imeli na razpolago izvora enosmerne napetosti z močjo 1 kW, tako da pretvornika nismo mogli preizkusiti pri polni moči. Najprej smo izvedli preizkus pri razmeroma majhnem dvigu napetosti, v naslednji fazi pa smo želeli na izhodu pretvornika generirati sinusno napetost z efektivno vrednostjo 230 V in frekvenco 50 Hz. Oba preizkusa smo izvedli v prostem teku ter pri obremenitvi s čistim ohmskim bremenom z upornostjo  $R = 300 \Omega$ .

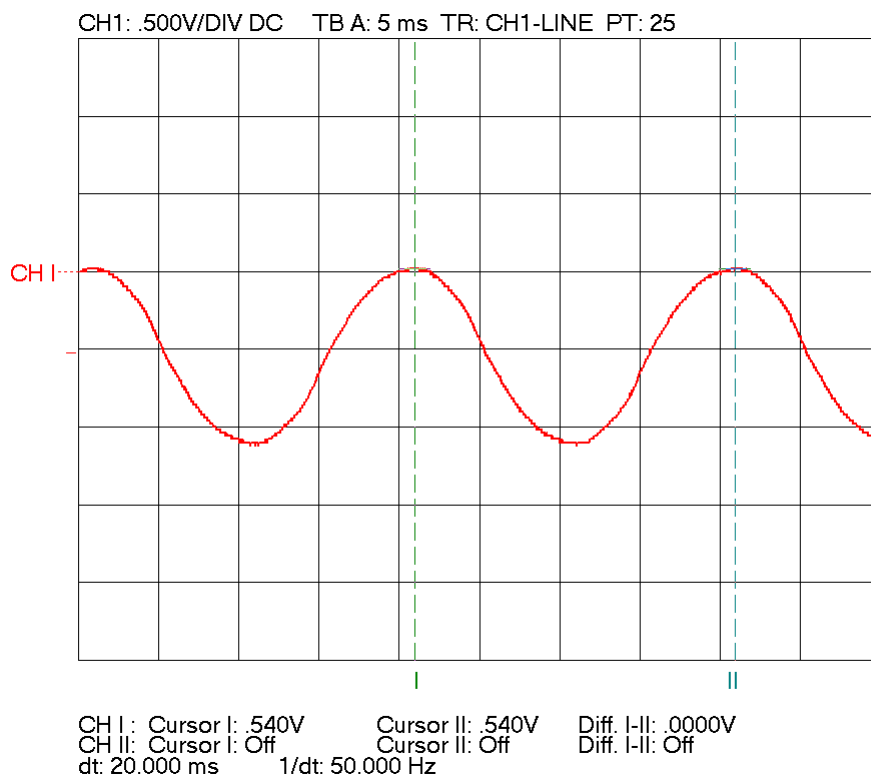
Na slikah 4.9 in 4.10 so prikazani časovni poteki napetosti in tokov pri obremenjenem pretvorniku ob majhnem dvigu napetosti. Ojačanje  $\hat{U}/U_d$  je bilo v tem primeru nastavljeno na vrednost 2. Preizkus je bil izveden pri enosmerni vhodni napetosti  $U_d = 30 \text{ V}$ , na bremenu pa smo z uporabo analognih merilnih instrumentov izmerili napetost  $U_o = 75 \text{ V}$  in tok  $I_o = 0,26 \text{ A}$ . Iz prikazanih časovnih potekov je razvidno, da izhodne napetosti in tokovi predstavljajo zgolj približke sinusa. Na sliki 4.11 je kot primerjava prikazan še časovni potek izhodne napetosti pretvornika v prostem teku. Ker v tem primeru vpliv bremena ni prisoten, je napetost veliko bližje čistemu sinusju kot pri obremenitvi.



Slika 4.9: Časovni potek izhodne napetosti  $u_o$  in toka  $i_o$  pri obremenjenem pretvorniku in ojačanju  $\hat{U}/U_d = 2$  (CHI:  $U_o - 40\text{V/del}$ ; CHII:  $I_o - 0,5\text{ A/del}$ ; časovna baza: 5 ms)



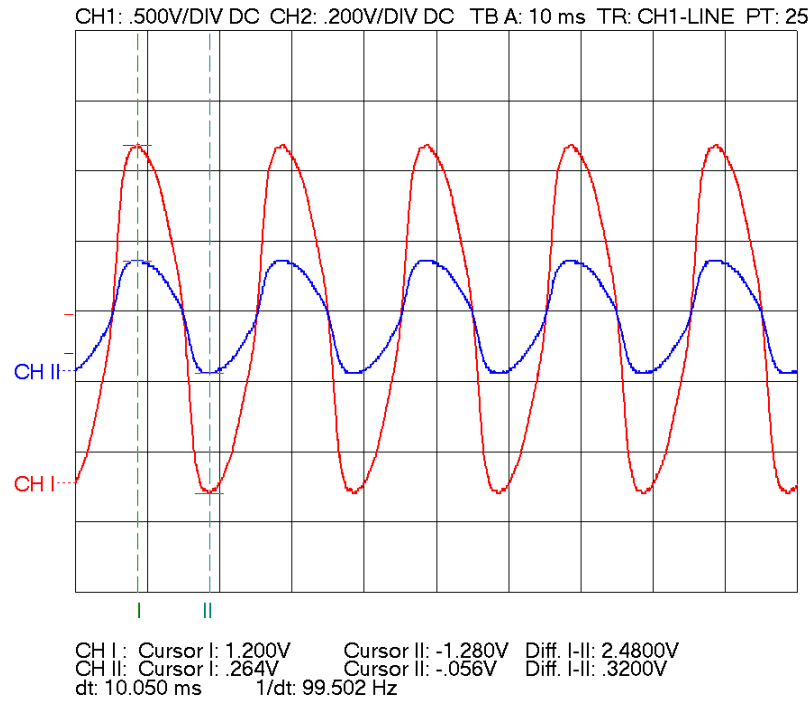
Slika 4.10: Časovni potek napetosti na eni veji pretvornika  $u_1$  in toka skozi dušilko  $i_{L1}$  pri obremenjenem pretvorniku in ojačanju  $\hat{U}/U_d = 2$  (CHI:  $u_1 - 40\text{V/del}$ ; CHII:  $i_{L1} - 5\text{ A/del}$ ; časovna baza: 5 ms)



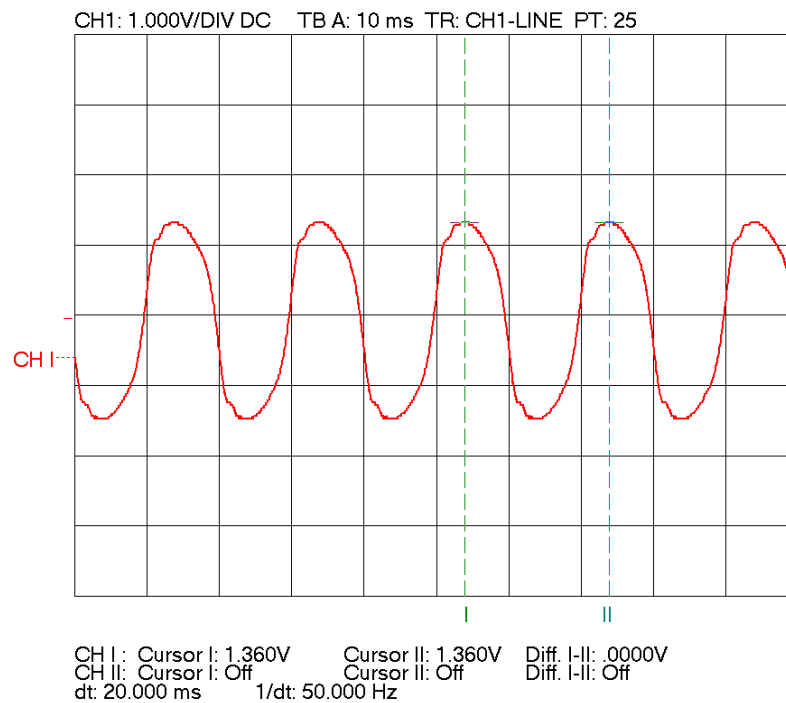
Slika 4.11: Časovni potek izhodne napetosti  $u_o$  v prostem teku pri ojačanju  $\hat{U}/U_d = 2$  (CHI:  $U_o$  – 100V/del; časovna baza: 5 ms)

V zadnji fazi preizkušanja smo izvedli še preizkus pri ojačanju  $\hat{U}/U_d = 5,5$ , kar bi moralo po teoretičnih izračunih ob upoštevanju idealnih razmer in vhodni napetosti 30 V, na izhodu dati napetost  $U_o = 230$  V. Časovni potek izhodne napetosti in toka pri obremenjenem pretvorniku sta prikazana na sliki 4.12, potek izhodne napetosti v prostem teku pa na sliki 4.13.





Slika 4.12: Časovni potek izhodne napetosti  $u_o$  in toka  $i_o$  pri obremenjenem pretvorniku in ojačanju  $\hat{U}/U_d = 5,5$  (CHI:  $U_o - 100\text{V/del}$ ; CHII:  $I_o - 1\text{ A/del}$ ; časovna baza: 10 ms)



Slika 4.13: Časovni potek izhodne napetosti  $u_o$  v prostem teku pri ojačanju  $\hat{U}/U_d = 5,5$  (CHI:  $U_o - 200\text{V/del}$ ; časovna baza: 10 ms)

Pri obremenitvi pretvornika smo na izhodu izmerili napetost  $U_o = 185 \text{ V}$  ter tok  $I_o = 0,6 \text{ A}$ , kar pa ne odraža dejanskega stanja, saj smo meritev izvedli z uporabo analognega merilnega instrumenta z vrtljivo tuljavico. Takšni instrumenti so namenjeni meritvi sinusnih veličin. Delujejo na tak način, da izmerjeno sinusno napetost ali tok polnovalno usmerijo in izmerijo srednjo vrednost. Efektivno vrednost, ki jo prikažejo v končni fazi, določijo kot 1,11 - kratnik srednje vrednosti. Faktor oblike 1,11 velja izključno za sinusne signale. V našem primeru bi zaradi odstopanja od čistega sinusa (sl. 4.12), kot faktor oblike morali upoštevati vrednost 1,25 in določiti dejansko vrednost izhodne napetosti in toka:

$$U'_o = \frac{1,25}{1,11} U_o = \frac{1,25}{1,11} \cdot 185 = 208 \text{ V} \quad (4.19)$$

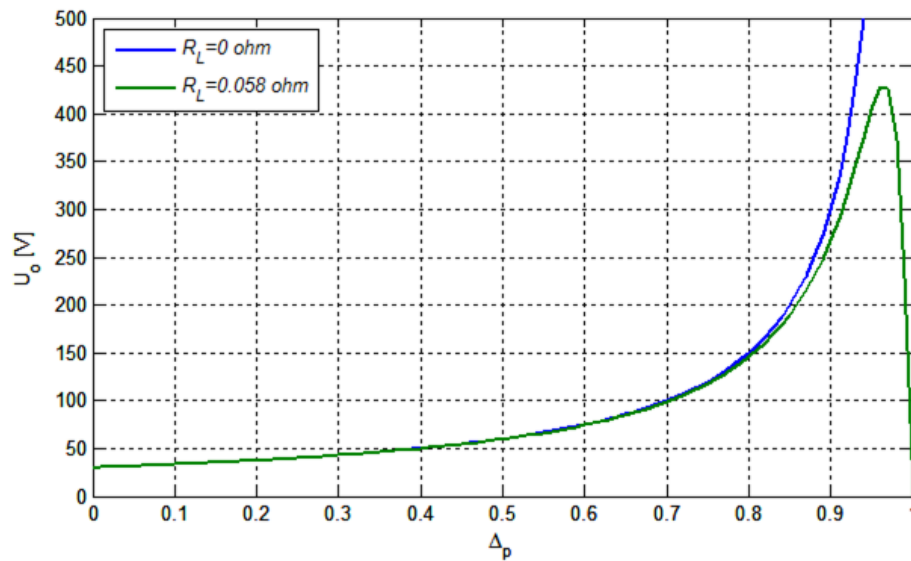
$$I'_o = \frac{1,2}{1,11} I_o = \frac{1,2}{1,11} \cdot 0,6 = 0,65 \text{ A} \quad (4.20)$$

Na podlagi izračunanih vrednosti izhodne napetosti in toka ter vhodnih veličin, ki so pri našem preizkusu znašale:  $U_d = 30 \text{ V}$  ter  $I_d = 5,7 \text{ A}$ , lahko po enačbi (4.21) določimo izkoristek pretvornika  $\eta_{BI}$ :

$$\eta_{BI} = \frac{P_o}{P_d} = \frac{U'_o I'_o}{U_d I_d} = \frac{208 \cdot 0,65}{30 \cdot 5,7} = 0,79 \quad (4.21)$$

Izkoristek 0,79 je razmeroma slab, vendar zaradi preizkušanja pri zgolj 15% nazivne moči pretvornika, večjega tudi ne moremo pričakovati. Pri majhnih močeh namreč izgube na elementih vezja predstavljajo dokaj velik delež v energijski bilanci pretvornika.

Izhodne napetosti 230 V pri ojačanju  $\hat{U} / U_d = 5,5$  nismo dosegli iz istega razloga, kot nismo na izhodu dobili čiste sinusne napetosti. Odstopanja od teoretičnih izračunov in pričakovanih rezultatov se pojavijo zaradi realnih elementov. Njihove karakteristike se razlikujejo od idealnih razmer, katere smo predpostavili pri izpeljavi funkcije prevajalnih razmerij (priloga 9.3). Vpliv realnih elementov je lepo razviden na statični karakteristiki pretvornika navzgor (sl. 4.14), ki prikazuje spreminjanje izhodne napetosti pretvornika v odvisnosti od prevajalnega razmerja.



Slika 4.14: Statična karakteristika pretvornika navzgor  
(modra – idealni elementi, zelena – realni elementi)

Modra krivulja predstavlja karakteristiko idealnega pretvornika navzgor za katerega velja enačba (3.3). Zelena krivulja pa je nekoliko boljši približek realnih razmer. Zanj lahko zapišemo enačbo:

$$U_o = \frac{R(1-\Delta p)}{R_L + R(1-\Delta p)^2} U_d \quad (4.22)$$

V (4.22) je poleg ohmske upornosti dušilke  $R_L$  upoštevan tudi vpliv bremena  $R$ , kar pojasnjuje zakaj smo dobili pri preizkusu prostega teka izhodno napetost, ki je bližje sinus kot v primeru obremenitve pretvornika.

Zaključimo lahko, da je vse nelinearnosti in lastnosti realnih elementov, v teoretičnih izračunih zelo težko zajeti. Iz tega sledi, da je s samo modulacijo praktično nemogoče na izhodu doseči želeno amplitudo in obliko toka ter napetosti. V sistem je potrebno uvesti regulacijo, ki bo na osnovi informacij o trenutnem stanju posameznih vhodnih in izhodnih veličin, zagotavljala delovanje v skladu z nastavljenimi referenčnimi vrednostmi.

## **5 STROŠKOVNA ANALIZA IN OBLIKOVANJE PRODAJNE CENE IZDELKA**

Vezje enostopenjskega DC-AC pretvornika, se kljub svojim prednostim, v praksi redko pojavlja znotraj ohišij omrežnih razsmernikov za PV sisteme. Prednosti v primerjavi s klasičnimi omrežnimi razsmerniki so opazne tako na tehničnem kot ekonomskem področju. Za delovanje pretvornika so potrebni le štirje tranzistorji, za razliko od klasičnih razsmernikov pa ne potrebuje izhodnega filtra. Zaradi manjšega števila potrebnih komponent nikakor ne moremo mimo razmišljanja, da bi bilo na tak način mogoče izdelovati cenovno ugoden in kakovosten močnostni pretvornik.

V poglavju bomo izvedli okvirno stroškovno analizo razvoja BI, kateremu želimo določiti prodajno ceno in ga uvrstiti v sistem mikro sončne elektrarne. V sklopu diplomskega dela smo izdelali le 0. prototip, za katerega so znani dejanski stroški. V nadaljevanju smo predvideli tudi izdelavo 1. prototipa ter proizvodnjo v veliki seriji, pri katerih pa smo stroške samo okvirno ocenili.

### **5.1 Splošno o stroških, kalkulacijah in lastni ceni**

#### **5.1.1 Vrste stroškov**

Vsak poslovni proces zahteva ustrezno sestavo in obseg prvin, ki vstopajo vanj in sodelujejo pri ustvarjanju poslovnih učinkov. Kot prvine sodelujejo raznovrstna delovna sredstva, predmeti dela, delovna sila in storitve drugih, ki se v poslovnem procesu v celoti ali po delih porabijo, njihova vrednost pa se prenese med poslovne učinke. Tako pridemo do stroškov, ki so definirani kot cenovno izraženi potroški prvin poslovnega procesa [12]. Ker gre pri stroških za kompleksno in zapleteno strukturo, ki za določitev zahteva

obravnavo iz več zornih kotov, obstajajo različni vidiki preučevanja stroškov. Posledično delimo stroške na naslednje vrste [12]:

- naravne vrste stroškov,
- izvorni stroški,
- stroški po poslovnih funkcijah,
- stroški aktivnosti,
- stroški stroškovnih mest,
- stroški stroškovnih nosilcev in
- neposredni ter posredni stroški.

Vsaka izmed naštetih vrst stroškov opisuje celotne stroške, kar pomeni, da ne obravnava različnih delov stroškovne celote, temveč preučuje isto celoto iz različnih vidikov.

#### 5.1.1.1 Naravne vrste stroškov

Naravne vrste stroškov izhajajo iz porabe prvin poslovnega procesa pri katerih ločimo [12]:

- stroške delovnih sredstev,
- stroške predmetov dela,
- stroške dela in
- stroške storitev.

Ta razvrstitev stroškov nas opozarja na vrednost trošenja posameznih prvin poslovnega procesa, vendar za konkretne namene analize stroškov in njihovega obvladovanja ni dovolj praktično uporabna. Zanimarja namreč, da je nekatere stroške mogoče uvrščati v več nakazanih naravnih vrst in da se stroški, ki nastajajo zaradi notranjih obračunov v organizaciji, z istim zneskom v istem obračunskem obdobju pojavljajo večkrat, čeprav z različnimi imeni [13].

#### 5.1.1.2 Izvorni stroški

Izvorni stroški so uporabno bolj razgrajeni naravni stroški in dejansko odražajo temeljne stroške, ki jih povzroči trošenje posameznih prvin poslovnega procesa. Njihovo

poznavanje je pomembno, saj tvorijo temelj za izračunavanje stroškov proizvodnje določenega izdelka. Delimo jih na [12]:

- stroške materiala,
- stroške amortizacije,
- stroške storitev,
- stroške dela,
- stroške dajatev (ki niso odvisni od poslovnega izida) in
- finančne stroške (obresti).

#### 5.1.1.3 Stroški poslovnih funkcij

S pomočjo tega vidika poskušamo določiti katera poslovna funkcija v podjetju je povzročila določen strošek in posledično ugotoviti, koliko stane podjetje izvajanje določene funkcije. Zaradi medsebojnega prepletanja poslovnih funkcij je tovrstno spremljanje stroškov relativno netočno in nezanesljivo [12].

#### 5.1.1.4 Stroški aktivnosti

Stroške aktivnost povzročajo različne aktivnosti, ki so potrebne, da se prvine poslovnega procesa preoblikujejo v izdelek ali storitev. Stroški so v glavnem odvisni od obsega in porabljenega časa določene aktivnosti [12].

#### 5.1.1.5 Stroški stroškovnih mest

Spremljanje stroškov po poslovnih funkcijah ni primerno za natančno preučevanje in obvladovanje stroškov. Zato se v podjetju organizirajo stroškovna mesta. To so namensko, prostorsko in stvarno zaokroženi deli podjetja, na katerih ali v zvezi s katerimi se pri poslovanju pojavljajo stroški, ki jih je mogoče razporejati na posameznečasne ali končne stroškovne nosilce in je zanje nekdo odgovoren [12]. Število stroškovnih mest je odvisno od vrste dejavnosti in velikosti podjetja. Pri zbiranju stroškov na stroškovna mesta se pojavljajo neposredni in posredni stroški. Neposredni stroški stroškovnega mesta so tisti, za katere vemo, da so nastali na določenem stroškovnem mestu, medtem ko za

posredne ne vemo kako in v kolikšni količini so nastali ter na katero stroškovno mesto se nanašajo. Posredne stroške je potrebno po določenem kriteriju razporediti na stroškovna mesta.

#### 5.1.1.6 Stroški po stroškovnih nosilcih

Stroški po stroškovnih nosilcih se nanašajo na izdelke in storitve, zaradi katerih v podjetju nastajajo stroški. Stroškovni nosilci so torej tisti učinki, ki jih bomo prodali (interno ali navzven) in ki morajo pokriti stroške, katere so povzročili [12]. Podobno kot pri stroškovnih mestih se tudi tukaj pojavljajo neposredni in posredni stroški.

#### 5.1.2 Razvrščanje stroškov

V finančnem računovodstvu se stroški ob začetnem pripoznanju razčlenjujejo po izvirnih vrstah na stroške materiala, stroške amortizacije, stroške storitev, stroške dela, stroške dajatev in finančne stroške. Stroški po izvirnih vrstah se nato razporejajo po stroškovnih mestih, ki v najbolj okrnjeni izvedbi omogočajo ločeno spremljanje stroškov proizvodnje, stroškov nakupovanja, stroškov prodajanja in stroškov skupnih služb. Število stroškovnih mest v organizaciji je potrebno prilagoditi njeni velikosti, organiziranosti, posebnosti proizvodnje oziroma poslovanja, uporabljeni metodi razporejanja stroškov po poslovnih učinkih in oblikam kontroliranja. Stroški po izvirnih vrstah so glede na zamišljena stroškovna mesta lahko neposredni ali posredni stroški teh stroškovnih mest [14].

Stroški po izvirnih vrstah pa se lahko razporejajo tudi po stroškovnih nosilcih, s katerimi se podjetje pojavlja na trgu. Število stroškovnih nosilcev se v podjetju prilagodi gleda na to, ali se ukvarja z množinsko oziroma procesno dejavnostjo ali s serijsko oziroma posamično dejavnostjo po naročilih [14].

#### 5.1.3 Kalkulacije in lastna cena

Kalkulacija je računski postopek s katerim prenesemo izvirne stroške na stroškovne nosilce, izračunamo povprečne stroške stroškovnega nosilca in določimo lastno ceno proizvoda ali storitve. Za različne vrste in tipe proizvodnih procesov se uporabljajo različni

tipi kalkulacij stroškov, kot so delitveni obračun, obračun z dodatki in skrajšani obračun. Za planiranje in nadziranje poslovanja ter sprejemanje poslovnih odločitev se v podjetjih izvaja predračunavanje in obračunavanje stroškov. Predračunavanje, planska kalkulacija ali predkalkulacija pomeni vnaprej predvideti stroške posameznega proizvoda in služi predvsem za sprejemanje poslovnih odločitev. Kalkulacija ali obračun stroškov pa predstavlja končno določitev lastne cene oziroma povprečnih stroškov posameznega proizvoda [12].

Če vse v obdobju nastale stroške, razen tistih, ki bremenijo kupljene količine materiala, drobnega inventarja in osnovna sredstva ali so začasno razmejeni, obračunamo s tedanjimi poslovnimi učinki, govorimo o njihovi lastni ceni [13]. Lastna cena je v osnovi sestavljena iz:

- neposrednih stroškov materiala in storitev,
- neposrednih stroškov dela,
- posrednih stroškov ustvarjanja učinkov ter
- posrednih stroškov nakupovanja, prodajanja in splošnih dejavnosti.

Neposredni stroški materiala so tisti, ki jih lahko že ob nastanku povežemo z nastajajočim poslovnim učinkom, neposredni stroški storitev pa se pojavljajo v tistih primerih, ko določeno fazo dela opravi neka druga organizacija. Neposredne stroške dela predstavljajo plače in z njimi povezane dajatve, ki jih je mogoče povezati z nastajajočim poslovnim učinkom. Posredni stroški ustvarjanja učinkov nastajajo zaradi pomožnih opravil in jih ob času nastanka ne moremo zajemati po poslovnih učinkih. Med njih sodijo [13]:

- amortizacija osnovnih sredstev pri ustvarjanju učinkov,
- stroški popravil in čiščenja naprav pri ustvarjanju učinkov,
- stroški energije, kurjave, razsvetljave in vode pri ustvarjanju učinkov,
- stroški materiala in drobnega inventarja pri ustvarjanju učinkov,
- stroški dela strokovnega in vodstvenega osebja pri ustvarjanju učinkov in
- drugi stroški pri ustvarjanju učinkov.

Tudi posrednih stroškov nakupovanja, prodajanja in splošnih dejavnosti, ki se v organizaciji pojavljajo zunaj procesa ustvarjanja učinkov, ne moremo ob nastanku neposredno povezati z nastajajočimi izdelki. Mednje štejemo [13]:



- amortizacijo osnovnih sredstev pri nakupovanju, prodajanju in splošnih dejavnostih,
- stroške popravil in čiščenja pri nakupovanju, prodajanju in splošnih dejavnostih,
- stroške energije, kurjave, razsvetljave in vode pri nakupovanju, prodajanju in splošnih dejavnostih,
- stroške materiala in drobnega inventarja pri nakupovanju, prodajanju in splošnih dejavnostih,
- stroške gospodarske propagande, reprezentance, plačilnega prometa in poštne ter telefonske stroške,
- stroške strokovnega in vodstvenega osebja pri nakupovanju, prodajanju in splošnih dejavnostih ter
- druge stroške pri nakupovanju, prodajanju in splošnih dejavnostih.

## 5.2 Stroški razvoja in izdelave 0. prototipa

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (v nadaljevanju FER) je članica Univerze v Mariboru in je razdeljena na osem inštitutov. V okviru inštitutov delujejo laboratoriji, med katerimi je tudi Laboratorij za energetska elektronika, kjer se je v času od 18. 5. 2009 do 1. 10. 2009 izvajal raziskovalno-razvojni projekt Enostopenjski DC/AC pretvornik za solarne sisteme. Za določitev stroškov razvoja in izdelave prototipa enostopenjskega DC/AC pretvornika je potrebno v prvi fazi zbrati podatke o vseh neposrednih stroških, ki se nanašajo na omenjen izdelek oziroma stroškovni nosilec. V naslednjem koraku je potrebno zbrati še informacije o vseh posrednih stroških, ki so se pojavili v organizaciji v obdobju razvoja in izdelave 0. prototipa ter jih v končni fazi razdeliti in določiti kolikšen del le-teh pripada obravnavanemu stroškovnemu nosilcu. Pri tem naletimo na številne probleme v zvezi z razdeljevanjem posrednih stroškov. Do prve delitve pride že pri zbiranju informacij o stroških, saj se prostori FER nahajajo v dveh zgradbah, in sicer v zgradbi Tehniških fakultet ter objektu G2. Stroški v zvezi z električno energijo, čiščenjem, ogrevanjem in drugi, ki nastanejo v zgradbi Tehniških fakultet, se morajo po nekem ključu razdeliti med 4 fakultete, ki se nahajajo v zgradbi in imajo vsaka svojo finančno-računovodsko službo. Celotne stroške, ki odpadejo na FER pa je potrebno

v nadaljevanju razdeliti še na posamezna stroškovna mesta, ki predstavljajo razne inštitute in laboratorije.

### 5.2.1 Neposredni stroški materiala

Neposredni materialni stroški so tisti, ki jih že ob nastanku lahko povežemo z nastajajočim poslovnim učinkom. Z materialom označujemo ves osnovni in pomožni material, ki je podrobneje naveden v tabeli 5.1. Količinski potroški materiala so na osnovi računov dobaviteljev tudi cenovno ovrednoteni. Vse vrednosti so izražene v EUR.

Tabela 5.1: Neposredni stroški materiala za enostopenjski DC/AC pretvornik

Zap. št.	Material	ME	Količina	Cena / ME (EUR / ME)	Vrednost (EUR)
1	eZdsp TMS320F2812	kos	1	529,99	529,99
2	Dušilka 300 $\mu$ H	kos	2	12,50	25,00
3	Tranzistor IGBT Semikron SK45GB063	kos	2	18,23	36,46
4	Kondenzator Vishay MKP 338 4 10 $\mu$ F	kos	15	3,07	46,05
5	DC/DC pretvornik NMA 0515D	kos	4	6,28	25,12
6	Optocoupler HCPL 3120	kos	4	2,36	9,44
7	Tokovni transformator LEM LTS 25 - NP	kos	2	12,55	25,10
8	Operacijski ojačevalnik THS 4221D	kos	5	4,80	24,00
9	Logična IN vrata HCT08	kos	1	0,90	0,90
10	Podnožje DSP	kos	5	1,50	7,50
11	Konektor SERIAL CON	kos	1	0,26	0,26
12	Konektor PX1_1X2	kos	4	0,18	0,72
13	Bipolarni tranzistor BC817	kos	4	0,12	0,48
14	Zener Dioda 3.3V	kos	3	0,38	1,14
15	Zener Dioda 5.1V	kos	4	0,05	0,20
16	Upor aksialni 0,25W 5k	kos	32	0,96	30,72
17	Upor SMD 1206 0e	kos	1	0,02	0,02
18	Upor SMD 1206 33e	kos	4	0,03	0,12
19	Upor SMD 1206 220e	kos	4	0,03	0,12
20	Upor SMD 1206 1k	kos	4	0,05	0,20
21	Upor SMD 1206 22k	kos	4	0,36	1,44
22	Upor SMD 0805 100e	kos	1	0,03	0,03
23	Upor SMD 0805 1k	kos	9	0,06	0,54
24	Upor SMD 0805 4,7k	kos	6	0,07	0,42
25	Upor SMD 0805 10k	kos	15	0,03	0,45
26	Upor SMD 0805 100k	kos	44	0,04	1,76
27	Kondenzator SMD 1206 1 $\mu$ F	kos	12	0,11	1,32

28	Kondenzator SMD 0805 10nF	kos	7	0,04	0,28
29	Kondenzator SMD 0805 100nF	kos	8	0,05	0,40
30	Vijaki M4	kos	14	0,17	2,38
31	Kovinska matica M4	kos	12	0,07	0,84
32	Distančniki	kos	12	0,28	3,36
33	Skrčna cev	kos	1	1,04	1,04
34	Vodnik 1,5 mm <sup>2</sup> rdeča	m	3	0,33	0,99
35	Vodnik 1,5 mm <sup>2</sup> črna	m	3	0,33	0,99
36	Cevni kabelski čevelj 1,5-4	kos	10	0,24	2,40
37	Žica za spajkanje	kos	1	4,05	4,05
<b>SKUPAJ</b>					<b>786,23</b>

### 5.2.2 Neposredni stroški storitev

Pri izdelavi pretvornika so se pojavili tudi neposredni stroški storitev, ki jih lahko pripišemo obravnavanemu stroškovnemu nosilcu. Kljub možnosti lastne izdelave tiskanega vezja smo se odločili za izdelavo pri zunanjem izvajalcu, ki je specializiran za izdelavo takšnih vezij. Profesionalno izdelani tiski imajo namreč številne prednosti pred osnovnimi izvedbami, kakršne je mogoče izdelati v šolskem laboratoriju. Tukaj imamo v mislih predvsem posebne izolacijske premaze, polnjenje skoznjikov s spajkalno kritino, preciznejšo izdelavo in možnost izdelave tiskov večjih dimenzij, kar je predstavljalo v našem primeru poglavitni razlog za naročilo izdelave pri zunanjem izvajalcu. V tabeli 5.2 je prikazan seznam neposrednih stroškov storitev. Podatki so pridobljeni na podlagi računa dobavitelja.

Tabela 5.2: Neposredni stroški storitev za enostopenjski DC/AC pretvornik

Zap. št.	Storitev	ME	Količina	Cena / ME (EUR / ME)	Vrednost (EUR)
1	Izdelava tiskanega vezja	kos	1	180,00	180,00
<b>SKUPAJ</b>					<b>180,00</b>

### 5.2.3 Neposredni stroški dela

Pri določitvi neposrednih stroškov dela bomo predpostavili, da so izdelek načrtovali, realizirali in preizkusili strokovnjaki, in sicer univerzitetni diplomirani inženirji s 7. stopnjo izobrazbe. Tako se bomo približali realnim neposrednim stroškom dela pri razvoju in raziskavah v zvezi s kakšnim novim proizvodom, saj to delo tudi v praksi opravlja

kvalificiran kader. Za izhodišče smo vzeli povprečno bruto plačo izkušenega univerzitetnega diplomiranega inženirja v Sloveniji, ki znaša približno 2200 EUR na mesec<sup>1</sup>. Ob upoštevanju, da ima en mesec 22 delovnih dni in vsak dan 8 delovnih ur, lahko izračunamo povprečno urno postavko, ki znaša 12,5 EUR na uro. Delo opravljeno na projektu smo beležili glede na opravljene delovne ure. Za namen določitve neposrednih stroškov dela je bilo predpostavljeno, da sta na projektu sodelovala dva strokovnjaka, in sicer eden na področju elektrotehnike in eden na področju programiranja digitalnih signalnih procesorjev.

V tabeli 5.3 je prikazan seznam za določitev neposrednih stroškov dela. Razčlenjen je po posameznih fazah oziroma vrstah dela na projektu. Razvidno je, da je bilo največ časa porabljenega za projektiranje pretvornika, saj je to delo bistvenega pomena za nadaljnjo izvedbo in delovanje sistema. Tukaj je prisotnega veliko preučevanja strokovne literature, načrtovanje posameznih komponent vezja, analiza delovanja samega pretvornika, načrtovanje vezja, ipd. Veliko časa pa je bilo porabljenega tudi za programiranje in preizkušanje delovanja pretvorniškega sistema, saj s temi aktivnostmi dosežemo stabilnost sistema in zanesljivost delovanja. Iz tabele 5.3 je razvidno, da se pri preizkušanju pretvornika pojavijo dvakratni stroški na uro glede na preostale aktivnosti. Razlog je v tem, da morata biti pri preizkušanju prisotna oba strokovnjaka, saj se pri tej aktivnosti največkrat pojavijo težave, katere je mogoče rešiti le s poznavanjem in razumevanjem celotnega sistema.

Tabela 5.3: Neposredni stroški dela za enostopenjski DC/AC pretvornik

Zap. št.	Delo	ME	Količina	Stroški / ME (EUR / ME)	Vrednost (EUR)
1	Projektiranje pretvornika	ura	240	12,50	3.000,00
2	Izdelava pretvornika	ura	72	12,50	900,00
3	Programiranje	ura	232	12,50	2.900,00
4	Preizkušanje delovanja pretvorniškega sistema	ura	160	25,00	4.000,00
<b>SKUPAJ</b>					<b>10.800,00</b>

<sup>1</sup> Podatki pridobljeni s strani Kadrovske službe FERi.

#### 5.2.4 Posredni in celotni stroški

Zaradi kompleksnosti obravnavanja in razdelitve posrednih stroškov, njihove dejanske vrednosti v obdobju razvoja 0. prototipa ne bomo ugotavljali, saj bi to presegalo meje diplomske naloge. Na osnovi izkušenj in stroškovnih analiz podobnih projektov Laboratorija za energetska elektronika bomo predpostavili, da vsi posredni stroški razvoja in izdelave prototipa predstavljajo približno 16 % celotnih stroškov. V tabeli 5.4 je prikazana struktura stroškov po posameznih vrstah.

Tabela 5.4: Stroški razvoja in izdelave Enostopenjskega DC/AC pretvornika

Vrste stroškov	Delež (%)	Vrednost (EUR)
Neposredni stroški	84	11.766,23
Neposredni stroški materiala		786,23
Neposredni stroški storitev		180,00
Neposredni stroški dela		10.800,00
Posredni stroški	16	2.241,19
Celotni stroški	100	<b>14.007,42</b>

### 5.3 Predvideni stroški razvoja in izdelave 1. prototipa

Po uspešno opravljenih testiranjih 0. prototipa je potrebno nadaljevati razvoj izdelka z izdelavo 1. prototipa, ki bi naj predstavljal izdelek namenjen serijski proizvodnji. Glavno vodilo pri tem predstavlja zmanjšanje neposrednih materialnih stroškov, doseganje maksimalne možne zanesljivosti delovanja in optimiziranje samega vezja pretvornika. 1. prototipa v Laboratoriju za energetska elektronika dejansko nismo izdelali, tako da so vsi podatki predstavljeni v tem podpoglavju zgolj predvideni in okvirno nakazujejo smer nadaljnjega razvoja izdelka.

#### 5.3.1 Neposredni stroški materiala

Kot je razvidno iz tabele 5.1 predstavlja največji delež neposrednih stroškov materiala 0. prototipa razvojno orodje eZdsp TMS320F2812, na katerem je osrednja komponenta

digitalni signalni procesor TMS320F2812PGFQ. Ker gre za razvojno orodje je seveda zgrajeno tako, da omogoča enostavno priključitev na najrazličnejše aplikacije, posledica česar so tudi razmeroma velike dimenzije. Izmed številnih analognih in digitalnih vhodov ter izhodov te procesorske karte potrebujemo za delovanje pretvornika le 4 analogne PWM izhode in 5 analognih vhodov za meritve napetosti ter toka. V našem primeru bi zadostoval le digitalni signalni procesor TMS320F2812PGFQ integriran v tiskano vezje pretvornika, ki je tudi veliko cenejši od celotnega razvojnega orodja. Posledica uporabe zgolj DSP-ja namesto celotne procesorske karte bi občutno zmanjšala neposredne materialne stroške ter velikost samega pretvornika, potrebna pa bi bila manjša modifikacija vezja.

Kakor pri vseh omrežnih razsmernikih za fotonapetostne sisteme se tudi pri Enostopenjskem DC/AC pretvorniku zahteva namestitev LCD grafičnega prikazovalnika, ki služi za prikazovanje obratovalnega stanja pretvornika. Namestitev te komponente poveča neposredne stroške materiala.

Med testiranjem delovanja 0. prototipa smo ugotovili tudi, da operacijski ojačevalniki THS 4221D, ki so uporabljeni v diferenčnih vezavah za meritve napetosti in tokov, niso najbolj primerni za takšne aplikacije, saj prepuščajo in zaznavajo vse najmanjše motnje v sistemu, kar slabo vpliva na meritve. To so sicer zelo kvalitetni operacijski ojačevalniki, ki pa so posledično tudi zelo dragi. Za izvedbo 1. prototipa bi bila primernejša uporaba ojačevalnikov nižjega cenovnega razreda, ki niso tako občutljivi na motnje.

Tabela 5.5 prikazuje razčlenjen seznam neposrednih materialnih stroškov 1. prototipa. Podatki so pridobljeni na osnovi računov dobaviteljev pri izdelavi 0. prototipa ter na osnovi povpraševanja pri dobaviteljih.

Tabela 5.5: Neposredni stroški materiala 1. prototipa

Zap. št.	Material	ME	Količina	Cena / ME (EUR / ME)	Vrednost (EUR)
1	DSP TMS320F2812PGFQ	kos	1	20,54	20,54
2	Dušilka 300 $\mu$ H	kos	2	12,50	25,00
3	Tranzistor IGBT Semikron SK45GB063	kos	2	18,23	36,46
4	Kondenzator Vishay MKP 338 4 10 $\mu$ F	kos	15	3,07	46,05
5	DC/DC pretvornik NMA 0515D	kos	4	6,28	25,12
6	Optocoupler HCPL 3120	kos	4	2,36	9,44
7	Tokovni transformator LEM LTS 25 - NP	kos	2	12,55	25,10
8	Operacijski ojačevalnik MCP6231-E/SN	kos	5	0,31	1,55

9	Logična IN vrata HCT08	kos	1	0,90	0,90
10	Podnožje DSP	kos	5	1,50	7,50
11	Konektor SERIAL CON	kos	1	0,26	0,26
12	Konektor PX1_1X2	kos	4	0,18	0,72
13	Bipolarni tranzistor BC817	kos	4	0,12	0,48
14	Zener Dioda 3.3V	kos	3	0,38	1,14
15	Zener Dioda 5.1V	kos	4	0,05	0,20
16	Upor aksialni 0,25W 5k	kos	32	0,96	30,72
17	Upor SMD 1206 0e	kos	1	0,02	0,02
18	Upor SMD 1206 33e	kos	4	0,03	0,12
19	Upor SMD 1206 220e	kos	4	0,03	0,12
20	Upor SMD 1206 1k	kos	4	0,05	0,20
21	Upor SMD 1206 22k	kos	4	0,36	1,44
22	Upor SMD 0805 100e	kos	1	0,03	0,03
23	Upor SMD 0805 1k	kos	9	0,06	0,54
24	Upor SMD 0805 4,7k	kos	6	0,07	0,42
25	Upor SMD 0805 10k	kos	15	0,03	0,45
26	Upor SMD 0805 100k	kos	44	0,04	1,76
27	Kondenzator SMD 1206 1 $\mu$ F	kos	12	0,11	1,32
28	Kondenzator SMD 0805 10nF	kos	7	0,04	0,28
29	Kondenzator SMD 0805 100nF	kos	8	0,05	0,40
30	Vijaki M4	kos	14	0,17	2,38
31	Kovinska matica M4	kos	12	0,07	0,84
32	Distančniki	kos	12	0,28	3,36
33	Skrčna cev	kos	1	1,04	1,04
34	Vodnik 1,5 mm <sup>2</sup> rdeča	m	3	0,33	0,99
35	Vodnik 1,5 mm <sup>2</sup> črna	m	3	0,33	0,99
36	Cevni kabelski čevelj 1,5-4	kos	10	0,24	2,40
37	Žica za spajkanje	kos	1	4,05	4,05
38	Grafični LCD prikazovalnik 128x64 točk	kos	1	61,92	61,92
<b>SKUPAJ</b>					<b>316,25</b>

### 5.3.2 Neposredni stroški storitev

Tudi pri izdelavi 1. prototipa bi se odločili za izdelavo tiska pri zunanjem izvajalcu. Pojavile bi se sicer manjše spremembe samega vezja zaradi optimizacije in uporabe zgolj DSP-ja namesto celotnega razvojnega orodja eZdsp, vendar to bistveno ne bi vplivalo na stroške izdelave. Tako lahko uporabimo kar podatke o neposrednih stroških storitev 0. prototipa, ki so navedeni že v tabeli 5.2.

### 5.3.3 Neposredni stroški dela

Ob enakih predpostavkah glede zaposlenih na projektu razvoja in izdelave Enostopenjskega DC/AC pretvornika, enakih urnih postavkah ter načinu beleženja opravljenega dela so v zvezi s 1. prototipom predvideni neposredni stroški dela, ki so prikazani v tabeli 5.6.

V zvezi s projektiranjem pretvornika bi morala biti opravljena dela, ki bi zajemala optimizacijo tiskanega vezja glede dimenzij, menjavo razvojnega orodja eZdsp s samim DSP-jem, umestitev grafičnega LCD prikazovalnika v sistem in izbiro primernejših operacijskih ojačevalnikov. Izdelava in preizkušanje delovanja 1. prototipa bi načeloma potekala enako kot pri 0. prototipu. S programiranjem bi bilo potrebno realizirati regulacijo izhodnega toka in napetosti pretvornika, saj smo pri 0. prototipu uporabili zgolj modulacijo. Slednja zaradi nelinearnosti realnih elementov ne da čistega sinusnega toka in napetosti ter ne zagotavlja konstantne napetosti pri spremenljivem bremenu, zaradi česar takšen pretvornik ni primeren za priklop na elektroenergetsko omrežje. Z izvedbo regulacije je mogoče te pomanjkljivosti odpraviti. Programsko bi bilo potrebno rešiti tudi sledenje točki največje moči, ki služi optimalnemu izkoriščanju sončne energije.

Tabela 5.6: Neposredni stroški dela 1. prototipa

Zap. št.	Delo	ME	Količina	Stroški / ME (EUR / ME)	Vrednost (EUR)
1	Projektiranje pretvornika	ura	104	12,50	1.300,00
2	Izdelava pretvornika	ura	72	12,50	900,00
3	Programiranje	ura	280	12,50	3.500,00
4	Preizkušanje delovanja pretvorniškega sistema	ura	160	25,00	4.000,00
<b>SKUPAJ</b>					<b>9.700,00</b>

### 5.3.4 Posredni in celotni stroški

Tudi v tem primeru bomo upoštevali predpostavko, da posredni stroški predstavljajo v povprečju 16 % celotnih stroškov, ki so povezani s 1. prototipom. Z namenom določitve celotnih stroškov smo v tabeli 5.7 zbrali vse stroške, ki bremenijo 0. prototip in vse stroške 1. prototipa. Na tak način določene celotne stroške v nadaljevanju upoštevamo kot



neposredne stroške storitev z vidika podjetja, ki je razvoj izdelka naročilo pri zunanjem izvajalcu.

Tabela 5.7: Celotni stroški razvoja in izdelave Enostopenjskega DC/AC pretvornika

Vrste stroškov		Vrednost (EUR)
0. prototip	Neposredni stroški	11.766,23
	Neposredni stroški materiala	786,23
	Neposredni stroški storitev	180,00
	Neposredni stroški dela	10.800,00
	Posredni stroški	2.241,19
	Neposredni + posredni stroški	14.007,42
1. prototip	Neposredni stroški	10.196,25
	Neposredni stroški materiala	316,25
	Neposredni stroški storitev	180,00
	Neposredni stroški dela	9.700,00
	Posredni stroški	1.942,14
	Neposredni + posredni stroški	12.138,39
<b>Skupaj</b>	<b>Celotni stroški</b>	<b>26.145,81</b>

#### 5.4 Lastna cena izdelka pri proizvodnji 10.000 kosov

V tem podpoglavju bomo določili načrtovano lastno ceno Enostopenjskega DC/AC pretvornika proizvedenega v podjetju, ki se ukvarja s proizvodnjo energetskih razsmernikov. Predpostavili bomo, da gre za veliko podjetje, ki proizvaja različne vrste razsmernikov v velikih serijah in ima organizacijsko strukturo razčlenjeno vsaj na proizvodnjo, nabavo, prodajo, finance in računovodstvo, raziskave in razvoj ter splošne službe.

Po uspešnem preizkušanju delovanja 1. prototipa in pridobitvi zahtevanih rezultatov glede zanesljivosti delovanja, kvalitete signalov, varnosti naprave in zadovoljevanja ostalih kriterijev lahko rečemo, da je izdelek s tehničnega vidika pripravljen za proizvodnjo. Pri odločanju podjetja o uvedbi novega izdelka v proizvodnjo igra zelo pomembno vlogo

lastna cena izdelka. Lastna cena izdelka mora biti ustrezno nizka, tako da lahko podjetje na trgu doseže konkurenčno prodajno ceno in pri tem ustvari pričakovan dobiček. Sestavine lastne cene so vsi v določenem obdobju nastali stroški, ki jih je mogoče neposredno ali posredno povezati z obravnavanim proizvodom. Metode za določitev lastne cene so razne vrste kalkulacij s katerimi prenesemo vse v obdobju nastale stroške na posamezne stroškovne nosilce.

V našem primeru ni mogoče izvesti kalkulacije lastne cene, saj nimamo podatkov o vseh izvornih stroških, ki bi nastali v podjetju v obdobju izdelave serije 10.000 kosov BI. Tudi v primeru, če bi poznali vse izvorne stroške, bi jih bilo brez vpogleda v računovodske evidence nemogoče razporediti na posamezne stroškovne nosilce. Podjetja smatrajo lastne cene proizvodov ter stroškovno strukturo posameznih stroškovnih nosilcev kot tajne podatke in jih ne želijo posredovati v javnost. Iz tega razloga smo lahko lastno ceno izdelka le ocenili na osnovi poznanih neposrednih stroškov materiala in storitev, delež neposrednih stroškov dela ter celotnih posrednih stroškov pa smo določili na osnovi neuradnih informacij s strani proizvajalcev.

#### 5.4.1 Neposredni stroški materiala

Neposredni stroški materiala so eden izmed ključnih sestavnih delov lastne cene proizvoda, katere je mogoče minimalizirati z dobrim delom na nabavnem področju in optimalno organizirano proizvodnjo. Ker predpostavljeno podjetje za izdelavo vseh vrst razsmernikov večinoma uporablja enake sestavne elemente ali v najslabšem primeru elemente istih proizvajalcev, ima običajno z dobavitelji (proizvajalci materiala ali veletrgovci) sklenjene pogodbe za odkup velikih količin materiala. Na osnovi teh pogodb je mogoče doseči zelo nizke nabavne cene materiala.

Kot temelj za sestavo seznama materiala potrebnega za proizvodnjo 10.000 kosov pretvornikov smo vzeli tabelo 5.5. Vse količine smo pomnožili z 10.000, nekatere med njimi zaradi drugačnega proizvodnega procesa prilagodili in zbrali informacije o cenah posameznih komponent ob naročilu velikih količin. Neposredni stroški materiala potrebnega za izdelavo celotne serije BI so prikazani v tabeli 5.8. Podatke o cenah smo pridobili na osnovi povpraševanja pri proizvajalcih in veletrgovcih.

Tabela 5.8: Neposredni stroški materiala pri proizvodnji 10.000 kosov BI

Zap. št.	Material	ME	Količina	Cena / ME (EUR / ME)	Vrednost (EUR)
1	DSP TMS320F2812PGFQ	kos	10.000	9,260	92.600,00
2	Dušilka 1mH	kos	20.000	5,210	104.200,00
3	Tranzistor IGBT Semikron SK 45 GB 063	kos	20.000	6,077	121.540,00
4	Kondenzator Vishay MKP 338 4 10 $\mu$ F	kos	150.000	1,050	157.500,00
5	DC/DC pretvornik NMA 0515D	kos	40.000	2,865	114.600,00
6	Optocoupler HCPL 3120	kos	40.000	0,945	37.800,00
7	Tokovni transformator LEM LTS 25 - NP	kos	20.000	4,200	84.000,00
8	Operacijski ojačevalnik MCP6231-E/SN	kos	50.000	0,186	9.300,00
9	Logična IN vrata HCT08	kos	10.000	0,183	1.830,00
10	Podnožje DSP	kos	50.000	0,190	9.500,00
11	Konektor SERIAL CON	kos	10.000	0,041	410,00
12	Konektor PX1_1X2	kos	40.000	0,030	1.200,00
13	Bipolarni tranzistor BC817	kos	40.000	0,022	880,00
14	Zener Dioda 3.3V	kos	30.000	0,060	1.800,00
15	Zener Dioda 5.1V	kos	40.000	0,055	2.200,00
16	Upor aksialni 0,25W 5k	kos	320.000	0,190	60.800,00
17	Upor SMD 1206 0e	kos	10.000	0,006	60,00
18	Upor SMD 1206 33e	kos	40.000	0,006	240,00
19	Upor SMD 1206 220e	kos	40.000	0,006	240,00
20	Upor SMD 1206 1k	kos	40.000	0,008	320,00
21	Upor SMD 1206 22k	kos	40.000	0,008	320,00
22	Upor SMD 0805 100e	kos	10.000	0,008	80,00
23	Upor SMD 0805 1k	kos	90.000	0,008	720,00
24	Upor SMD 0805 4,7k	kos	60.000	0,008	480,00
25	Upor SMD 0805 10k	kos	150.000	0,007	1.050,00
26	Upor SMD 0805 100k	kos	440.000	0,007	3.080,00
27	Kondenzator SMD 1206 1 $\mu$ F	kos	120.000	0,007	840,00
28	Kondenzator SMD 0805 10nF	kos	70.000	0,007	490,00
29	Kondenzator SMD 0805 100nF	kos	80.000	0,007	560,00
30	Vijaki M4	kos	140.000	0,085	11.900,00
31	Kovinska matica M4	kos	120.000	0,033	3.960,00
32	Distančniki	kos	120.000	0,095	11.400,00
33	Skrčna cev	kos	3.500	0,208	728,00
34	Vodnik 1,5 mm <sup>2</sup> rdeča	m	3.000	0,093	279,00
35	Vodnik 1,5 mm <sup>2</sup> črna	m	3.000	0,093	279,00
36	Cevni kabelski čevelj 1,5-4	kos	100.000	0,060	6.000,00
37	Žica za spajkanje	kg	30	11,55	346,50
38	Pasta za spajkanje	ml	3.000	0,180	540,00
39	Grafični LCD prikazovalnik	kos	10.000	15,485	154.850,00

40	Ohišje pretvornika	kos	10.000	12,350	123.500,00
41	Tiskano vezje	kos	10.000	7,000	70.000,00
<b>SKUPAJ</b>					<b>1.192.422,50</b>

Na seznam materiala je bilo potrebno dodati še pasto za spajkanje, ohišje pretvornika in tiskano vezje. Pasta za spajkanje je potrebna zaradi industrijskega spajkanja SMD komponent, ohišje pa za zaščito notranjosti pretvornika, varnost uporabnikov in estetski izgled. Izdelavo tiskanega vezja se je v fazi razvoja izdelka uvrščalo med neposredne stroške storitev, saj je posamezno vezje po naročilu izdelal nek zunanji izvajalec. V primeru serijske proizvodnje pa je pri naročilu 10.000 kosov enakih tiskanih vezij te mogoče šteti med neposredne stroške materiala.

#### 5.4.2 Neposredni stroški storitev

Med neposrednimi stroški storitev se pojavi storitev razvoja izdelka, ki jo je v našem primeru opravil Laboratorij za energetska elektronika na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Za proizvodno podjetje predstavlja to zunanjega izvajalca in tako vse stroške nastale v zvezi z razvojem izdelka in izdelavo 0. in 1. prototipa uvrstimo v neposredne stroške storitev, ki so prikazani v tabeli 5.9.

Tabela 5.9: Neposredni stroški storitev pri proizvodnji 10.000 kosov BI

Zap. št.	Storitev	ME	Količina	Cena / ME (EUR / ME)	Vrednost (EUR)
1	Razvoj izdelka	enota	1	26.145,81	26.145,81
<b>SKUPAJ</b>					<b>26.145,81</b>

#### 5.4.3 Ostali stroški

Med sestavine lastne cene sodijo še neposredni stroški dela, posredni stroški ustvarjanja učinkov in posredni stroški nakupovanja, prodajanja ter splošnih dejavnosti. V poglavju 5.1.3 so naštetni stroški razčlenjeni po posameznih sestavinah. Zaradi njihove kompleksne zgradbe jih za neko podjetje ne moremo določiti brez možnosti vpogleda v računovodske evidence. Dejanskih in točnih podatkov o sestavi stroškov, ki odpadejo na posamezen

proizvod, praktično sploh ne moremo dobiti, saj jih podjetja obravnavajo kot "zaupne" podatke. Tako smo za namen določitve lastne cene v našem primeru uporabili neuradne podatke o stroškovni strukturi, na osnovi katerih smo ocenili da bi neposredni materialni stroški in neposredni stroški storitev pri serijski proizvodnji razsmernikov predstavljali približno 60 % celotnih stroškov, ki odpadejo na posamezni proizvod. Neposredni stroški dela in vsi posredni stroški v lastni ceni proizvoda pa običajno predstavljajo približno enak delež.

#### 5.4.4 Lastna cena

Pri določitvi celotnih stroškov povezanih z BI smo izhajali iz neposrednih stroškov materiala in dela, za katere poznamo načrtovano vrednost. Ob upoštevanju, da slednji predstavljajo 60 % celotnih stroškov, neposredni stroški dela in vsi posredni stroški pa po 20 %, je v tabeli 5.10 predstavljena sestava lastne cene posameznega BI po vrstah stroškov.

Tabela 5.10: Sestava lastne cene BI pri proizvodnji 10.000 enot

<b>Opis</b>	<b>Delež (%)</b>	<b>Stroški (EUR)</b>	<b>Stroški / enoto (EUR / enoto)</b>
Neposredni stroški materiala	58,7	1.192.422,50	119,24
Neposredni stroški storitev	1,3	26.145,81	2,61
Neposredni stroški dela	20	406.189,44	40,62
Posredni stroški	20	406.189,44	40,62
<b>Skupaj</b>	<b>100</b>	<b>2.030.947,18</b>	<b>203,09</b>

Celotni stroški, ki so povezani s proizvodnjo BI znašajo 2.030.947,18 EUR. Če ta znesek podelimo s številom proizvedenih enot (10.000 kosov) dobimo stroške, ki odpadejo na posamezni proizvod. To imenujemo lastna cena izdelka in v našem primeru znaša 203,09 EUR.

## 5.5 Določitev prodajne cene izdelka

Pri proizvodnji izdelkov in storitev podjetje troši prvine poslovnega procesa, ki jih mora nenehno nadomeščati z novimi, saj sicer proizvodni proces zastane. S prodajo izdelkov in storitev podjetje pridobiva denarna sredstva, potrebna na nakup novih prvin. Prodajna cena, ki jo določi podjetje pa mora biti dovolj velika, da pokrije stroške porabe prvin in omogoči nadaljnji potek poslovnega procesa. Oblikovanje prodajnih cen pa se ne nanaša samo na tekoče poslovanje, temveč je pomembno tudi zaradi planiranja razvoja podjetja. Močan vpliv na oblikovanje in končno višino prodajnih cen ima tržno okolje v katerem se nahaja podjetje, saj je od stopnje konkurenčnosti odvisno, koliko svobode bo imelo podjetje pri določanju prodajne cene [12].

Oblikovanje cen v podjetju temelji na seriji odločitev, ki jih management sprejema na podlagi analize stroškov in tržnih razmer. V osnovi ločimo naslednje modele oblikovanja prodajnih cen [13]:

- oblikovanje prodajnih cen glede na stroške,
- oblikovanje prodajnih cen glede na povpraševanje,
- oblikovanje prodajnih cen glede na konkurente.

Za obravnavan izdelek bomo prodajno ceno določili na podlagi stroškov. Seveda to ne pomeni, da bo organizacija prodajala svoj poslovni učinek po prodajni ceni, ki je enaka stroškom, temveč bo k lastni ceni poslovnega učinka prištela še nek znesek. Ta znesek predstavlja dobiček in se v teoriji določa kot produkt med lastno ceno in količnikom dobička na stroške [13]:

$$\text{prodajna cena} = \text{lastna cena} + \frac{\text{dobiček}}{\text{stroški}} \times \text{lastna cena} \quad (5.1)$$

Pri določanju količnika dobička na stroške mora organizacija upoštevati potrebno oplajanje kapitala, potrebno oblikovanje rezerv, vračila posojil, davke, morebitne popuste pri normalni prodajni ceni in drugo. Tako dobimo nek minimalen dobiček, s katerim pa se organizacije običajno ne zadovoljijo in posledično se količnik dobička na stroške še dodatno poveča.

V našem primeru bomo predpostavili, da se je podjetje odločilo za količnik 2,5, ki bi vsekakor zagotovil sredstva za nadaljnji razvoj in poslovanje. Na osnovi določene lastne cene v podpoglavju 5.4.4 in enačbe (5.1) lahko izračunamo prodajno ceno BI:

$$\text{prodajna cena} = 203,09 + 2,5 \cdot 203,09 = 710,82 \text{ EUR}$$

Takšen način določevanja prodajne cene je primeren kadar na trgu ni konkurenčnih izdelkov. Za naš primer tega ne moremo trditi. Čeprav gre za novo tehnologijo omrežnih razsmernikov se na trgu pojavljajo izdelki s podobnimi lastnostmi. Trenutna prodajna cena 710,82 EUR je določena le na osnovi zelenega poslovnega izida organizacije, ki pa ga ta ne bo mogla doseči, če je izdelek veliko dražji kot konkurenčni. Za dokončno določitev prodajne cene je potrebno izvesti še krajšo tržno analizo omrežnih razsmernikov malih moči.

Rezultati analize so pokazali, da se prodajne cene (brez DDV) konkurenčnih proizvodov gibljejo nekje med 800 in 1400 EUR, odvisno od proizvajalca in predvsem od dodatnih funkcij, ki jih izdelek ponuja. Namen razvoja BI kot omrežnega razsmernika je zmanjšanje stroškov izdelave, vendar ne na račun kvalitete izhodnega signala, temveč na račun zmanjšanja števila polprevodniških komponent in priklopa na omrežje brez izhodnih filtrov. Ob upoštevanju, da naš izdelek nima vgrajenega Bluetooth vmesnika in še kakšnih dodatnih pomožnih funkcij, ki jih premorejo omrežni razsmerniki najvišjega cenovnega razreda, je pričakovano, da bo cenejši od konkurenčnih proizvodov. Tako lahko sedaj trdimo, da je prodajna cena 710,82 EUR primerna z vidika stroškov in poslovnega izida ter tudi z vidika primerjave s konkurenčnimi proizvodi.

## 6 EKONOMSKA UPRAVIČENOST PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE S FOTONAPETOSTNIM SISTEMOM

Že iz naslovna diplomskega dela ja razvidno, da je obravnavan Enostopenjski DC/AC pretvornik namenjen za uporabo pri proizvodnji električne energije s PV sistemom. V tem poglavju smo ga umestili v sistem mikro sončne elektrarne (v nadaljevanju MSE), ki bo vso proizvedeno električno energijo pošiljala v lokalno elektroenergetsko omrežje. V praksi se takšni sistemi običajno gradijo kot projekti na ključ. Cena klasičnih PV sistemov nameščenih na strehah ali na tleh, v povprečju znaša približno 5000 EUR/kWp inštalirane moči. Gledano z vidika cene na kWp inštalirane moči, so najdražje prav MSE, predvsem tiste katerih inštalirana moč znaša manj kot 10 kWp [4].

Ključen podatek za investitorje predstavlja čas vračanja vloženih sredstev ter dobiček, ki ga lahko ustvarijo z naložbo. Kakor za vse elektroenergetske objekte velja tudi za sončne elektrarne razmeroma dolg čas vračanja investicije, ki je praviloma najdaljši pri elektrarnah z majhno inštalirano močjo. Pri tem pa moramo imeti v mislih, da je prav za slednje največje število potencialnih investitorjev in največ primernih lokacij za namestitvev. Težko si je namreč predstavljati, kako bi namestili sončni generator z močjo 20 ali več kWp na streho stanovanjske hiše. Poleg tega večji sistem za seboj potegne tudi večjo investicijo, za katero pa danes, v času gospodarske krize, ni enostavno pridobiti sredstev.

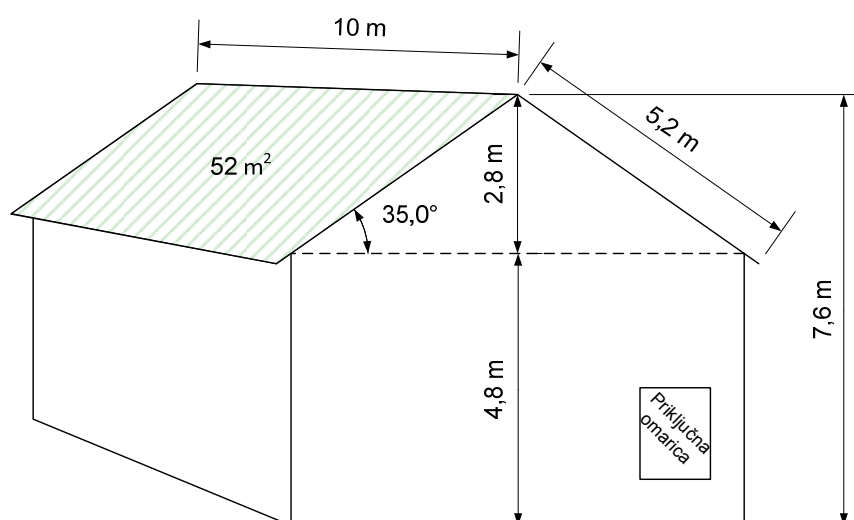
Zaradi omenjenih dejstev smo izvedli ekonomsko analizo, ki je zajemala analizo PV modulov, ki so na voljo na trgu, analizo in določitev povprečnih cen posameznih komponent PV sistema in izračun časa vračanja investicije v MSE, ob predpostavki, da je investitor v projekt vložil lastna sredstva. Želeli smo ugotoviti tudi kakšen vpliv ima izbira PV modulov na letno količino proizvedene električne energije ter na čas vračanja vloženih sredstev. Za izvedbo omenjenih analiz smo se morali dotakniti tudi projektiranja sončnih elektrarn. Pomagali smo si s programskim orodjem RETScreen, ki omogoča preproste analize projektov za izkoriščanje obnovljivih virov energije.



## 6.1 Referenčni objekt

V našem primeru smo se odločili za načrtovanje MSE, katere sončni generator bo nameščen na strehi stanovanjske hiše. Potrebno je bilo izbrati nek referenčni objekt, za katerega smo lahko določili lokacijske parametre. Analiza lokacije in ovrednotenje energijskega izplena sta zelo pomembna postopka pri načrtovanju PV sistema, saj imata močan vpliv na učinkovitost delovanja elektrarne in vračilno dobo naložbe. Pri tem je potrebno določiti potencial sončnega obsevanja, senčenje modulov ter določiti optimalni naklon modulov.

Skica referenčnega objekta z dimenzijami je prikazana na sliki 6.1. Gre za stanovanjsko hišo, ki se nahaja na obrobju mesta Maribor. Lokacija objekta omogoča ugodne pogoje za priključitev na elektroenergetsko omrežje. Sleme strehe poteka v smeri vzhod-zahod. Streha je iz opečne kritine, montažo sončnega generatorja pa smo predvideli na njeno južno krilo, ki predstavlja površino  $52 \text{ m}^2$ . V najboljšem primeru bi lahko nanjo namestili generator s skupno močjo 5-6 kWp, vendar moramo pri tem upoštevati tudi druge omejitve, kot so nosilnost strehe, tip kritine in podobno. Vpliva osenčenja modulov nismo podrobno obravnavali, zaradi ugodne lege objekta pa lahko trdimo, da je južno krilo strehe osončeno skozi vse leto od 9. do 15. ure, v poznih pomladanskih, poletnih ter zgodnjih jesenskih dneh pa tudi dlje.



Slika 6.1: Referenčni objekt

Naklon modulov na izkoristek nima takšnega vpliva kot osenčenje. Projektanti tudi predlagajo, da se za optimiranje naklona modulov ne namešča nosilnih konstrukcij, ki bi močno odstopale od površine strehe, saj lahko to predstavlja nevarnost v primeru močnejših vetrov. Tako smo se odločili, da bodo moduli nameščeni v ravnini strehe, kar v našem primeru pomeni pod kotom  $35^\circ$  glede na horizontalo. Takšen naklon je dejansko zelo blizu optimalnega naklona za geografski položaj Slovenije.

Osnovni podatek pri načrtovanju PV sistema je potencial sončnega sevanja na ravno ploskev. Podaja se kot povprečna vrednost sončnega obsevanja za tipični dan v mesecu. Podatki za mesto Maribor in njegovo okolico so podani v tabeli 6.1.

Tabela 6.1: Potencial sončnega sevanja za Maribor v [Wh/m<sup>2</sup>dan] [15]

JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC
<b>1510</b>	2440	3510	4240	5160	5320	5390	4810	3560	2240	1470	1170
<b>Letno povprečje</b>		3410									

Ti podatki veljajo za ploskev, ki je pod kotom  $0^\circ$  glede na horizontalo. Zato smo z uporabo programskega orodja RETScreen določili vrednosti, ki ustrezajo sončnemu sevanju na površino z naklonom  $35^\circ$ . Tako dobljene rezultate bomo v našem primeru uporabili kot osnovo pri izračunu letno proizvedene električne energije, prikazani pa so v tabeli 6.2.

Tabela 6.2: Povprečna vrednost sončnega obsevanja ploskve z naklonom  $35^\circ$  glede na horizontalo [Wh/m<sup>2</sup>dan]

JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC
<b>2800</b>	3850	4480	4580	5070	5010	5170	4990	4170	3090	2490	2200
<b>Letno povprečje</b>		3990									

Kar se tiče preostalih lokacijskih parametrov, sta predvsem pri načrtovanju nosilne konstrukcije, pomembna še karakteristična snežna obtežba in obremenitev zaradi vetra, ki pa na področju mesta Maribor ne predstavljata večjih nevarnosti.

## 6.2 Fotonapetostni sistem

Želeli smo sestaviti takšen sistem, ki bo omogočal uporabo BI kot omrežnega razsmernika. Odločili smo se za namestitev sončnega generatorja z močjo 3 kWp in za trifazno priključitev elektrarne na nizkonapetostno omrežje. Ključna komponenta vsakega takšnega sistema so PV moduli, ki tudi v ceni celotne sončne elektrarne zavzemajo največji delež. V nadaljevanju bo predstavljena izbira primernih modulov in določitev cene za izgradnjo celotnega sistema.

### 6.2.1 Sončni generator

V praksi se za izvedbo sončnih generatorjev najpogosteje uporabljajo polikristalni silicijevi moduli, ki zagotavljajo visoke izkoristke, dolgo življenjsko dobo ter sprejemljivo ceno. Z ekonomsko analizo naše sončne elektrarne smo med drugim želeli ugotoviti ali na trgu obstajajo PV moduli, ki bi se lahko s tehničnega in stroškovnega vidika kosali s polikristalnimi. Najprej smo poizkusili z moduli iz amorfne silicija, ki veljajo za cenovno ugodno možnost, ki bi zmanjšala višino začetne investicije. Imajo sicer zelo dobre lastnosti v pogojih slabše osvetljenosti, vendar pa zaradi slabega izkoristka, ki se giblje nekje med 6 in 8 %, z njihovo uporabo ne moremo doseči krajšega časa vračanja naložbe. V nadaljevanju smo preverili module iz hibridnih celic, ki so v osnovi zgrajene iz monokristalnega silicija na katerega je obojestransko nanesena tanka plast amorfne silicija. S tem se dosegajo zelo visoki izkoristki, tudi nad 17 %, vendar je posledica tega izredno visoka cena, ki močno podaljša vračilo vloženi sredstev v naš projekt. Nazadnje smo preverili še ponudbo monokristalnih silicijevih celic, ki so po električnih in mehanskih lastnostih zelo blizu polikristalnim. Imajo nekoliko višjo ceno, katero pa vsaj na prvi pogled odtehta boljši izkoristek in njegova stabilnost skozi življenjsko dobo modula. Podrobnejši rezultati tržne analize PV modulov so prikazani v prilogi 9.5.

Odločili smo se, da bomo za primerjavo analizirali dve MSE z inštalirano močjo 3 kWp, ob uporabi različnih sončnih generatorjev. Z namenom boljše cenovne primerljivosti smo v obeh primerih izbrali istega proizvajalca. Pri prvi bomo uporabili polikristalne module SHARP ND-167U1 in pri drugi monokristalne module SHARP NT-175U1. Osnovne karakteristike modulov so predstavljene v tabeli 6.3.

Tabela 6.3: Električne in mehanske karakteristike izbranih PV modulov

Modul		SHARP ND-167U1	SHARP NT-175U1
Vrsta celic		polikristalne silicijeve	monokristalne silicijeve
Električne karakteristike	Maksimalna moč ( $P_{MPP}$ )	167 W	175 W
	Nazivna napetost ( $U_n$ )	16 V	24 V
	Napetost odprtih sponk ( $U_{oc}$ )	29 V	44,4 V
	Napetost pri maksimalni moči ( $U_{MPP}$ )	23,5 V	35,4 V
	Tok pri maksimalni moči ( $I_{MPP}$ )	7,1 A	4,95 A
	Kratkostični tok ( $I_{sc}$ )	7,91 A	5,41 A
	Izkoristek modula	12,6 %	13,45 %
Mehanske karakteristike	Površina	1,33 m <sup>2</sup>	1,3 m <sup>2</sup>
	Teža	16 kg	16 kg
	Dimenzije	1328 x 1004 x 46 mm	1575 x 826 x 46 mm

Pri povezavi posameznih modulov v polje je potrebno upoštevati najvišjo dopustno napetost sistema, ki pa jo v našem primeru ne omejujejo moduli, temveč razsmernik. Med projektnimi zahtevami za izdelavo prototipa BI smo navedli, da je maksimalna vhodna napetost 50 V. Na osnovi uporabljenih komponent pri izdelavi pretvornika lahko v tej fazi trdimo, da je sposoben normalno delovati tudi pri vhodni napetosti 150 V. Za potrebe povezave PV modulov v sončni generator so v tabeli 6.4 podane osnovne električne karakteristike BI.

Tabela 6.4: Osnovne karakteristike Enostopenjskega DC/AC pretvornika

<b>Enostopenjski DC/AC pretvornik (BI)</b>		
<b>DC vhod</b>	Največja vhodna moč	1200 W
	Najvišji dopustni tok	50 A
	Območje napetosti	24 ÷ 150 V
<b>AC izhod</b>	Nazivna moč	1000 W
	Nazivna napetost	230 V
	Nazivni tok	4,35 A
	Izhodna frekvenca	50 Hz
<b>Ostali parametri</b>	Izkoristek	0,85
	Lastna raba (med obratovanjem)	4,25 W

Za izvedbo sončnega generatorja z močjo 3 kWp potrebujemo v obeh primerih 18 modulov. Z zaporednim povezovanjem slednjih v niz dosežemo želeno napetost, z vzporednim povezovanjem nizov pa želen tok in moč generatorja (sl. 2.2). Nazivni tok modula je enak nazivnemu toku niza, nazivna napetost niza pa nazivni napetosti generatorja. Maksimalno število modulov v nizu določimo kot količnik med maksimalno napetostjo sistema in napetostjo odprtih sponk modula. Glede na omejitve v zvezi z vhodno napetostjo razsmernika smo se odločili za razporeditev in vezavo modulov, ki je poleg osnovnih karakteristik sončnega generatorja, opisana v tabeli 6.5.

Tabela 6.5: Karakteristike sončnega generatorja

Karakteristike sončnega generatorja		
Vrsta modulov	SHARP ND-167U1	SHARP NT-175U1
Skupno število modulov	18	18
Število modulov v nizu	3	3
Število vzporedno povezanih nizov	6	6
Maksimalna moč ( $P_{MPP}$ )	3006 W	3150
Nazivna napetost ( $U_n$ )	48 V	72 V
Napetost odprtih sponk ( $U_{oc}$ )	87 V	133,2 V
Napetost pri maksimalni moči ( $U_{MPP}$ )	70,5 V	106,2 V
Tok pri maksimalni moči ( $I_{MPP}$ )	42,6 A	29,7 A
Kratkostični tok ( $I_{sc}$ )	47,46 A	32,46 A
Površina	23,94 m <sup>2</sup>	23,4 m <sup>2</sup>

### 6.2.2 Cena celotnega sistema

Za izračun časa vračanja investicije v MSE je potrebno zbrati podatke o cenah posameznih komponent in storitev. Cene izbranih PV modulov smo pridobili na osnovi povpraševanja pri dobaviteljih in zastopnikih. V prejšnjem poglavju smo tudi določili prodajno ceno za BI. V tej ceni še ni vračunan 20 % DDV, ki pa ga v tem primeru moramo upoštevati. Cene ostalih komponent in storitev v zvezi s projektiranjem in izgradnjo MSE pa smo ocenili na osnovi informacij podjetij, ki se ukvarjajo z gradnjo sončnih elektrarn na ključ. Predpostavili smo, da naš referenčni objekt v obstoječi priključni omarici nima dovolj prostora za namestitev dodatnega električnega števca s potrebnimi varovalkami ali inštalacijskimi odklopniki. Zato je potrebno v ceno sistema všteti tudi novo priključno omarico ter ceno njene montaže. V tabeli 6.6 so po posameznih komponentah in storitvah prikazani stroški izgradnje in načrtovanja MSE z inštalirano močjo 3 kWp, za oba primera

izbranih PV modulov. Oba projekta smo tudi poimenovali, in sicer MSE s polikristalnimi moduli kot MSE Poly 3kW, ter drug projekt kot MSE Mono 3kW.

Za trifazno priključitev MSE na nizkonapetostno omrežje smo predvideli uporabo treh BI. Ker gre za enofazne razsmernike, bo vsak priključen na svojo fazo. Delovali bodo po sistemu »master-slave«, kar pomeni da bo eden izmed njih deloval kot glavni razsmernik. Napetost na njegovem izhodu bo določala fazni kot  $0^\circ$ , medtem ko bosta izhodni napetosti na preostalih premaknjeni za  $120^\circ$ .

V ceni inštalacijskega materiala so poleg kablov za enosmerni in izmenični tok vključeni: priključna omarica, razdelilne omarice z varovalkami, prenapetostna zaščita in podobno. Stroški montaže zajemajo tudi ceno nosilne konstrukcije. Stroški načrtovanja elektrarne običajno predstavljajo 5 % celotnih stroškov izgradnje sistema, tako da smo v našem primeru pod postavko načrtovanje zapisali vrednost 600 EUR.

Tabela 6.6: Stroški izvedbe projekta MSE Poly 3kW in MSE Mono 3 kW

	MSE Poly 3kW			MSE Mono 3kW		
	Enot	Stroški / enoto (EUR / enoto)	Stroški (EUR)	Enot	Stroški / enoto (EUR / enoto)	Stroški (EUR)
PV moduli	18	261,50	4.707,00	18	492,50	8.865,00
Razsmernik (BI)	3	852,99	2.558,97	3	852,99	2.558,97
Inštalacijski material	1	1.800,00	1.800,00	1	1.800,00	1.800,00
Montaža	1	1.200,00	1.200,00	1	1.200,00	1.200,00
Načrtovanje	1	600,00	600,00	1	600,00	600,00
<b>Skupaj</b>			<b>10.865,97</b>			<b>15.023,97</b>

### 6.3 Čas vračanja investicije

Po določitvi celotnih stroškov projekta lahko preidemo na izračun časa vračanja vloženih sredstev, ki je za vlagatelje poleg donosnosti in višine vložka vsekakor najpomembnejša informacija. Krajši čas vračanja investicije bo v našem primeru za investitorja pomenil

večji dobiček iz naslova projekta MSE, saj je delovanje sončne elektrarne časovno omejeno z življenjsko dobo sončnih celic. Proizvajalci sončnih celic običajno ponujajo 25 letno garancijo na izhodno moč. Iz tega lahko sklepamo, da je tudi povprečna življenjska doba večine PV modulov 25 let. V našem primeru podjetje SHARP jamči, da bodo njihovi izdelki v prvih desetih letih pri optimalnem sončnem obsevanju dosegali nad 90 % nazivne moči in v nadaljnjih petnajstih letih nad 80 %.

Pri izračunu smo uporabili model linearnega padanja izkoristka PV modulov s časom za obdobje 25 let od pričetka obratovanja sončne elektrarne. Pri tem smo upoštevali praktična spoznanja, ki sicer govorijo v prid monokristalnemu modulom, katerih življenjska doba bi naj bila tudi več kot 25 let, izkoristek v prvih 20 letih delovanja pa zelo blizu podanemu v kataloških podatkih. V naslednjih letih naj bi sicer nekoliko padel, vendar ne pod 80 % začetne vrednosti. Polikristalni pa bi naj po 10 letih delovanja dosegali do 90 % nazivne moči, po 20 letih pa le še 80 % [4].

Poleg izkoristka PV modulov in razsmernika, je potrebno upoštevati še druge izgube, ki nastanejo pri prenosu energije od sončnega generatorja do priključne omarice, v kateri se nahaja števec. Na podlagi tokov pri maksimalni moči sistema, smo za oba primera MSE ocenili delež omenjenih izgub. Za MSE Poly 3kW znašajo približno 1,3 % in za MSE Mono 3kW okrog 0,7 %.

Pri izvedbi obeh projektov smo predpostavili, da bo investitor vložil lastna sredstva. Posledica tega je, da lahko na osnovi predvidenih stroškov izvedbe (tabela 6.6) neposredno določimo skupno višino investicije, odhodke pri obratovanju elektrarne pa bodo predstavljala le redna in izredna vzdrževalna dela ter zavarovanje.

Kakor smo že omenili, bo celotna električna energija proizvedena z MSE Poly 3kW ali MSE Mono 3 kW poslana v lokalno elektroenergetsko omrežje. Sklenila se bo tudi pogodba o zagotovljenem odkupu električne energije iz OVE, na osnovi katere bo vsa proizvedena energija odkupljena po ceni 415,46 EUR/MWh (tabela 2.2).

Pri določitvi časa vračanja vloženih sredstev pa moramo biti pozorni tudi na časovno vrednost denarja. Zaradi inflacije se vrednost denarja s časom zmanjšuje, tako da moramo vse denarne tokove v obdobju obratovanja elektrarne preračunati na neto sedanjo vrednost, se pravi na čas investicije. Preračun smo izvedli z uporabo enačbe (6.1), ki upošteva



stopnjo inflacije. V našem primeru smo računali z 2 % stopnjo inflacije, ki predstavlja tudi ciljno vrednost za države v evro območju.

$$SV = \frac{PV_n}{(1+i)^n} = PV_n \left( \frac{1}{1+i} \right)^n \quad (6.1)$$

kjer je:

$SV$  - sedanja vrednost

$PV_n$  - prihodnja vrednost po  $n$  obdobjih

$i$  - stopnja inflacije

$n$  - število obdobji

Postopek določitve časa vračanja investicije ter njegovi rezultati so prikazani v prilogi 9.6.1. Ugotovili smo, da se investicija v projekt MSE Poly 3kW povrne v 14 letnih in 2 mesecih ter da je po 25 letih mogoče ustvariti 6.424,12 EUR dobička. V primeru uporabe monokristalnih PV modulov pa je zaradi višjega začetnega vložka, kljub večji količini v omrežje poslani električne energije, čas vračanja naložbe daljši. Investicija se povrne v 17 letih in 11 mesecih, v obdobju 25 let pa je mogoče ustvariti dobiček v višini 4.975,24 EUR.

Za primerjavo smo izvedli še izračun ekonomske upravičenosti obeh projektov z uporabo programskega orodja RETScreen. Rezultati dobljeni po tej analizi so prikazani v prilogi 9.6.2. Opazimo, da v tem primeru dobimo ugodnejše rezultate, kot pri lastnem izračunu. Investicije se povrnejo v krajšem času in posledično je mogoče v enakem obdobju ustvariti tudi večji dobiček. Razlog za odstopanje med rezultati po vsej verjetnosti predstavlja upoštevanje izkoristka PV modulov. Pri analizi s programskim orodjem je skozi celotno obdobje delovanja elektrarne upoštevan izkoristek, ki ga podajajo proizvajalci, medtem ko smo mi predpostavili zelo stroge kriterije v zvezi s padanjem izkoristka z leti.

Rezultati računalniške metode in lastni izračun so pokazali, da so za namestitev na referenčni objekt bolj primerni polikristalni moduli SHARP ND-167U1. Imajo sicer nekoliko manjši izkoristek kot monokristalni, vendar se je izkazalo, da so zaradi nižje cene z ekonomskega vidika primernejši. V obdobju 25 let, za kolikor proizvajalec jamči njihovo visoko učinkovitost, zagotavljajo ugodnejši poslovni izid kot primerljivi. Prednosti v zvezi s tehničnimi karakteristikami pa ostajajo na strani monokristalnih, ki ponujajo boljše izkoristke ter daljšo življenjsko dobo.

## 7 ZAKLJUČEK

V sklopu diplomskega dela smo želeli ovrednotiti lastnosti enostopenjskega DC-AC pretvornika in primernost njegove uporabe kot omrežnega razsmernika v fotonapetostnem sistemu. Za omenjen pretvornik smo se odločili zaradi njegove enostavne topološke sheme in možnosti neposredne priključitve na elektroenergetsko omrežje.

Po fizični izdelavi prototipa in izvedbi programske podpore za njegovo delovanje smo opravili laboratorijske preizkuse. Na osnovi dobljenih rezultatov smo ugotovili, da pretvornik zgolj z uporabo pulzno-širinske modulacije ni sposoben zagotoviti izhodnega signala, ki bi imel popolno sinusno obliko. Pri izpeljavi modulacijske funkcije namreč nikakor ne moremo zajeti vseh nelinearnosti in upoštevati vseh odstopanj, ki so posledica uporabe realnih elementov. Iz tega razloga je potrebno v delovanje pretvornika uvesti zaprtozančno regulacijo. Ta bo na osnovi povratnih informacij o trenutnih vrednostih opazovanih veličin sposobna odpraviti vsa odstopanja od sinusne oblike napetosti in toka na izhodu pretvornika.

Na podlagi dobljenih rezultatov preizkušanja smo določili izkoristek pretvornika, ki je znašal le 79 %. Tukaj je potrebno omeniti, da ta vrednost ni primerljiva s tehničnimi podatki, ki jih za svoje proizvode podajajo proizvajalci omrežnih razsmernikov. Na napisnih ploščicah so namreč vedno prikazane najboljše možne vrednosti, ki se dosežejo s preizkusi pri nazivni moči in optimalnih razmerah delovanja naprave. V našem primeru smo preizkus izvedli pri veliko manjši moči od nazivne. Posledica tega je, da izgube na posameznih elementih vezja predstavljajo velik delež v energijski bilanci pretvornika in imajo močan vpliv na izkoristek.

Prototip enostopenjskega DC-AC pretvornika, kakršnega smo izdelali v sklopu te diplomske naloge, ima določene pomanjkljivosti, ki jih je potrebno pred uporabo v omrežno priključeni sončni elektrarni odpraviti. Izvesti je potrebno zaprtozančno regulacijo in funkcijo sledenja točki največje moči, ki jo premore vsak dober omrežni

razsmernik. Implementacijo omenjenih izboljšav smo predvideli pri izdelavi naslednjega prototipa in v končnem izdelku, ki bo namenjen serijski proizvodnji.

Obravnavan enostopenjski DC-AC pretvornik se je s stroškovnega vidika izkazal kot primerna alternativa klasičnim razsmernikom. Kot posledico nizkih neposrednih materialnih stroškov smo ugotovili tudi nizko lastno ceno izdelka. Slednja proizvajalcem omogoča določitev konkurenčne prodajne cene, hkrati pa zagotavlja visok dobiček, ki je potreben za nadaljnji razvoj. V našem primeru smo določili prodajno ceno 710,82 EUR, kar je občutno nižje od vseh primerljivih konkurenčnih izdelkov, ki so na voljo na trgu.

Če se poglobimo v delovanje in »življenjski cikel« omrežne sončne elektrarne ugotovimo, da sta tako čas vračanja investicije kot donosnost tesno povezana s stroški izgradnje, saj so obratovalni stroški praktično zanemarljivi. Po opravljeni analizi ekonomske upravičenosti lahko trdimo, da se investicija v fotonapetostni sistem ob trenutno razpoložljivih državnih podporah, povrne v približno 15 letih, v naslednjih letih pa za investitorja predstavlja vir čistega dobička.

Zaradi majhnega potrebnega prostora za izgradnjo, številnih primernih lokacij in zagotovljenega povračila vloženih sredstev lahko v prihodnosti pričakujemo nadaljevanje trenda naraščanja sončnih elektrarn. Posledično se bodo nižale cene in zaostрила konkurenca na trgu fotonapetostnih sistemov in posameznih komponent. To bo proizvajalce prisililo v uvedbo novih vrst razsmernikov, ki bodo z manjšimi dimenzijami, višjimi izkoristki in nižjo ceno podjetjem zagotavljali konkurenčno prednost na trgu. S tega vidika uporaba enostopenjskega DC-AC pretvornika vsekakor predstavlja velik potencial za nadaljnji razvoj.

## 8 VIRI IN LITERATURA

- [1] R.O. Cáceres, I. Barbi, *A boost DC-AC converter: Analysis, design, and experimentation*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 1, januar 1999, pp. 134 – 141.
- [2] N. Vázquez, C. Aguilar, J. Arau, R.O. Cáceres, I. Barbi, J. A. Gallegos, *A novel uninterruptible power supply system with active power factor correction*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, no. 3, maj 2002, pp. 405 – 412.
- [3] J. Voršič, A. Orgulan, *Pretvarjanje v električno energijo*, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 1996.
- [4] D. Lenardič, *Fotonapetostni sistemi: priročnik*, Agencija Poti, Ljubljana, 2009.
- [5] D. Brečević, P. Lajevec, A. Bučar, *Pomen obnovljivih virov v energetske oskrbi Slovenije*, IREET Inštitut za raziskave v energetiki, ekologiji in tehnologiji, Ljubljana, 2003.
- [6] Uradni List RS, *Energetski zakon*, št. 27, pp. 3550 – 3576, Ljubljana, 2007.
- [7] Uradni List RS, *Uredba o izdaji deklaracij za proizvodne naprave in potrdil o izvoru električne energije*, št. 8/2009, pp. 594 – 609, Ljubljana, 2009.
- [8] Uradni List RS, *Uredba o podporah električni energiji, proizvedeni iz obnovljivih virov energije*, št. 37/2009, pp. 5248 – 5279, Ljubljana, 2009.
- [9] M. Milanovič, *Močnostna elektronika*, 1. izd., Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2007.
- [10] T.L. Skvarenina (ur.), *The power electronics handbook*, CRC Press, 2002.
- [11] F. Mihalič, *Energetska elektronika*, 1. izd., Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2006.
- [12] M. Rebernik, *Ekonomika podjetja*, 4. izd., GV Založba, Ljubljana, 2008.
- [13] I. Turk, *Uvod v poslovno ekonomiko*, Slovenski inštitut za revizijo, Ljubljana, 2006.
- [14] Uradni List RS, *Slovenski računovodski standardi*, št. 118/2005, pp. 13488 – 13612, Ljubljana, 2005.
- [15] NASA, *Surface Meteorology and Solar Energy: RETScreen data*, oktober 2009. Dostopno na: <http://eosweb.larc.nasa.gov>

## 9 PRILOGE

### 9.1 Izračun valovitosti toka skozi dušilko

Projektne zahteve:

$$U_d = 26 \div 50 \text{ V};$$

$$U_o = 230 \text{ V};$$

$$P = 1 \text{ kW};$$

$$f_s = 25 \text{ kHz};$$

$$R_b = \frac{U_o^2}{P} = \frac{230^2}{1000} = 52,9 \text{ } \Omega \quad (4.3)$$

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{25 \cdot 10^3} = 40 \text{ } \mu\text{s} \quad (4.4)$$

---

a)  $U_{d,\min} \Rightarrow U_d = 26 \text{ V}$

$$U_{\max} = 1,2U_d + \sqrt{2}U_o = 1,2 \cdot 26 + \sqrt{2} \cdot 230 = 356,47 \text{ V} \quad (4.1)$$

$$U_{\text{DC}} = 1,2U_d + \frac{\sqrt{2}U_o}{2} = 1,2 \cdot 26 + \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{2} = 193,83 \text{ V} \quad (4.2)$$

$$\Delta p_{\max} = 1 - \frac{U_d}{U_{\max}} = 1 - \frac{26}{356,47} = 0,927 \quad (4.5)$$

$$G'_m = \frac{2(U_{\text{DC}} - U_d)}{U_d} = \frac{2 \cdot (193,83 - 26)}{26} = 12,91 \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
 I_{L\max} &= \frac{2\Delta p_{\max} - G'_m(1 - \Delta p_{\max})}{(1 - \Delta p_{\max})^2} \cdot \frac{U_d}{R_b} = \\
 &= \frac{2 \cdot 0,927 - 12,91 \cdot (1 - 0,927)}{(1 - 0,927)^2} \cdot \frac{26}{52,9} = 84,07 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\frac{\Delta I_L}{I_{L\max}} = \frac{U_d \Delta p_{\max} T_s}{I_{L\max} L} = \frac{26 \cdot 0,927 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{84,07 \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{0,0382}} \tag{4.8}$$

b)  $U_{d,\max} \Rightarrow U_d = 50 \text{ V}$

$$U_{\max} = 1,2U_d + \sqrt{2}U_o = 1,2 \cdot 50 + \sqrt{2} \cdot 230 = 385,27 \text{ V} \tag{4.1}$$

$$U_{DC} = 1,2U_d + \frac{\sqrt{2}U_o}{2} = 1,2 \cdot 50 + \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{2} = 222,63 \text{ V} \tag{4.2}$$

$$\Delta p_{\max} = 1 - \frac{U_d}{U_{\max}} = 1 - \frac{50}{385,27} = 0,870 \tag{4.5}$$

$$G'_m = \frac{2(U_{DC} - U_d)}{U_d} = \frac{2 \cdot (222,63 - 50)}{50} = 6,91 \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
 I_{L\max} &= \frac{2\Delta p_{\max} - G'_m(1 - \Delta p_{\max})}{(1 - \Delta p_{\max})^2} \cdot \frac{U_d}{R_b} = \\
 &= \frac{2 \cdot 0,870 - 6,91 \cdot (1 - 0,870)}{(1 - 0,870)^2} \cdot \frac{50}{52,9} = 47,07 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\frac{\Delta I_L}{I_{L\max}} = \frac{U_d \Delta p_{\max} T_s}{I_{L\max} L} = \frac{50 \cdot 0,870 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{47,07 \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{0,1232}} \tag{4.8}$$

## 9.2 Izračun potrebne kapacitivnosti

Projektne zahteve:

$$U_d = 26 \div 50 \text{ V};$$

$$U_o = 230 \text{ V};$$

$$P = 1 \text{ kW};$$

$$f_s = 25 \text{ kHz};$$

Valovitost napetosti:

$$\frac{\Delta U}{\hat{U}_o} = 0,015$$

$$R_b = \frac{U_o^2}{P} = \frac{230^2}{1000} = 52,9 \Omega \quad (4.3)$$

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{25 \cdot 10^3} = 40 \mu\text{s} \quad (4.4)$$

a)  $U_{d,\min} \Rightarrow U_d = 26 \text{ V}$

$$U_{\max} = 1,2U_d + \sqrt{2}U_o = 1,2 \cdot 26 + \sqrt{2} \cdot 230 = 356,47 \text{ V} \quad (4.1)$$

$$\Delta p_{\max} = 1 - \frac{U_d}{U_{\max}} = 1 - \frac{26}{356,47} = 0,927 \quad (4.5)$$

$$C = \frac{\Delta p T_s}{(\Delta U / \hat{U}_o) R_b} = \frac{0,927 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{0,015 \cdot 52,9} = \underline{\underline{46,73 \mu\text{F}}} \quad (4.14)$$

$$\text{b) } U_{d,\max} \Rightarrow U_d = 50 \text{ V}$$

$$U_{\max} = 1,2U_d + \sqrt{2}U_o = 1,2 \cdot 50 + \sqrt{2} \cdot 230 = 385,27 \text{ V} \quad (4.1)$$

$$\Delta p_{\max} = 1 - \frac{U_d}{U_{\max}} = 1 - \frac{50}{385,27} = 0,870 \quad (4.5)$$

$$C = \frac{\Delta p T_s}{(\Delta U / \hat{U}_o) R_b} = \frac{0,870 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{0,015 \cdot 52,9} = \underline{\underline{43,86 \mu\text{F}}} \quad (4.14)$$



### 9.3 Izpeljava funkcije prevajalnega razmerja

Iz enačbe (3.3) izrazimo prevajalno razmerje  $\Delta p$ :

$$\Delta p = 1 - \frac{U_d}{U_o} \quad (8.1)$$

Na osnovi slike 4.5 zapišemo enačbi za  $u_1$  in  $u_2$ :

$$u_1 = U_{DC} + \hat{U} \sin(\omega t) = 1,2U_d + \hat{U} + \hat{U} \sin(\omega t) = 1,2U_d + \hat{U}(1 + \sin(\omega t)) \quad (8.2)$$

$$u_2 = U_{DC} - \hat{U} \sin(\omega t) = 1,2U_d + \hat{U} - \hat{U} \sin(\omega t) = 1,2U_d + \hat{U}(1 - \sin(\omega t)) \quad (8.3)$$

Dobljeni enačbi podelimo z  $U_d$ :

$$\frac{u_1}{U_d} = 1,2 + \frac{\hat{U}}{U_d}(1 + \sin(\omega t)) \quad (8.4)$$

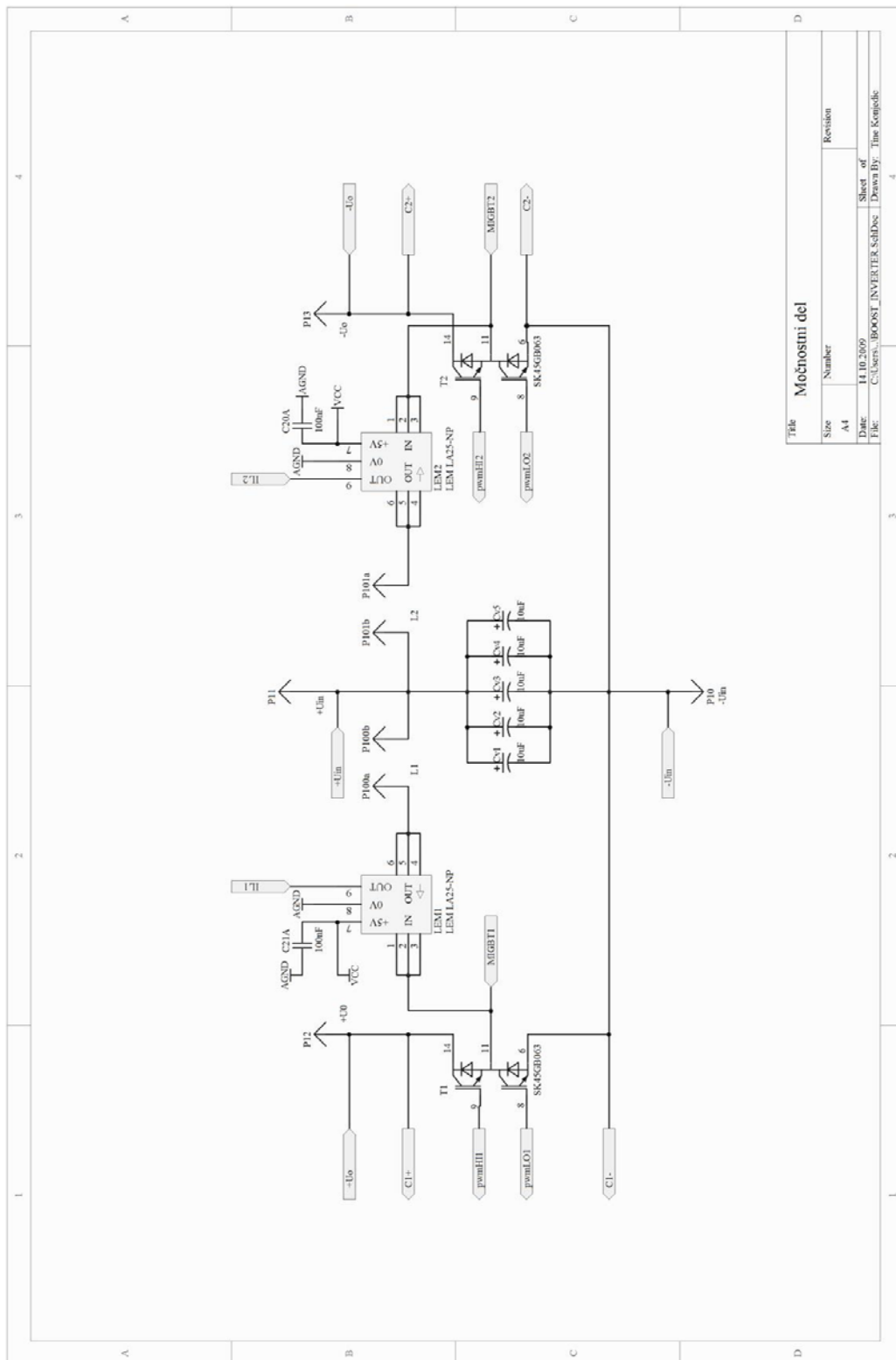
$$\frac{u_2}{U_d} = 1,2 + \frac{\hat{U}}{U_d}(1 - \sin(\omega t)) \quad (8.5)$$

Ker v našem primeru velja  $U_o = u_1$  in  $U_o = u_2$ , lahko v enačbo (8.1) vstavimo izraza (8.4) in (8.5) ter tako dobimo končni enačbi za prevajalno razmerje:

$$\Delta p_1 = 1 - \frac{1}{1,2 + \left(\frac{\hat{U}}{U_d}\right)(1 + \sin(\omega t))} \quad (8.6)$$

$$\Delta p_2 = 1 - \frac{1}{1,2 + \left(\frac{\hat{U}}{U_d}\right)(1 - \sin(\omega t))} \quad (8.7)$$

9.4 Vežalne sheme in načrt tiskanega vezja



Slika 9.1: Vežalna shema močnostnega dela BI

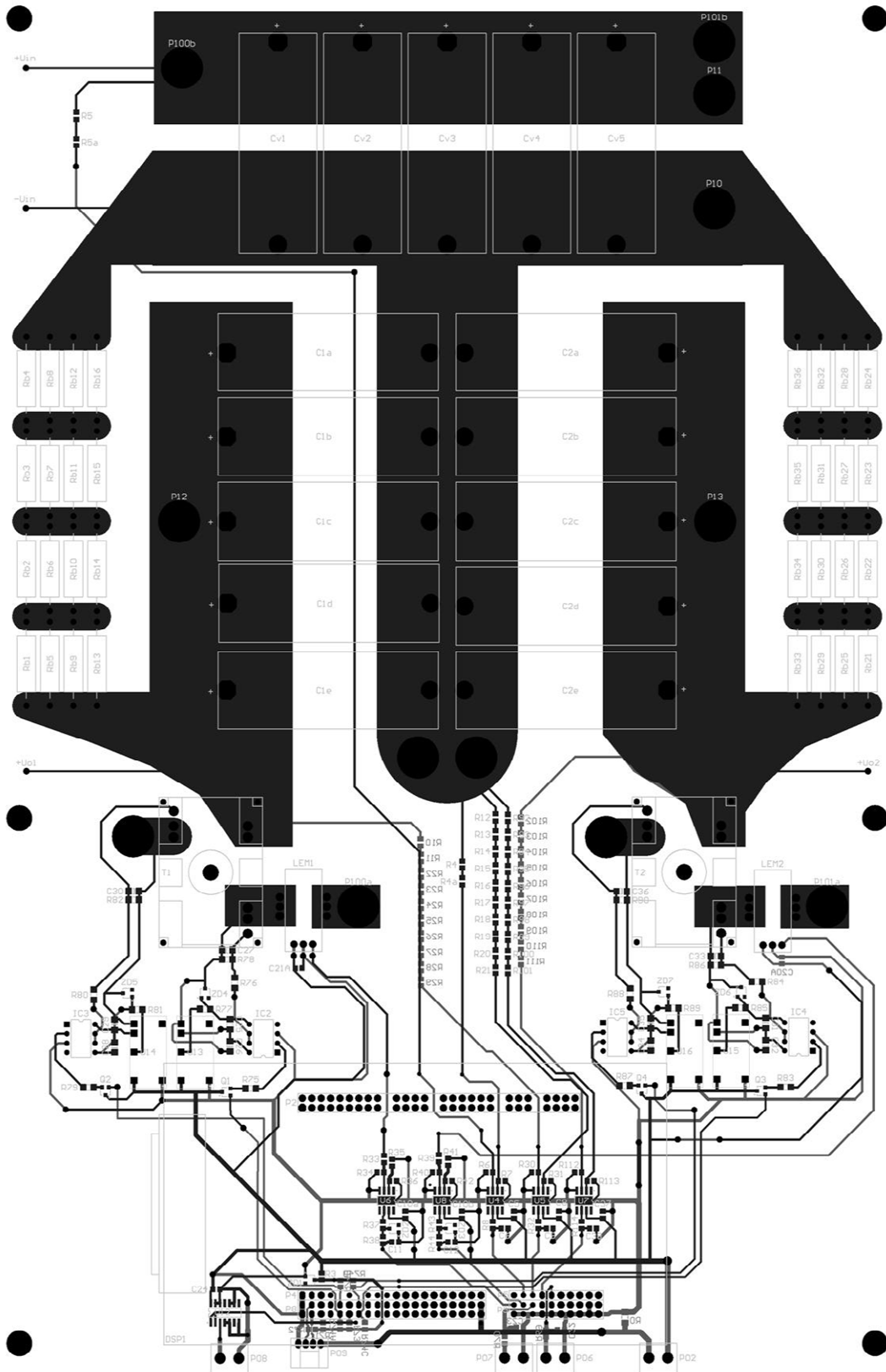
Slika 9.2: Vežalna shema kondenzatorjev in uporov na izhodu obeh vej BI

Slika 9.3: Vežalna shema izhodov in vhodov procesorske karte

Slika 9.4: Vezalna shema prožilne stopnje

Slika 9.5: Vežalna shema diferenčne vezave operacijskih ojačevalnikov za meritev napetosti

Slika 9.6: Vezalna shema diferenčne vezave operacijskih ojačevalnikov za meritev tokov



Slika 9.7: Načrt tiskanega vezja BI



## 9.5 Rezultati tržne analize PV modulov

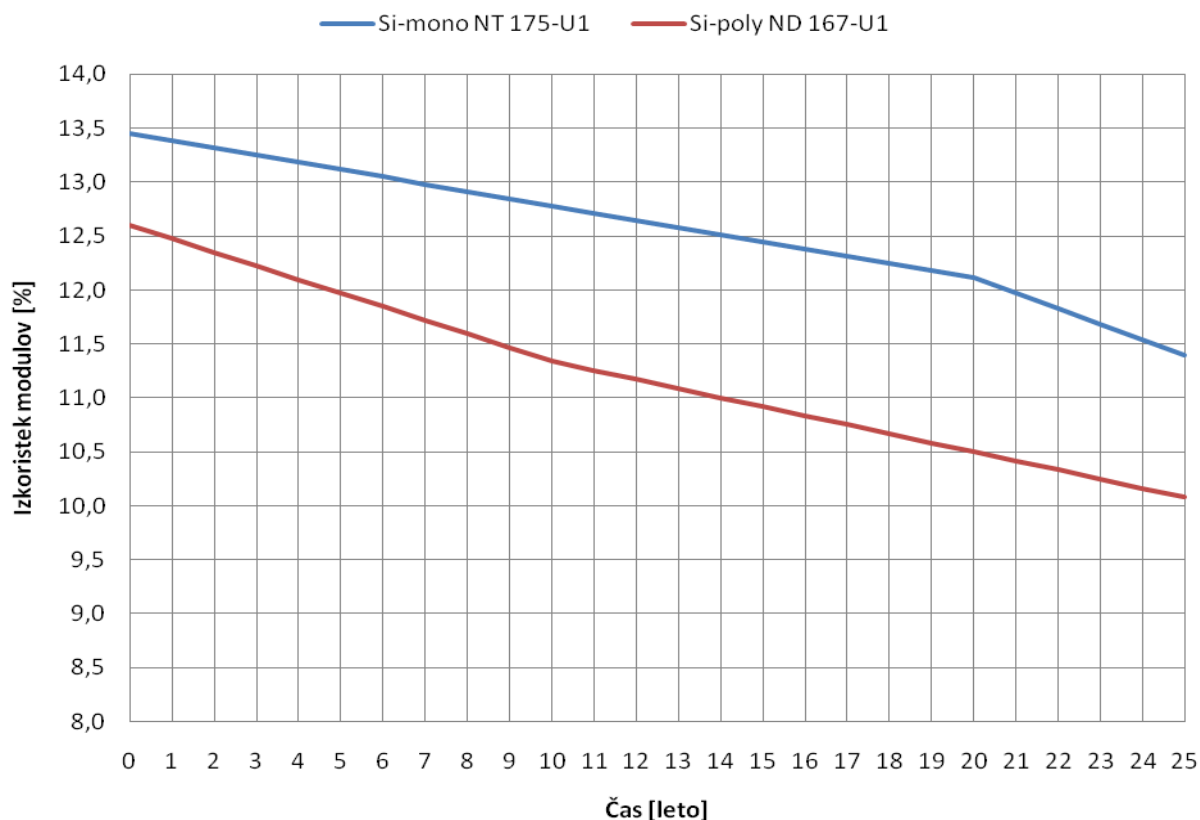
Tabela 9.1: Podatki analiziranih PV modulov

Modul		SHARP ND-167U1	SANYO HIP-205BA19	UNI-SOLAR PVL-144W	SHARP NT-175U1
Vrsta celic		polikristalne silicijeve	hibridne (HIT)	amorfne silicijeve	monokristalne silicijeve
Cena [EUR]		261,50	640,73	242,50	492,50
Električne karakteristike	Maksimalna moč ( $P_{MPP}$ )	167 W	205 W	144 W	175 W
	Nazivna napetost ( $U_n$ )	16 V	40 V	24 V	24 V
	Napetost odprtih sponk ( $U_{oc}$ )	29 V	68,8 V	46,2 V	44,4 V
	Napetost pri maksimalni moči ( $U_{MPP}$ )	23,5 V	56,7 V	33 V	35,4 V
	Tok pri maksimalni moči ( $I_{MPP}$ )	7,1 A	3,62 A	4,36 A	4,95 A
	Kratkostični tok ( $I_{sc}$ )	7,91 A	3,84 A	5,3 A	5,41 A
	Izkoristek modula	12,6 %	17,7 %	6,7 %	13,45 %
Mehanske karakteristike	Površina	1,33 m <sup>2</sup>	1,16 m <sup>2</sup>	2,16 m <sup>2</sup>	1,3 m <sup>2</sup>
	Teža	16 kg	15 kg	7,7 kg	16 kg
	Dimenzije	1328 x 1004 x 46 mm	1319 x 880 x 46 mm	5486 x 394 x 16 mm	1575 x 826 x 46 mm

## 9.6 Ekonomska upravičenost MSE

### 9.6.1 Ročni izračun

Najprej smo določili izkoristek izbranih modulov, za katerega smo predpostavili, da linearno pada v posameznih časovnih intervalih. Na sliki je 9.8 je prikazana primerjava izkoristkov uporabljenih monokristalnih in polikristalnih modulov.



Slika 9.8: Primerjava izkoristka monokristalnih in polikristalnih modulov skozi obdobje delovanja MSE

V naslednjem koraku je bilo potrebno določiti količino v omrežje poslano električne energije v vseh letih delovanja. Pri tem smo upoštevali letno povprečno vrednost sončnega obsevanja ploskve z naklonom  $35^\circ$  (tabela 6.2). V izračun je bilo potrebno vključiti tudi izkoristke vseh komponent ter izgube sistema. Povprečno v omrežje poslano električno energijo v enem letu smo izračunali po enačbi:

$$W_{\text{exp}} = H_{35^\circ} S_{\text{sg}} N \eta_m \eta_{\text{Bl}} \left( 1 - \frac{P_{\text{izg}}}{P} \right) \quad (8.8)$$

kjer je:

- $W_{\text{exp}}$  - povprečna letna v omrežje poslana električna energija
- $H_{35^\circ}$  - povprečna vrednost sončnega obsevanja ploskve z naklonom  $35^\circ$
- $S_{\text{sg}}$  - površina sončnega generatorja
- $N$  - število dni v letu
- $\eta_m$  - izkoristek PV modula
- $\eta_{\text{Bl}}$  - izkoristek razsmernika
- $P_{\text{izg}} / P$  - delež izgub preostalih izgub sistema

Izvedli smo tudi izračun denarnih tokov v vsakem letu. Prihodke od prodane električne energije smo določili tako, da smo povprečno letno v omrežje poslano električno energijo pomnožili z odkupno ceno, ki jo določa pogodba o zagotovljenem odkupu električne energije iz OVE (415,46 EUR/MWh). Odhodke pri delovanju MSE predstavljajo stroški rednih in izrednih vzdrževalnih del ter stroški zavarovanja, ki smo jih ocenili 500 EUR/leto. Tako smo lahko določili tudi neto denarni tok, ki predstavlja razliko med prihodki in odhodki v posameznem obdobju. Rezultati izračunov za MSE Poly 3kW in MSE Mono 3kW so prikazani v tabelah 9.2 in 9.3.

Tabela 9.2: Izračun neto denarnega toka za MSE Poly 3kW ob upoštevanju naslednjih podatkov:

$$H_{35^\circ} = 3,97 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dan}; S_{\text{sg}} = 23,94 \text{ m}^2; N = 365 \text{ dni}; \eta_{\text{BI}} = 0,85; P_{\text{izg}} / P = 0,013.$$

MSE Poly 3kW					
Leto	$\eta_m$ [%]	$W_{\text{exp}}$ [MWh]	Prihodki [EUR]	Odhodki [EUR]	Neto denarni tok [EUR]
1	12,537	3,649	1515,89	500	1015,89
2	12,411	3,612	1500,65	500	1000,65
3	12,285	3,575	1485,42	500	985,42
4	12,159	3,539	1470,18	500	970,18
5	12,033	3,502	1454,95	500	954,95
6	11,907	3,465	1439,71	500	939,71
7	11,781	3,429	1424,48	500	924,48
8	11,655	3,392	1409,24	500	909,24
9	11,529	3,355	1394,01	500	894,01
10	11,403	3,319	1378,77	500	878,77
11	11,298	3,288	1366,07	500	866,07
12	11,214	3,264	1355,92	500	855,92
13	11,130	3,239	1345,76	500	845,76
14	11,046	3,215	1335,60	500	835,60
15	10,962	3,190	1325,45	500	825,45
16	10,878	3,166	1315,29	500	815,29
17	10,794	3,141	1305,13	500	805,13
18	10,710	3,117	1294,98	500	794,98
19	10,626	3,093	1284,82	500	784,82
20	10,542	3,068	1274,66	500	774,66
21	10,458	3,044	1264,51	500	764,51
22	10,374	3,019	1254,35	500	754,35
23	10,290	2,995	1244,19	500	744,19
24	10,206	2,970	1234,04	500	734,04
25	10,122	2,946	1223,88	500	723,88

Tabela 9.3: Izračun neto denarnega toka za MSE Mono 3kW ob upoštevanju naslednjih podatkov:

$$H_{35^\circ} = 3,97 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dan} ; S_{\text{sg}} = 23,4 \text{ m}^2 ; N = 365 \text{ dni} ; \eta_{\text{BI}} = 0,85 ; P_{\text{izg}} / P = 0,007 .$$

MSE Mono 3kW					
Leto	$\eta_m$ [%]	$W_{\text{exp}}$ [MWh]	Prihodki [EUR]	Odhodki [EUR]	Neto denarni tok [EUR]
1	13,417	3,840	1595,28	500	1095,28
2	13,350	3,821	1587,31	500	1087,31
3	13,283	3,801	1579,34	500	1079,34
4	13,216	3,782	1571,38	500	1071,38
5	13,149	3,763	1563,41	500	1063,41
6	13,082	3,744	1555,44	500	1055,44
7	13,015	3,725	1547,48	500	1047,48
8	12,948	3,706	1539,51	500	1039,51
9	12,881	3,686	1531,54	500	1031,54
10	12,814	3,667	1523,58	500	1023,58
11	12,747	3,648	1515,61	500	1015,61
12	12,680	3,629	1507,64	500	1007,64
13	12,613	3,610	1499,68	500	999,68
14	12,546	3,591	1491,71	500	991,71
15	12,479	3,571	1483,74	500	983,74
16	12,412	3,552	1475,78	500	975,78
17	12,345	3,533	1467,81	500	967,81
18	12,278	3,514	1459,84	500	959,84
19	12,211	3,495	1451,88	500	951,88
20	12,144	3,475	1443,91	500	943,91
21	12,039	3,446	1431,49	500	931,49
22	11,897	3,405	1414,60	500	914,60
23	11,755	3,364	1397,72	500	897,72
24	11,613	3,324	1380,83	500	880,83
25	11,471	3,283	1363,95	500	863,95

Na osnovi podatkov iz zgornjih tabel smo določili čas vračanja investicije za oba projekta. Vse prihodnje vrednosti neto denarnega toka smo preračunali na neto sedanjo vrednost v času investicije. Rezultati so prikazani v tabelah 9.4 in 9.5.

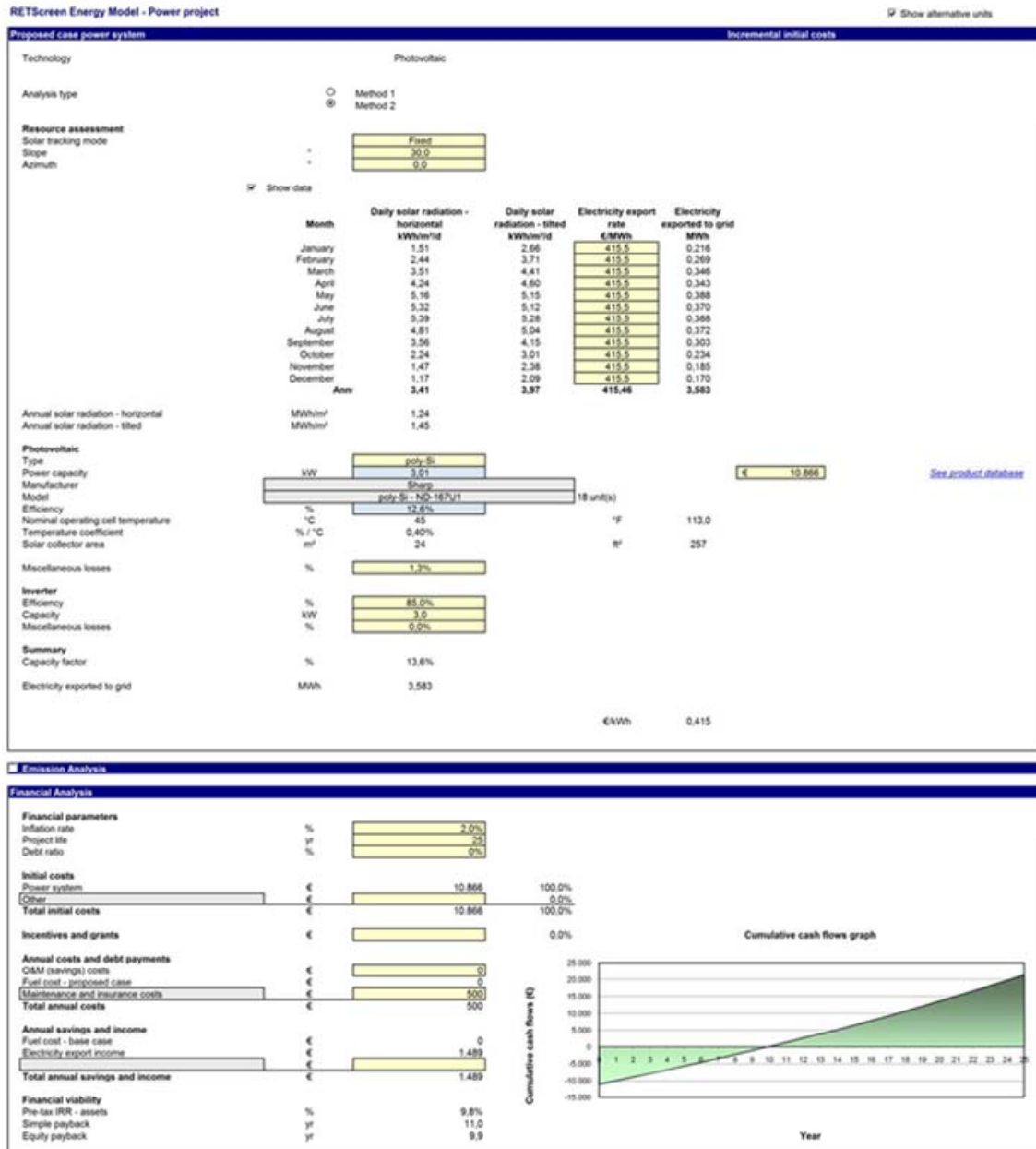
Tabela 9.4: Izračun časa vračanja investicije v projekt MSE Poly 3kW

<b>MSE Poly 3kW</b>			
Leto	Investicija [EUR]	Neto denarni tok [EUR]	Kumulativa [EUR]
1	-10865,97	1015,89	-9850,08
2	-9850,08	981,03	-8869,05
3	-8869,05	947,15	-7921,90
4	-7921,90	914,22	-7007,68
5	-7007,68	882,22	-6125,46
6	-6125,46	851,12	-5274,33
7	-5274,33	820,91	-4453,43
8	-4453,43	791,55	-3661,88
9	-3661,88	763,02	-2898,85
10	-2898,85	735,32	-2163,54
11	-2163,54	710,48	-1453,05
12	-1453,05	688,38	-764,67
13	-764,67	666,88	-97,79
14	-97,79	645,95	548,15
15	548,15	625,59	1173,74
16	1173,74	605,77	1779,51
17	1779,51	586,50	2366,01
18	2366,01	567,74	2933,75
19	2933,75	549,50	3483,25
20	3483,25	531,75	4015,01
21	4015,01	514,49	4529,50
22	4529,50	497,70	5027,20
23	5027,20	481,37	5508,58
24	5508,58	465,49	5974,07
25	5974,07	450,05	6424,12

Tabela 9.5: Izračun časa vračanja investicije v projekt MSE Mono 3kW

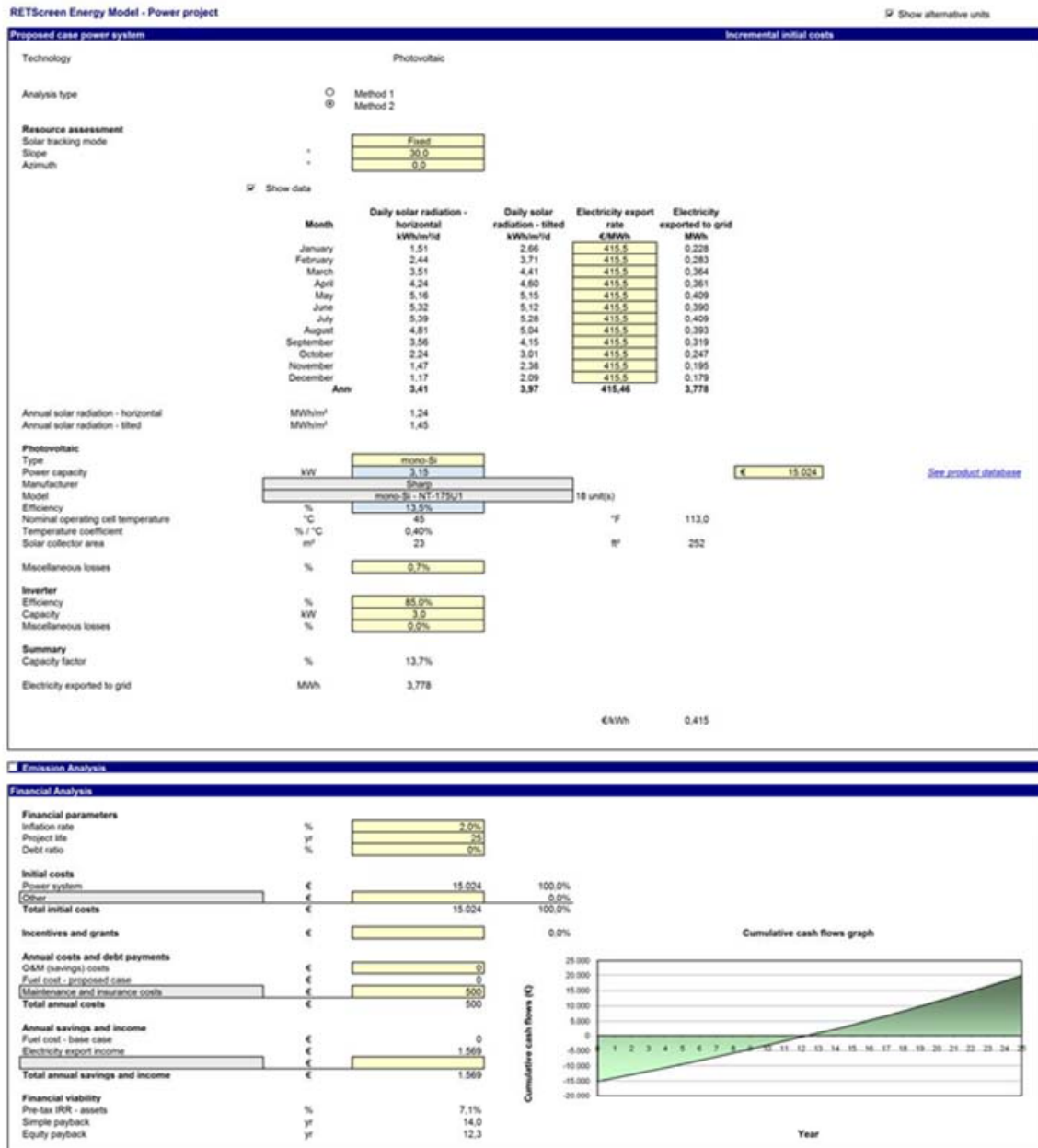
<b>MSE Mono 3kW</b>			
Leto	Investicija [EUR]	Neto denarni tok [EUR]	Kumulativa [EUR]
1	-15023,97	1095,28	-13928,69
2	-13928,69	1065,99	-12862,70
3	-12862,70	1037,43	-11825,27
4	-11825,27	1009,58	-10815,69
5	-10815,69	982,43	-9833,27
6	-9833,27	955,95	-8877,32
7	-8877,32	930,13	-7947,19
8	-7947,19	904,96	-7042,23
9	-7042,23	880,41	-6161,82
10	-6161,82	856,48	-5305,34
11	-5305,34	833,15	-4472,18
12	-4472,18	810,41	-3661,77
13	-3661,77	788,24	-2873,53
14	-2873,53	766,62	-2106,91
15	-2106,91	745,56	-1361,35
16	-1361,35	725,02	-636,34
17	-636,34	705,00	68,66
18	68,66	685,48	754,15
19	754,15	666,47	1420,61
20	1420,61	647,93	2068,54
21	2068,54	626,86	2695,41
22	2695,41	603,43	3298,84
23	3298,84	580,68	3879,52
24	3879,52	558,59	4438,10
25	4438,10	537,14	4975,24

9.6.2 Analiza s pomočjo programskega orodja RETScreen



Slika 9.9: Analiza ekonomske upravičenosti projekta MSE Poly 3kW





Slika 9.10: Analiza ekonomske upravičenosti projekta MSE Mono 3kW

## 9.7 Seznam slik

Slika 2.1: Zgradba in način delovanja sončne celice [4].....	5
Slika 2.2: Povezava modulov v polje in uporaba zaščitnih elementov (diod in varovalk) [4].....	10
Slika 2.3: Omrežni razsmerniki.....	11
Slika 3.1: Časovni potek napetosti in prevajalno razmerje DC-DC pretvornika.....	18
Slika 3.2: Pretvornik navzdol.....	19
Slika 3.3: Časovni potek stikalne funkcije, napetosti in tokov ter nadomestno vezje pretvornika navzdol pri a) vklopljenem stikalu in b) izklopljenem stikalu.....	20
Slika 3.4: Pretvornik navzgor.....	21
Slika 3.5: Časovni potek stikalne funkcije, napetosti in tokov ter nadomestno vezje pretvornika navzgor pri a) vklopljenem stikalu in b) izklopljenem stikalu.....	22
Slika 3.6: Valovitost toka skozi dušilko.....	23
Slika 3.7: Časovni potek toka skozi diodo $i_D$ in izhodne napetosti $u_O$ za analizo valovitosti izhodne napetosti.....	24
Slika 3.8: Enofazni razsmernik.....	26
Slika 3.9: Časovni potek izhodne napetosti $u_O$ enofaznega razsmernika pri čistem ohmskem bremenu.....	26
Slika 3.10: Trifazni razsmernik.....	27
Slika 3.11: Blokovna shema BI.....	28
Slika 3.12: Časovni poteki napetosti na izhodu pretvornika A in B ter izhodne napetosti BI.....	28
Slika 3.13: Enostopenjski DC-AC pretvornik navzgor.....	29
Slika 4.1: Uporabljeno C – jedro MH-205 A 11 (vse dimenzije so v mm).....	33
Slika 4.2: Vezava dveh IGBT tranzistorjev znotraj ohišja SEMITOP <sup>®</sup> 2.....	39
Slika 4.3: Časovni potek signalov na izhodu DSP (CHI: PWM1 – 2V/del; CHII: PWM2 – 2V/del; časovna baza: 20 $\mu$ s).....	42
Slika 4.4: Prikaz mrtvih časov med PWM1 in PWM2 (CHI: PWM1 – 1V/del; CHII: PWM2 – 1V/del; časovna baza: 5 $\mu$ s).....	42
Slika 4.5: Časovna poteka napetosti $u_1$ in $u_2$ , ki jih želimo generirati na izhodu obeh vej pretvornika.....	43
Slika 4.6: Z uporabo RC člena prefiltriran PWM signal na izhodu DSP: $\hat{U} / U_d = 5,5$ , $R = 10 \text{ k}\Omega$ , $C = 470 \text{ nF}$ . (CHI: PWM1 – 0,5V/del; CHII: PWM2 – 0,5V/del; časovna baza: 5 ms).....	45
Slika 4.7: Topološka shema realiziranega BI.....	46
Slika 4.8: Časovni poteki pulzov stikalne funkcije PWM1 in PWM2 (CHI: PWM1 – 10V/del; CHII: PWM2 – 10V/del; časovna baza: 20 $\mu$ s).....	48

Slika 4.9: Časovni potek izhodne napetosti $u_o$ in toka $i_o$ pri obremenjenem pretvorniku in ojačanju $\hat{U}/U_d = 2$ (CHI: $U_o - 40\text{V/del}$ ; CHII: $I_o - 0,5 \text{ A/del}$ ; časovna baza: 5 ms)	49
Slika 4.10: Časovni potek napetosti na eni veji pretvornika $u_1$ in toka skozi dušilko $i_{L1}$ pri obremenjenem pretvorniku in ojačanju $\hat{U}/U_d = 2$ (CHI: $u_1 - 40\text{V/del}$ ; CHII: $i_{L1} - 5 \text{ A/del}$ ; časovna baza: 5 ms)	49
Slika 4.11: Časovni potek izhodne napetosti $u_o$ v prostem teku pri ojačanju $\hat{U}/U_d = 2$ (CHI: $U_o - 100\text{V/del}$ ; časovna baza: 5 ms)	50
Slika 4.12: Časovni potek izhodne napetosti $u_o$ in toka $i_o$ pri obremenjenem pretvorniku in ojačanju $\hat{U}/U_d = 5,5$ (CHI: $U_o - 100\text{V/del}$ ; CHII: $I_o - 1 \text{ A/del}$ ; časovna baza: 10 ms)	51
Slika 4.13: Časovni potek izhodne napetosti $u_o$ v prostem teku pri ojačanju $\hat{U}/U_d = 5,5$ (CHI: $U_o - 200\text{V/del}$ ; časovna baza: 10 ms)	51
Slika 4.14: Statična karakteristika pretvornika navzgor (modra – idealni elementi, zelena – realni elementi)	53
Slika 6.1: Referenčni objekt	75
Slika 9.1: Vezalna shema močnostnega dela BI	92
Slika 9.2: Vezalna shema kondenzatorjev in uporov na izhodu obeh vej BI	93
Slika 9.3: Vezalna shema izhodov in vhodov procesorske karte	94
Slika 9.4: Vezalna shema prožilne stopnje	95
Slika 9.5: Vezalna shema diferenčne vezave operacijskih ojačevalnikov za meritev napetosti	96
Slika 9.6: Vezalna shema diferenčne vezave operacijskih ojačevalnikov za meritev tokov	97
Slika 9.7: Načrt tiskanega vezja BI	98
Slika 9.8: Primerjava izkoristka monokristalnih in polikristalnih modulov skozi obdobje delovanja MSE	100
Slika 9.9: Analiza ekonomske upravičenosti projekta MSE Poly 3kW	106
Slika 9.10: Analiza ekonomske upravičenosti projekta MSE Mono 3kW	107

## 9.8 Seznam tabel

Tabela 2.1: Značilnosti najpogosteje uporabljenih sončnih celic [4].....	6
Tabela 2.2: Cene zagotovljenega odkupa električne energije in obratovne podpore glede na uporabljeni OVE in velikostni razred proizvodne naprave [8] .....	15
Tabela 5.1: Neposredni stroški materiala za enostopenjski DC/AC pretvornik.....	60
Tabela 5.2: Neposredni stroški storitev za enostopenjski DC/AC pretvornik.....	61
Tabela 5.3: Neposredni stroški dela za enostopenjski DC/AC pretvornik.....	62
Tabela 5.4: Stroški razvoja in izdelave Enostopenjskega DC/AC pretvornika.....	63
Tabela 5.5: Neposredni stroški materiala 1. prototipa.....	64
Tabela 5.6: Neposredni stroški dela 1. prototipa.....	66
Tabela 5.7: Celotni stroški razvoja in izdelave Enostopenjskega DC/AC pretvornika.....	67
Tabela 5.8: Neposredni stroški materiala pri proizvodnji 10.000 kosov BI.....	69
Tabela 5.9: Neposredni stroški storitev pri proizvodnji 10.000 kosov BI.....	70
Tabela 5.10: Sestava lastne cene BI pri proizvodnji 10.000 enot .....	71
Tabela 6.1: Potencial sončnega sevanja za Maribor v [Wh/m <sup>2</sup> dan] [15] .....	76
Tabela 6.2: Povprečna vrednost sončnega obsevanja ploskve z naklonom 35° glede na horizontalo [Wh/m <sup>2</sup> dan] .....	76
Tabela 6.3: Električne in mehanske karakteristike izbranih PV modulov .....	78
Tabela 6.4: Osnovne karakteristike Enostopenjskega DC/AC pretvornika .....	79
Tabela 6.5: Karakteristike sončnega generatorja .....	80
Tabela 6.6: Stroški izvedbe projekta MSE Poly 3kW in MSE Mono 3 kW .....	81
Tabela 9.1: Podatki analiziranih PV modulov.....	99
Tabela 9.2: Izračun neto denarnega toka za MSE Poly 3kW ob upoštevanju naslednjih podatkov: $H_{35^\circ} = 3,97 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dan}$ ; $S_{sg} = 23,94 \text{ m}^2$ ; $N = 365 \text{ dni}$ ; $\eta_{BI} = 0,85$ ; $P_{izg} / P = 0,013$ . .....	102
Tabela 9.3: Izračun neto denarnega toka za MSE Mono 3kW ob upoštevanju naslednjih podatkov: $H_{35^\circ} = 3,97 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dan}$ ; $S_{sg} = 23,4 \text{ m}^2$ ; $N = 365 \text{ dni}$ ; $\eta_{BI} = 0,85$ ; $P_{izg} / P = 0,007$ . .....	103
Tabela 9.4: Izračun časa vračanja investicije v projekt MSE Poly 3kW.....	104
Tabela 9.5: Izračun časa vračanja investicije v projekt MSE Mono 3kW .....	105

## 9.9 Kratek življenjepis

Tine Konjedic

Ulica Staneta Severja 20

2000 Maribor

[tine.konjedic@uni-mb.si](mailto:tine.konjedic@uni-mb.si)

Datum rojstva: 3. 6. 1985

Kraj rojstva: Maribor

Država rojstva: Slovenija

Šolanje:	1992 – 2000	OŠ Tabor I, Maribor
	2000 – 2004	Srednja elektro-računalniška šola Maribor, program: Tehniška gimnazija
	2004 – 2009	Univerza v Mariboru, FERI + EPF študijski program: Gospodarsko inženirstvo smer: Elektrotehnika usmeritev: Močnostna elektrotehnika