

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Peter Pišljar

Krmilnik LED svetilke z visoko svetilnostjo
DIPLOMSKO DELO NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

Ljubljana 2012
UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Peter Pišljar

Krmilnik LED svetilke z visoko svetilnostjo
DIPLOMSKO DELO NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

Mentor: prof. dr. Dušan Kodek

Ljubljana 2012



Št. naloge: 01871/2012

Datum: 01.10.2012

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **PETER PIŠLJAR**

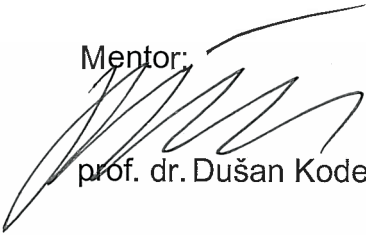
Naslov: **KRMILNIK LED SVETILKE Z VISOKO SVETILNOSTJO**
CONTROLLER FOR HIGH LUMINOSITY LED LAMP

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija

Tematika naloge:

Moderne LED svetilke kot je Cree XML imajo visoko svetilnost in dolgo življenjsko dobo. Če pa želimo doseči visok izkoristek in dolgo delovanje pri baterijskem napajanju, postane njihovo krmiljenje razmeroma zapleteno. Zasnujte in izdelajte krmilnik za baterijsko napajano LED svetilko, ki ima največjo svetilnost 2000 lumnov. Krmilnik naj omogoča spreminjanje svetilnosti ob pogoju, da je pri največji svetilnosti izkoristek višji od 90% in pri najmanjši ne pod 70%. Izberite ustrezen mikrokrmilnik in skupaj z drugimi komponentami izdelajte svetilko. Izdelajte tudi vso potrebno programsko opremo. Pravilnost delovanja preizkusite in podajte možne načine za izboljšave.

Mentor:


prof. dr. Dušan Kodek

Dekan:


prof. dr. Nikolaj Zimic



IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani/-a PETER PIŠLJAR,

z vpisno številko 63050481,

sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom:

KRMILNIK LED SVETILKE Z VISOKO SVETILNOSTJO

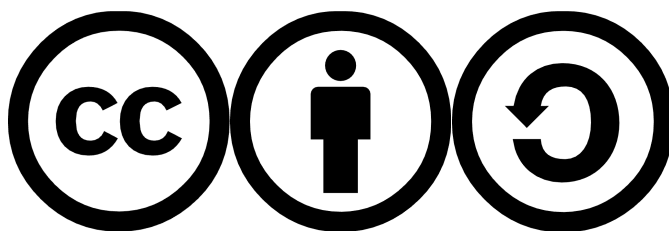
S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)
prof. dr. Dušan Kodek
in somentorstvom (naziv, ime in priimek)

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne _____ Podpis avtorja/-ice: _____

To delo je ponujeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 2.5 Slovenija (ali novejšo različico). To pomeni, da se tako besedilo, slike, grafi in druge sestavine dela kot tudi rezultati diplomskega dela lahko prosto distribuirajo, reproducirajo, uporabljajo, priobčujejo javnosti in predelujejo, pod pogojem, da se jasno in vidno navede avtorja in naslov tega dela in da se v primeru spremembe, preoblikovanja ali uporabe tega dela v svojem delu, lahko distribuira predelava le pod licenco, ki je enaka tej. Podrobnosti licence so dostopne na spletni strani creativecommons.si ali na Inštitutu za intelektualno lastnino, Streliška 1, 1000 Ljubljana.



Izvorna koda diplomskega dela, njeni rezultati in v ta namen razvita programska oprema je ponujena pod licenco GNU General Public License, različica 3 (ali novejša). To pomeni, da se lahko prosto distribuira in/ali predeluje pod njenimi pogoji. Podrobnosti licence so dostopne na spletni strani <http://www.gnu.org/licenses/>.

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Dušanu Kodeku za vse napotke, odgovore in strokovno pomoč. Zahvala gre tudi staršem ter puncu Marjeti za podporo. Zahvalil bi se še vsem prijateljem in znancem za vsako pomoč in trenutke, ki smo jih delili skupaj.

Kazalo

Povzetek	1
Ključne besede:.....	1
Abstract.....	2
Keywords:	2
1. Uvod.....	3
1.1. LED Svetilke.....	3
1.2. LED dioda.....	3
1.3. Primerjava z drugimi tipi svetil	4
1.4. Krmiljenje LED diode	4
1.4.1. Zaporedna vezava upora.....	5
1.4.2. Preklopni pretvorniki.....	6
1.5. Pretvornik navzdol	7
1.5.1. Pretvornik navzdol kot del vezja za krmiljenje LED diode.....	9
2. Načrtovanje vezja.....	10
2.1. Izračun elementov vezja za krmiljenje LED diode.....	11
2.1.1. Tranzistor MOSFET	12
2.1.2. Dioda	13
2.1.3. Tuljava.....	14
2.1.4. Izhodni kondenzator	14
2.1.1. Vhodni kondenzator	15
2.1.2. Upor	16
2.2. Izkoristek	16
2.3. Možne izboljšave vezja.....	17
2.3.1. Dioda	17

2.3.2.	Tuljava	18
2.4.	Izračuni za različne stopnje svetilnosti	18
2.5.	Izračuni za različne napetosti na bateriji.....	19
2.6.	Presluh zaradi preklapljanja tranzistorja.....	19
2.7.	Mikrokrmilnik.....	20
2.8.	Shema.....	22
2.9.	Tiskano vezje	23
3.	Simulacija z orodjem SPICE.....	25
4.	Izdelava programa	29
4.1.	Inicializacija.....	30
4.2.	Branje vhodov	30
4.2.1.	Preverjanje baterije	30
4.2.2.	Preverjanje temperature.....	31
4.2.3.	Preverjanje toka skozi LED diodi.....	31
4.2.4.	Preverjanje tipke	31
4.3.	Nastavljanje parametrov TOK0 in TOK2.....	32
4.4.	Nastavljanje izhodov OCR0 in OCR2	33
5.	Meritve	34
6.	Sklepne ugotovitve.....	38
7.	Kazalo slik.....	39
8.	Kazalo tabel.....	39
9.	Literatura	40

Seznam uporabljenih kratic in simbolov

ADC	ang. Analog to Digital Converter – analogno digitalni pretvornik
AREF	ang. Analog Reference – analogna referenčna napetost
CFL	ang. Compact Fluorescent Lamp – kompaktna fluorescentna svetilka
DC	ang. Direct current – enosmerna napetost
GND	ang. Ground – ozemljitev
HPS	ang. Hight Pressure Sodium – natrij pod visokim pritiskom
LED	ang. Light Emitting Diode – LED dioda
LiPO	ang. Lithium-ion Polimer battery – litijeva baterija
MH	ang. Metal Halide – halogenska svetilka
OCR	ang. Output Compare Register – register za primerjavo izhoda
PWM	ang. Pulse Width Modulation – širinska impolzna modulacija
VCC	vir napetosti

Povzetek

Cilj diplomske naloge je bil izdelati baterijsko LED svetilko z visokim izkoristkom. Svetilka uporablja LED diode z visoko svetilnostjo CREE XML. Te diode dosežejo svetilnost 100 lumnov na watt, največja dovoljena moč pa je 10W. Svetilka uporablja dve taki diodi in tako doseže svetilnost 2000 lumnov pri 20W.

V prvem poglavju so opisane LED diode ter krmiljenje le-teh. Podane so osnove enačbe pretvornika navzdol in opis uporabe pretvornika navzdol kot del vezja za krmiljenje LED diode.

Svetilka sestoji iz strojnega in programskega dela. V drugem poglavju je opisano načrtovanje strojnega dela. Strojni del je sestavljen iz mikrokrmilnika ATtiny861, ki upravlja z delovanjem svetilke, in dveh vezij za krmiljenje LED diod. Vezji za krmiljenje LED diod sta zasnovani okrog pretvornika navzdol, ki višjo vhodno napetost pretvori v nižjo.

V tretjem poglavju so prikazane simulacije strojnega dela, ki so bile izdelane z orodjem SPICE. SPICE je splošno namenski odprtokodni program za analizo in simulacijo analognih elektronskih vezij.

V četrtem poglavju je opisan še programski del, ki je odgovoren za pravilno upravljanje z obema vezjama za krmiljenje LED diod. Program v zanki stalno preverja tok skozi LED diodi in ustrezno nastavlja delovni cikel. Poleg upravljanja z vezjem za krmiljenje LED diod program nadzira tudi porabo baterije ter temperaturo vezja. Za upravljanje s svetilko je dodan tudi gumb, ki spreminja delovanje programa.

Na koncu so bile izvedene še meritve, s katerimi je bilo preverjeno pravilno delovanje izdelanega vezja.

Ključne besede:

Pretvornik navzdol, krmilnik LED diod, poraba baterije

Abstract

The purpose of this thesis was to build a high efficiency driver for LED lamp. Lamp uses two high brightness LED diodes Cree XML. This LEDs achieve light output of 100 lumens per watt, with maximum power rating of 10W. With two such LEDs lamp achieves light output of 2000 lumens at 20W.

In the first chapter LEDs and their driving circuits are described. Chapter continues with basic equations for buck converter and a description of using the buck converter as a part of circuit for controlling LEDs.

The thesis covers hardware and software aspect of the lamp. The second chapter provides descriptions of designing and building the hardware part. Hardware is designed around ATTiny861 microcontroller. Microcontroller manages all lamp functions including LED control. LED controller is based on a buck converter which converts higher input voltage to lower.

In the third chapter simulation of hardware is described. Simulations were made with SPICE simulator. SPICE is general purpose open source program for analysis and simulation of analog electronic circuits.

The fourth chapter provides descriptions of software which runs on the microcontroller. Software is constantly checking current over LEDs and properly corrects the duty cycle. Besides controlling LEDs software it also monitors battery level and circuit temperature. A single button is used to switch between different modes of operation.

At the end tests were made to assure correct working of the designed circuit.

Keywords:

Buck converter, LED driver, battery control

1. Uvod

1.1. LED Svetilke

LED svetilke so vrsta svetilk, ki za izvor svetlobe uporabljajo LED diode. Njihova glavna prednost je dolga življenska doba in visok energijski izkoristek. Njihova slabost v primerjavi s konvencionalnimi svetilkami je predvsem cena in kompleksnost. Prav tako kot pri ostalih svetilkah se tudi pri LED svetilkah njihova svetilnost z uporabo zmanjšuje.

Čeprav so LED diode že dolgo na trgu, so se LED svetilke pojavile šele v zadnjem času. Razloga za to sta dva. Prvi razlog je, da je za svetilko potrebna bela svetloba. LED diodo, ki bi oddajala belo svetlobo, so prvič izdelali šele leta 1996. Pred tem se je za doseganje bele ali kakršnekoli druge barve svetlobe uporabljala kombinacija treh LED diod z osnovnimi barvami, rdečo, zeleno in modro. Drugi razlog je, da za uporabno svetilko potrebujemo višjo svetilnost kot jo oddajajo klasične LED diode. Prvo LED diodo z visoko svetilnostjo so izdelali leta 1993. Izum LED diod z belo barvo in visoko svetilnostjo je okrog leta 2000 pripeljal do razvoja prvih LED svetilk.

1.2. LED dioda

LED dioda je polprevodniški element, ki pri prevajanju toka oddaja svetlobo. Prve LED diode so se na trgu pojavile leta 1962. Oddajale so rdečo svetlobo in imele zelo nizko svetilnost. Od tu naprej se je razvoj zelo hitro nadaljeval. Leta 1972 so se pojavile prve LED diode, ki so oddajale rumeno barvo, LED diodam rdeče barve pa se je svetilnost že povečala za desetkrat. Do leta 1990 so bile na voljo LED diode v različnih barvah, še vedno pa ni bilo mogoče izdelati LED diode, ki bi oddajala belo svetlobo. Bela svetloba je kombinacija vseh barv, posamezna LED dioda pa je lahko oddajala le eno valovno dolžino svetlobe. V devetdesetih letih so se na trgu pojavile prve LED diode z visoko svetilnostjo prav tako pa tudi prve LED diode, ki so oddajale belo svetlobo.

LED diode z visoko svetilnostjo prevajajo tok od 100mA do nekaj amperov. Za primerjavo omenimo, da klasične LED diode prevajajo le nekaj deset miliamperov. Danes je na trgu kar nekaj proizvajalcev takih diod. Med njimi prednjači podjetje CREE. Podjetje CREE je leta 2006 predstavilo prvo LED diodo, ki presega svetilnost 100 lumnov na watt pri toku 20mA. Leta 2010 so predstavili prvo LED diodo, ki presega svetilnost 200 lumnov na watt pri toku 350mA. Leta 2011 pa so predstavili LED diodo CREE XML, ki ima svetilnost 100 lumnov na watt moči. Največja moč te LED diode je 10W, svetilnost pa tako znaša kar 1000 lumnov. Največji dovoljen tok pri tej LED diodi je 3A.

Poleg podjetja CREE je pri razvoju LED diod zelo opazno še podjetje Nichia, z izdelavo pa se ukvarja še mnogo drugih podjetij.

1.3. Primerjava z drugimi tipi svetil

Za primerjavo si pogledajmo kakšne so svetilnosti pri drugih vrstah svetil. V tabeli 1 so podane tipične svetilnosti za nekatere najbolj uporabljene vrste svetil. Poleg svetilnosti izražene v lumnih na watt je podana še življenska doba.

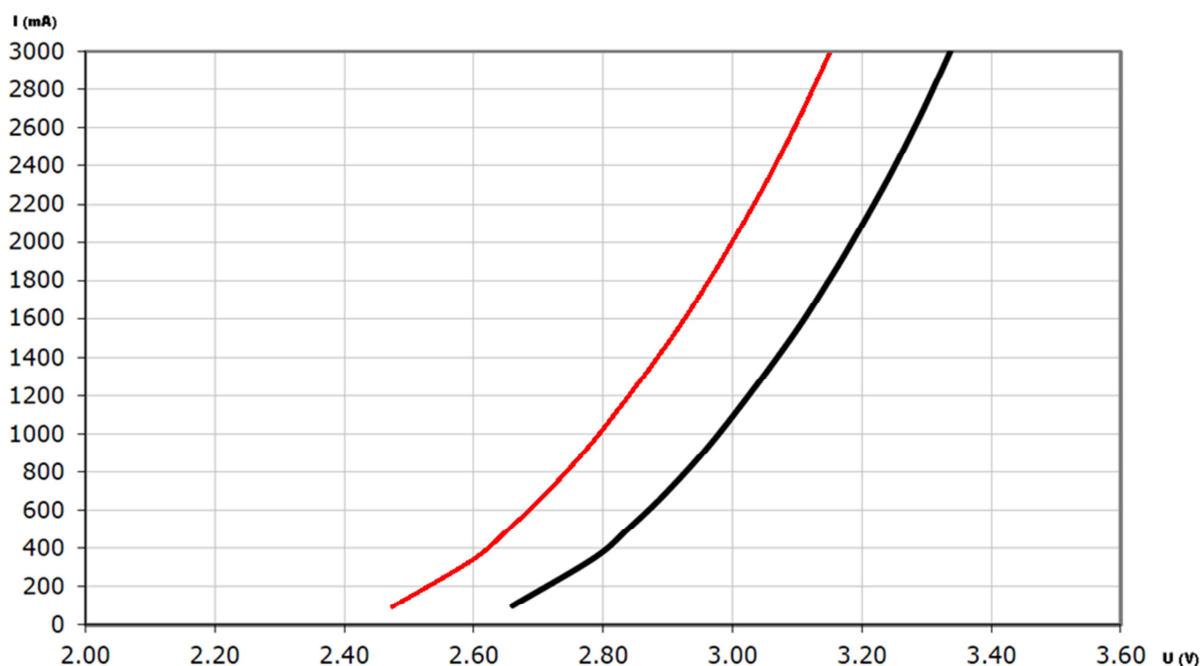
	Svetilnost (lumen/W)	Življenska doba (ure)
Navadna žarnica	15	1500
Varčna žarnica (CFL)	80	8000
Ksenonska žarnica	50	2000
Halogenska žarnica (MH)	80	10000
Natrijeva žarnica (HPS)	100	20000
LED dioda	200	50000

Tabela 1: Primerjava svetil

Navadna žarnica ima najslabši izkoristek, pa tudi življenjska doba je kratka. Poleg tega se lahko hitro poškoduje. Varčna žarnica ima nekoliko boljši izkoristek in daljšo življenjsko dobo. Čeprav ima varčna žarnica boljši izkoristek, vsebuje živo srebro, ki je zelo strupeno. Poleg tega je tudi občutljiva na hitro prižiganje in ugašanje. Ksenonske luči proizvedejo belo svetlobo, ki je približek naravne sončne svetlobe. Uporabljajo se predvsem v projektorjih. V avtomobilski industriji so ksenonske luči dejansko halogenske luči, ki uporabljajo plin ksenon zgolj za čas takoj po prižigu, ker to narekujejo varnostni standardi v avtomobilski industriji. Natrijeve žarnice se uporabljajo v javni razsvetljavi predvsem zaradi dolge življenjske dobe. LED dioda ima poleg izjemnega izkoristka in dolge življenjske dobe še druge prednosti. LED dioda je zelo robustna in jo je težko poškodovati, ne vsebuje strupenih plinov, ni občutljiva na nizko temperaturo in na vlago.

1.4. Krmiljenje LED diode

Kot pri ostalih diodah je tudi pri LED diodi tok približno eksponentna funkcija napetosti. To pomeni, da že majhne spremembe napetosti povzročijo velike spremembe toka.



Slika 1: Tok preko LED diode v odvisnosti od napetosti

Na sliki 1 nam črna črta predstavlja UI karakteristiko izbrane LED diode pri temperaturi 25°C. Vidimo, da je padec napetosti približno 3V. Pri majhni spremembi napetosti pride do velike spremembe toka. Dokler je napetost zelo nizka, dioda ne sveti. V primeru, da napetost le malo preseže najvišjo dovoljeno napetost, bo tok že prevelik in bo LED diodo poškodoval.

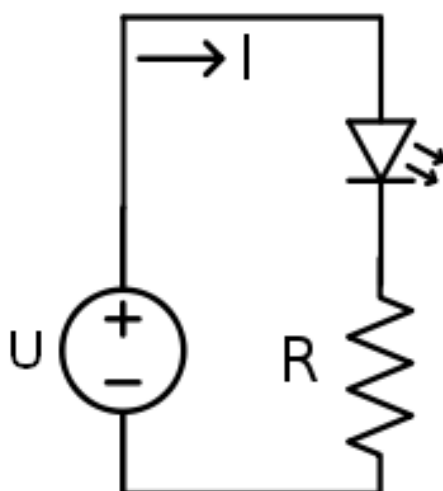
Pri spreminjanju temperature se karakteristike LED diode spremenijo. Če se temperatura poveča, bo LED dioda pri nižji napetosti prevajala večji tok. To nam prikazuje rdeča črta na sliki 1.

Zaradi omenjenih razlogov diode ne moremo enostavno priključiti na vir konstantne napetosti. Realni viri napetosti niso idealni in napetost na izhodu niha v določenem območju. Čeprav je lahko nihanje napetosti majhno, je spreminjanje toka skozi diodo veliko. Ker LED dioda ni idealna, nekaj moči pretvori v toploto. S časom se LED dioda segreje in njena UI karakteristika se spremeni.

Da zagotovimo pravilno delovanje LED diode, moramo na nek način omejiti tok preko nje. To je še posebej pomembno pri ultrasvetlih diodah, saj so le-te dosti bolj občutljive kot klasične LED diode.

1.4.1. Zaporedna vezava upora

Kot smo že ugotovili, LED diode ne moremo preprosto priključiti na vir konstantne napetosti. Izdelati moramo vezje, ki bo omejilo tok preko diode. Najpreprostejši način je z zaporedno vezavo upora.



Slika 2: Enostavno vezje z LED diodo

Predpostavimo, da je vir napetosti 3.7V. Ohmov zakon nam pove, da je tok skozi vsako vejo vezja enak padcu napetosti, deljenim s skupno upornostjo vseh elementov. Ker se notranja upornost diode spreminja glede na padec napetosti in temperaturo, moramo z uporabo zagotoviti, da tok nikoli ne preseže dovoljene vrednosti. To najlažje naredimo tako, da notranjo upornost LED diode zanemarimo in izračunamo vrednost upora glede na padec napetosti preko upora in želen tok. Padec napetosti preko upora je enak razliki med virom napetosti in padcem napetosti preko LED diode. Če predpostavimo, da je padec napetosti preko LED diode 3V, dobimo razliko napetosti 0.7V. Z uporabo velikosti 0.25Ω bomo tok omejili na največjo vrednost 3A. Zaradi neupoštevanja notranje upornosti LED diode, bo dejanski tok nekoliko manjši. Ko je LED dioda še hladna, je tok pri napetosti 3V šele okrog 1.5A. S časom, ko se bo dioda segrela, bo tok dosegel 3A.

Problem je, da je takšno vezje zelo neučinkovito. Upor vso moč, ki jo troši, oddaja v obliki toplote. Moč, ki se troši na diodi, je v začetku 4.5W. Moč, ki se troši na uporu, pa 2.25W. Izkoristek je tako le 66%. S časom, ko se dioda segreje, se sicer izkoristek izboljša na 75%.

Drugi problem zgornjega vezja je, da predpostavlja uporabo konstantnega vira napetosti. Baterijam se s praznjenjem manjša tudi napetost, zato potrebujemo vezje, ki bo, poleg zagotavljanja konstantnega toka, uravnavalo tudi napetost. Prav tako je slabo, da se s segrevanjem LED diode spreminja tok in posledično svetilnost.

1.4.2. Preklopni pretvorniki

Za povečanje izkoristka se najpogosteje uporabljajo preklopni pretvorniki (switched-mode converter), ki lahko dosežejo tudi do 98% izkoristek. Povečevanje izkoristka je pomembno pri napravah, ki jih napajamo z baterijami, saj na ta način povečamo čas delovanja naprave.

Obstaja več vrst preklopnih pretvornikov. Najpogostejše jih razdelimo v tri skupine glede na njihovo delovanje, čeprav so mogoče tudi drugačne razvrstitve. Trije glavni predstavniki so:

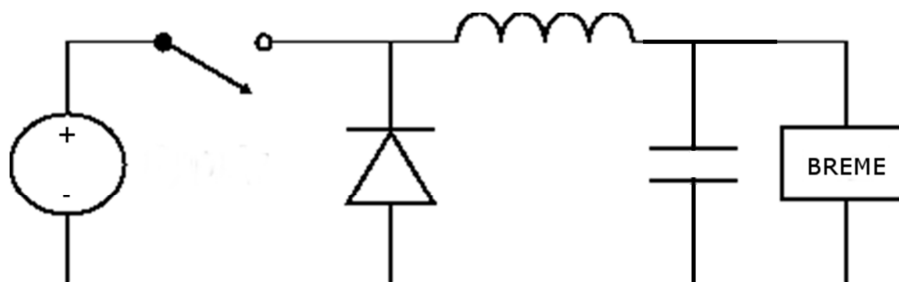
- Pretvornik navzdol (buck converter), ki višjo vhodno napetost spremeni v nižjo.
- Pretvornik navzgor (boost converter), ki nižjo vhodno napetost spremeni v višjo.
- Pretvornik navzdol-navzgor (buck-boost converter), ki lahko vhodno napetost zviša in zniža.

Vsem trem je skupno to, da s spreminjanjem delovnega cikla preklapljanja stikala uravnavajo napetost na izhodu. Pri uporabi preklopnih pretvornikov za krmiljenje LED diode je potrebno uporabiti še vezje, ki bo merilo tok preko LED diode in glede na to spreminjalo delovno dobo preklapljanja stikala.

V naslednjem razdelku si bomo ogledali delovanje enega izmed predstavnikov preklopnih napajalnikov, pretvornika navzdol.

1.5. Pretvornik navzdol

Pretvornik navzdol je DC-DC pretvornik, ki vhodno napetost pretvori v nižjo. Sestavljen je iz dveh stikal (tranzistor in dioda), kondenzatorja in tuljave, kot prikazuje slika 3.

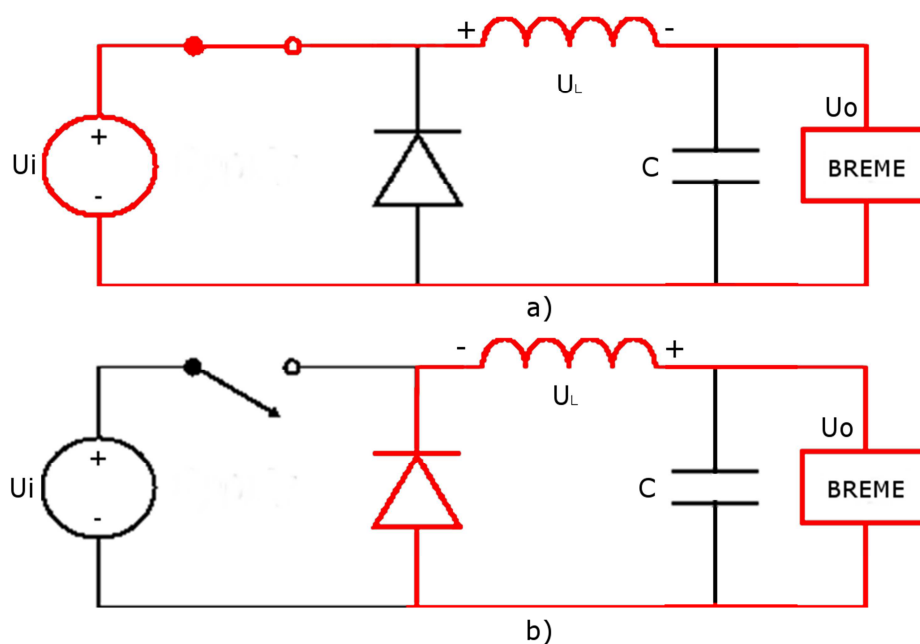


Slika 3: Pretvornik navzdol

Delovanje pretvornika navzdol je v osnovi enostavno. Krmilnik upravlja s stikalom. V prvem stanju (stikalo sklenjeno) se tuljava polni preko vira energije. V drugem stanju (stikalo razklenjeno) pa se tuljava prazni preko bremena.

Za opis vezja predpostavimo, da so vsi elementi v vezju idealni. Ko je stikalo sklenjeno, je padec napetosti na stikalu in diodi 0V. Ko je stikalo razklenjeno, je tok preko stikala in diode 0A. Tuljava je idealna in ima upornost 0Ω .

Pretvornik navzdol ima dva načina delovanja. Zvezni način (continuous conduction mode), kjer se tuljava nikoli ne izprazni do konca, in prekinjen način (discontinuous conduction mode), kjer se tuljava med vsakim preklpom do konca izprazni. Opisan bo le prvi način delovanja, saj je le-ta uporabljen v vezju za krmiljenje LED diode.



Slika 4: Delovanje pretvornika navzdol

Najprej definirajmo nekatere spremenljivke. Valovitost toka v tuljavi (ripple current) je razlika med najvišjim tokom v tuljavi I_{pk} ter najnižjim tokom I_l (1).

$$\Delta I = (I_{pk} - I_l) \quad (1)$$

Delovni cikel D (duty cycle) izraža, kolikšen delež posamezne periode T je stikalo sklenjeno. Če je T_{on} čas, ko je stikalo sklenjeno, velja enačba

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (2)$$

$$T_{on} = D * T \quad (3)$$

$$T_{off} = T - T_{on} = T - D * T = (1 - D) * T \quad (4)$$

Napetost na tuljavi U_L je podana z enačbo

$$U_L = L * \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

Če je začetni tok skozi tuljavo enak I_l , bo po času T_{on} enak

$$I = \frac{1}{L} \int_0^{T_{on}} U_L dt + I_l \quad (6)$$

Kadar je stikalo sklenjeno, je napetost na tuljavi enaka

$$U_L = U_i - U_o \quad (7)$$

S primerno izbranim kondenzatorjem C je napetost na bremenu U_o približno konstantna. Ker je približno konstantna tudi vhodna napetost U_i , lahko tudi napetost U_L vzamemo za konstantno. Tok skozi tuljavo tako doseže najvišjo vrednost I_{pk} po času T_{on} v skladu z enačbo

$$I_{pk} = \frac{1}{L} \int_0^{T_{on}} (U_i - U_o) dt + I_l = \frac{U_i - U_o}{L} * T_{on} + I_l \quad (8)$$

$$\Delta I = (I_{pk} - I_l) = \frac{U_i - U_o}{L} * T_{on} \quad (9)$$

T_{on} je čas, ko je stikalo sklenjeno. Izrazimo ga lahko z enačbo (3). Ne smemo pozabiti, da smo v zgornjih enačbah zanemarili padec napetosti preko stikala in diode.

Ko se ob času T_{on} stikalo razklene, dobimo na tuljavi napetost $U_L = -U_o$. Ob času $T = T_{on} + T_{off}$ doseže tok v tuljavi najnižjo vrednost

$$I_l = \frac{1}{L} \int_{T_{on}}^T (-U_o) dt + I_{pk} = \frac{-U_o}{L} * (T - T_{on}) + I_{pk} = \frac{-U_o}{L} * T_{off} + I_{pk} \quad (10)$$

$$\Delta I = (I_{pk} - I_l) = \frac{U_o}{L} * T_{off} \quad (11)$$

V enačbi (10) in (11) je T_{off} čas, ko je stikalo razklenjeno. Izrazimo ga lahko z enačbo (4). V zveznem načinu delovanja je tok v tuljavi na začetku periode ($t = 0$), enak toku v tuljavi na koncu periode ($t = T$).

$$\frac{U_i - U_o}{L} * T_{on} = \frac{U_o}{L} * T_{off} \quad (12)$$

$$(U_i - U_o) * DT - U_o * (1 - D)T = 0 \quad (13)$$

$$U_o = DU_i \quad (14)$$

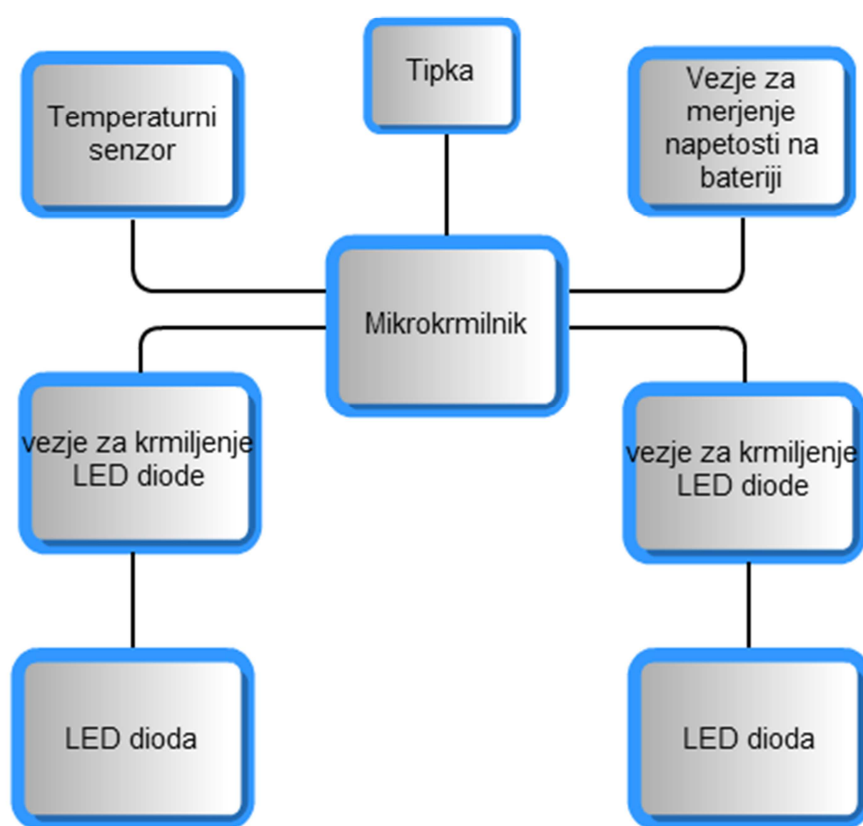
Iz enačbe (14) je razvidno, da je izhodna napetost linearno odvisna od delovnega cikla. Enačba velja le v primeru, da so vsi elementi v vezju idealni, kar pa v realnosti ni mogoče doseči.

1.5.1. Pretvornik navzdol kot del vezja za krmiljenje LED diode

Pretvornik navzdol nam sam po sebi ne zagotavlja konstantne napetosti niti konstantnega toka, temveč le pretvori višjo napetost v nižjo. Za krmiljenje LED diode potrebujemo konstanten tok. Zaporedno bremenu dodamo majhen upor, preko katerega bomo merili tok. Želimo, da je upor čim manjši, saj bodo tako manjše tudi izgube preko njega. Če poznamo upornost in izmerimo napetost preko upora z ADC pretvornikom, lahko izračunamo tok, ki teče skozenj. Ker je upor bremenu vezan zaporedno, je tok skozi upor enak toku skozi breme. Delovni cikel stikala bomo spreminjali v skladu z izmerjenim tokom. Če je izmerjen tok večji od želenega, bomo delovni cikel zmanjšali, če pa je izmerjen tok manjši od želenega, bomo delovni cikel povečali.

2. Načrtovanje vezja

Cilj je izdelati svetilko LED s svetilnostjo 2000 lumnov. Tako svetilnost bi bilo mogoče realizirati z več LED diodami in tako doseči večji izkoristek, vendar sem se odločil, da uporabim najsvetlejšo LED diodo na trgu. LED dioda CREE XML T6 ima pri 10W svetilnost 1000 lumnov. Da se doseže svetilnost 2000 lumnov, sta uporabljeni dve taki LED diodi. Svetilka bo namenjena uporabi v jamarstvu, zato naj bo kar najbolj preprosta in robustna.



Slika 5: Blok diagram vezja

Kot prikazuje slika 5 naše vezje sestoji iz mikrokrmilnika, čigar naloga je, da upravlja z vsemi ostalimi deli vezja. Na mikrokrmilnik je priključena tipka, s katero želimo upravljati z našo svetilko. Uporabljena je le ena tipka, saj je na ta način svetilko lažje vodoodporno zatesniti. Ob pritisku tipke za kratek čas preklapljamo med različnimi stopnjami svetilnosti. Ob pritisku tipke za daljši čas preklapljamo med prvo, drugo in obema LED diodama. Na mikrokrmilnik priklopimo tudi temperaturni senzor, s katerim svetilko zaščitimo pred pregrevanjem. V primeru,

da se temperatura dvigne nad dovoljeno, zmanjšamo stopnjo svetilnosti. Vezje za merjenje napetosti na bateriji mikrokrmilniku omogoča, da spremlja stanje baterije. Ko se baterija prekomerno sprazni, mikrokrmilnik izklopi obe LED diodi in tako prepreči poškodbo baterije. Vsaka LED dioda ima svoje vezje za krmiljenje. Mikrokrmilnik lahko ločeno upravlja vsako LED diodo posebej.

Dioda ima padec napetosti približno 3.2V. Kot vir napetosti je bila izbrana baterija LiPO, ker je njena napetost le nekoliko višja kot napetost, ki jo želimo na izhodu pretvornika navzdol. Izkoristek pretvornika navzdol se z manjšanjem razlike med vhodno in izhodno napetostjo povečuje. Ko je baterija polna, je naša vhodna napetost 3.7V. Ko se baterija prazni, napetost pada. Najnižja varna napetost za LiPO baterijo je 3.2V. Potrebujemo vezje, ki bo našo vhodno napetost spremenilo iz 3.2V do 3.7V v približno 3.2V, hkrati pa zagotavljalo konstanten tok.

V naslednjem poglavju si bomo ogledali, kako določiti posamezne elemente vezja za realni pretvornik ter izračunali izkoristek le tega.

2.1. Izračun elementov vezja za krmiljenje LED diode

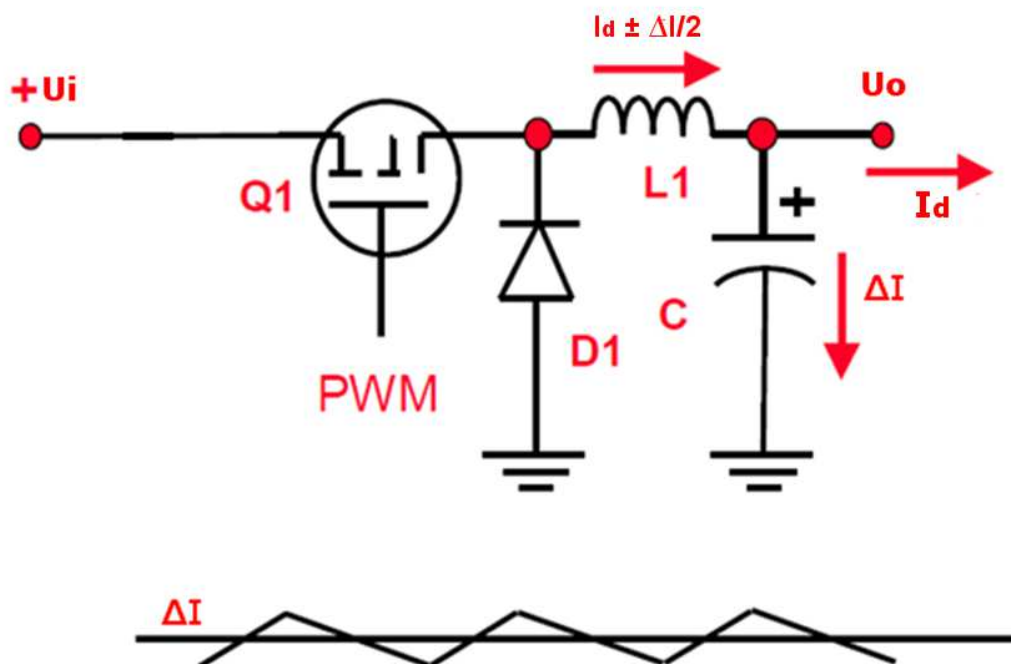
Za vsako LED diodo bomo izdelali vezje za krmiljenje. Za podane podatke o želenem toku in napetosti preko LED diode lahko izračunamo vrednosti parametrov za posamezne komponente vezja za krmiljenje LED diode.

Kot stikalo v pretvorniku navzdol bomo uporabili tranzistor MOSFET. Za tok preko diode privzamemo vrednost 3A. Napetost na diodi je v tem primeru okrog 3.2V. Za vhodno napetost vzamemo 3.7V, ko je baterija polna. Kasneje bomo naredili še dodatne izračune za primer, ko baterija ni polna.

Predpostaviti moramo še dva podatka. Frekvenco preklapljanja tranzistorja MOSFET. Pri višji frekvenci lahko uporabimo manjše elemente (tuljava, kondenzator), vendar je izguba na tranzistorju MOSFET večja. Upoštevati je potrebno tudi zmožnosti mikrokrmilnika, ki bo vezje krmilil. Za začetne izračune predpostavimo frekvenco 125kHz, ki je zadosti nad najvišjo frekvenco, ki jo človeško uho še zazna.

Druga spremenljivka je valovanje toka. Pove nam, kakšno je maksimalno dovoljeno odstopanje toka v špicah od želenega poteka. Želimo, da je valovitost čim manjša. Valovitost toka vpliva na učinkovitost ter tudi življensko dobo LED diode. Proizvajalec izbrane LED diode priporoča valovitost manjšo od 100mA. Privzamemo želeno valovitost $\Delta I = 50\text{mA}$ in povprečen tok skozi diodo

$$I_d = \frac{I_{pk} + I_l}{2} = 3\text{A} \quad (15)$$



Slika 6: Električna shema pretvornika navzdol

2.1.1. Tranzistor MOSFET

Na sliki 6 je prikazan pretvornik navzdol z označenimi elementi. Za MOSFET tranzistor Q1 lahko izberemo tako P kot N tip MOSFET tranzistorja. Izbran je bil P tip MOSFET tranzistorja, saj omogoča enostavno krmiljenje s krmilnika, ki je napajan z istim napetostnim virom kot breme. N-tip MOSFET tranzistorja na prvi pogled izgleda ustrežnejši, saj tak MOSFET tranzistor ne prepušča toka, če na vratih ni napetosti. Tako je MOSFET, v primeru, ko krmilnik ne deluje, zaprt. Problem MOSFET tranzistorja tipa N je, da ga je potrebno krmiliti z višjo napetostjo kot je napetost na bremenu. To pripelje do težav, saj bi morali mikrokrmilnik napajati z višjo napetostjo kot je napetost baterije. P-tip MOSFET tranzistorja nam omogoča krmiljenje z nižjo napetostjo kot je napetost na bremenu. Problem pri P-MOSFET tranzistorju je, da prepušča tok, ko ni napetosti na vratih. Tako bi LED diode svetile v primeru, da krmilnik ne deluje oziroma se še ni inicializiral. To rešimo tako, da na povezave do vrat MOSFET tranzistorja dodamo "pull-up" upore.

Potrebujemo MOSFET tranzistor, ki ima kratek čas vzpona in padca. Čas vzpona in padca mora biti dovolj kratek, da je mogoče preklapljanje z želeno frekvenco. MOSFET tranzistor mora tudi ustrezati potrebam po moči. Potrebujemo MOSFET tranzistor z dovoljeno napetostjo source-

drain vsaj 5V in dovoljenim tokom vsaj 3A. Kot je razvidno iz enačb (16), (17) in (18) sta pomembna parametra še notranja upornost R_{ds} in kapacitivnost na izhodu C_{oss} . Ta dva parametra naj bosta čim nižja, da bo moč, ki se troši na MOSFET tranzistorju, čim nižja. Ker želimo vezje izdelati v "surface-mount" tehnologiji, potrebujemo MOSFET tranzistor z ohišjem tipa SMD.

FDS6681Z MOSFET tranzistor ima najvišjo dovoljeno napetost 30V, najvišji dovoljen tok 20A ter pri napetosti $U_{GS} = 4.5V$ notranjo upornost $R_{DS} = 6.5m\Omega$. Čas odpiranja kanala t_r je 18ns, čas zapiranja t_f pa 610ns. Kapacitivnost na izhodu tranzistorja C_{oss} je 1400pF. Cena enega kosa je 2€.

Izračunajmo moč, ki se troši na izbranem tranzistorju MOSFET pri frekvenci $F = \frac{1}{T} = 125kHz$.

$$P_{open} = I_d^2 * R_{DS} * D = 3A^2 * 0.0068\Omega * \frac{3.2V}{3.7V} = 0.053W \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_{switching} &= \frac{1}{2} * (U_i - U_o) * I_d * (t_r + t_f) * F + \frac{1}{2} * C_{oss} * (U_i - U_o)^2 * F \\ &= \frac{1}{2} (3.7V - 3.2V) * 3A * (18ns + 610ns) * 125kHz + \frac{1}{2} * 1.4nF * (3.7V - 3.2V)^2 * 125kHz \\ &= 0.0471W + 0.00002W = 0.047W \quad (17) \end{aligned}$$

$$P_{mosfet} = P_{open} + P_{switching} = 0.1W \quad (18)$$

Moč, ki se troši na MOSFET tranzistorju, medtem ko je kanal odprt (16), izračunamo kot produkt kvadrata toka preko diode I_d in notranje upornosti tranzistorja R_{DS} . Rezultat še pomnožimo z delovnim ciklom D . Delovni cikel je določen z enačbo (14), ki sicer predstavlja idealne elemente, vendar bo za naše izračune dovolj natančna. Ko je kanal MOSFET tranzistorja zaprt, tok ne teče. Upoštevati moramo še čas, ko tranzistor preklaplja iz enega v drugo stranje (17). Kot lahko vidimo se največ moči na MOSFET tranzistorju troši v času preklapljanja. Zato je pomembno, da izberemo tranzistor, ki ima kratek čas vzpona in padca. Kljub temu, da ima izbran tranzistor zelo nizko notranjo upornost, bi bilo mogoče najti napravo, ki bi zaradi krajšega časa vzpona in padca, kljub večji notranji upornosti, imela manjše izgube.

2.1.2. Dioda

Izbira diode je enostavna. Največji dovoljen tok preko diode mora biti vsaj 3A, največja napetost v reverzni smeri pa 3.2V. Ker želimo, da ima dioda čim manjši padec napetosti, izberemo schottky diodo, ki ima padec napetosti U_f le 0.3V.

Za izračun izgubljenе energije na diodi enostavno zmnožimo padec napetosti na diodi s tokom čez diodo. Na nobenega od parametrov ne moremo vplivati, zato izgube na diodi predstavljajo največji problem.

$$P = U_f * I_d = 0.3V * 3A = 0.9W \quad (19)$$

2.1.3. Tuljava

Za tuljavo je potrebno izračunati optimalno induktivnost. Enačbo izpeljemo iz osnovne enačbe za napetost na tuljavi (20). Iz enačb je jasno razvidno, da potrebna velikost tuljave pada z višanjem frekvence in narašča z manjšanjem valovanja toka. Prav tako potrebna velikost tuljave pada, ko se vhodna napetost približuje izhodni. Valovanje toka I_r je bilo podano že v poglavju 2.1 in je 50mA. Frekvenca preklapljanja F je 125kHz.

$$U_L = L * \frac{dI(t)}{dt} \quad (20)$$

$$T_{on} = D * T = \frac{U_o}{U_i} * T = \frac{3.7V}{3.2V} * T = 0.86 * T = \frac{0.86}{F} = \frac{0.86}{125kHz} = 0.68 * 10^{-5}s \quad (21)$$

$$L = \frac{U_L}{\frac{dI(t)}{dt}} = \frac{U_i - U_o}{\Delta I} * T_{on} = \frac{0.5V}{0.05A} * 0.68 * 10^{-5}s = 68\mu H \quad (22)$$

Za določitev napetosti na tuljavi spet predpostavimo idealne elemente. Čas T_{on} (21) določimo s pomočjo enačb (3) in (14).

Najmanjša tuljava, ki zadostuje potrebam, ima induktivnost 68μH (22). Večja tuljava zmanjša valovanje toka, vendar ima to dve slabi plati. Večja tuljava pomeni večje vezje in tudi večjo notranjo upornost. Kot je razvidno iz enačbe (23), so izgube v tuljavi linearno odvisne od notranje upornosti tuljave.

Izberemo tuljavo, ki zadošča vsem pogojem. Induktivnost mora biti vsaj 68μH, notranja upornost mora biti čim manjša, največji dovoljen tok mora biti vsaj 3A in tip ohišja naj bo SMD.

Tuljava PM2120-121K-RC ima induktivnost 120μH, največji dovoljen tok je 5.8A, notranja upornost ESR je 0.039Ω, cena pa 2.8€ na kos.

$$P = I_d^2 * ESR = 3A^2 * 0.039\Omega = 0.351W \quad (23)$$

2.1.4. Izhodni kondenzator

Na izhodu je potreben kondenzator, da zmanjša valovitost napetosti na izhodu pretvornika navzdol.

Izračun zelene kapacitivnosti kondenzatorja je rahlo zahtevnejši. Izhajamo iz enačbe za valovitost napetosti na kondenzatorju (24). Ta je vsota ESR napetosti (effective series resistance), ESL napetosti (effective series inductance) in napetosti zaradi kapacitivnosti kondenzatorja. Napetost zaradi kapacitivnosti kondenzatorja dobimo iz enačbe za tok na kondenzatorju

$$I = C \frac{du}{dt} \quad (24)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{I}{C} \quad (25)$$

$$\frac{U}{T_{ON}} = \frac{\Delta I}{C} \quad (26)$$

ESL je v našem primeru zanemarljiv in ga proizvajalci največkrat ne navedejo. V naslednjih izračunih (28) je zato izpuščen.

$$\Delta U = \Delta I * ESR + \Delta I * ESL + \Delta I * \frac{T_{on}}{C} \quad (27)$$

$$C = \Delta I * \frac{T_{on}}{\Delta U - \Delta I * ESR} = 0.05A * \frac{0.68 * 10^{-5}s}{0.05V - 0.05A * 0.03\Omega} = 7\mu F \quad (28)$$

Privzemimo želeno valovitost napetosti na izhodu ΔU 50mV. Valovitost toka za izhodu pretvornika je 50mA. Izračunamo lahko potrebno kapacitivnost kondenzatorja. Za notranjo upornost kondenzatorja ESR privzamemo vrednost 0.03 Ω , ki je pogosta pri realnih kondenzatorjih. Za izračun časa T_{on} je bila ponovno uporabljena enačba (21).

Kot pri tuljavi lahko tudi tu opazimo, da bo s povečevanjem frekvence in manjšanjem razlike med vhodno in izhodno napetostjo, želena velikost kondenzatorja padala. Če želimo doseči manjšo napetost valovanja, je potrebno velikost kondenzatorja povečati. Prav tako je potrebno velikost kondenzatorja povečati, če je notranja upornost kondenzatorja večja od predvidene.

Izberemo kondenzator, ki ustreza vsem pogojem. Kapacitivnost mora biti večja od 7 μ F, notranja upornost ESR mora biti manjša od 0.03 Ω , najvišja dovoljena napetost pa naj bo vsaj 5V. Izogibamo se keramičnim kondenzatorjem, ker brenčijo. Kondenzator EEFSL0J560R ustreza vsem pogojem. Najvišja dovoljena napetost je 6.3V, kapacitivnost je 56 μ F, ESR pa 0,012 Ω . Ker izbran kondenzator presega želene vrednosti, bo valovitost napetosti na izhodu še manjša od želene.

Izgube na kondenzatorju izračunamo kot kvadrat toka valovanja pomnožen z ESR vrednostjo kondenzatorja. Iz enačbe (29) je razvidno, da so izgube na kondenzatorju odvisne od valovitosti toka ter notranje upornosti kondenzatorja.

$$P = \Delta I^2 * ESR = (0.05A)^2 * 0.012\Omega = 0.00003W \quad (29)$$

Vidimo lahko, da so izgube na kondenzatorju minimalne in jih lahko zanemarimo. Vendar pa vrednost ESR vseeno igra pomembno vlogo pri izbiri kondenzatorja, saj vpliva na valovitost napetosti. Če želimo doseči manjšo ESR vrednost, lahko vzporedno vezemo več kondenzatorjev.

2.1.1. Vhodni kondenzator

Poleg kondenzatorja na izhodu lahko dodamo še en kondenzator na vhod v tranzistor MOSFET. Ta kondenzator je zadolžen za zmanjševanje valovitosti napetosti pred vstopom v pretvornik navzdol. Prevelika valovitost napetosti na vhodu v tranzistor MOSFET lahko povzroči poškodbo le-tega. Ker bomo naše vezje napajali z baterijo, ta kondenzator ni nujno potreben, saj v tem primeru valovitost napetosti minimalna.

2.1.2. Upor

Bremenu dodamo zaporedno še upor za merjenje toka. Ker ima upor konstantno upornost, lahko s tem, da merimo napetost, izračunamo tok. Tok je na vseh elementih, ki so vezani zaporedno, enak, zato je tok preko LED diode enak toku, ki teče preko upora. Analogno digitalni pretvornik mikrokrmilnika nam vhodno napetost pretvori v celoštevilčno vrednost. Analogno digitalni pretvornik ima določeno resolucijo ter najvišjo dovoljeno vhodno napetost. Privzemimo, da je resolucija našega analogno digitalnega pretvornika 10 bitov in najvišja dovoljena vhodna napetost 1.1V. Da bi analogno digitalni pretvornik kar najbolje izkoristili, mu moramo na vhod pripeljati napetost od 0 do 1.1V. Izberemo čim manjši upor, ki pa mora imeti največji dovoljen tok vsaj 3A. Izbran mikrokrmilnik ima analogno digitalni pretvornik z 10 bitno resolucijo in 1.1V referenčno napetostjo. ADC zazna spremembo napetosti 1mV. Najvišja napetost, ki jo še zazna, je 1.1V. V primeru, da bi prek upora pri toku 3A imeli napetost 1.1V, bi potrebovali upor z upornostjo 0.36Ω (30).

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1.1V}{3A} = 0.36\Omega \quad (30)$$

Napetost preko upora za merjenje toka mora biti čim manjša, zato bo potrebno signal pred vhodom v mikrokrmilnik še ojačati.

Mikrokrmilnik ATTiny861 že vsebuje ojačevalnik vhodov v analogno digitalni pretvornik. Ker bomo uporabili 32 kratni ojačevalnik, potrebujemo 32 krat manjši upor R z upornostjo le $11.25m\Omega$ (31). Zaradi manjše upornosti se zmanjša tudi napetost na uporu, ki sedaj znaša le $33.75mV$ (32). Ko ta signal vstopi v mikrokrmilnik, ga le-ta 32x ojača, nato pa naredi pretvorbo na ojačanem signalu (33).

$$R = \frac{0.36\Omega}{32} = 11.25m\Omega \quad (31)$$

$$U = R * I = 0.01125\Omega * 3A = 0.03375V \quad (32)$$

$$U_{adc} = U * 32 = 1.08V \quad (33)$$

Upor RLP73V3AR010JTE ima upornost 0.01Ω ter največjo dovoljeno moč 2W.

$$P = I^2 * R = 9A^2 * 0.01\Omega = 0.09W \quad (34)$$

Največja moč, ki se troši na uporu ne presega 2W (34), zato izbrani upor ustreza vsem kriterijem.

2.2. Izkoristek

Izgube na vsaki izmed komponent smo že izračunali, potrebno jih je le še sešteti in lahko izračunamo izkoristek našega vezja za krmiljenje LED diode.

$$\begin{aligned} P_{\text{skupaj}} &= P_{\text{mosfet}} + P_{\text{dioda}} + P_{\text{tuljava}} + P_{\text{kondenzator}} + P_{\text{upor}} \\ &= 0.1W + 0.9W + 0.35W + 0.09W = 1.44W \end{aligned} \quad (35)$$

Do največjih izgub prihaja na diodi in tuljavi, zato bomo v nadaljevanju poskušali ta del vezja izboljšati. Z višanjem frekvence bi sicer imeli manj izgub v tuljavi, saj bi lahko uporabili manjšo tuljavo, vendar bi bile izgube v tranzistorju MOSFET večje.

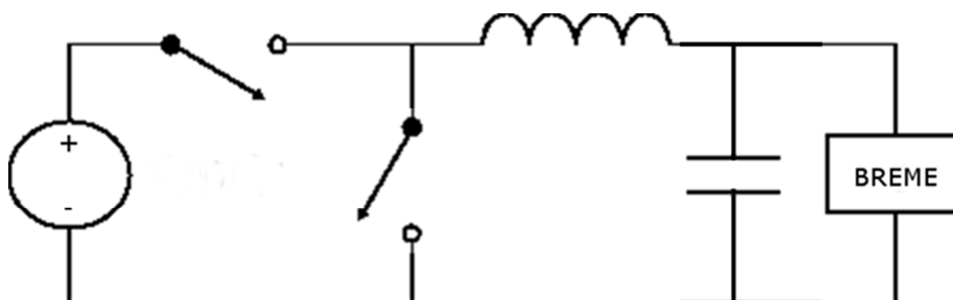
Izračunajmo še izkoristek:

$$\text{Izkoristek} = \frac{P_{LED}}{P_{LED} + P_{skupaj}} = 87\% \quad (36)$$

2.3. Možne izboljšave vezja

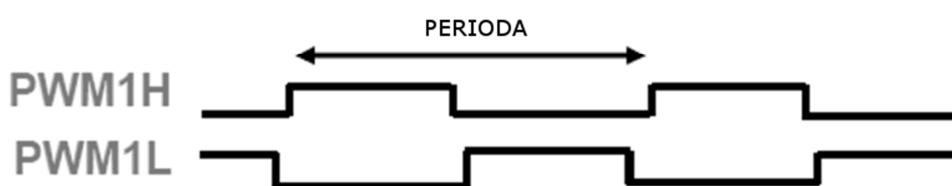
2.3.1. Dioda

Največji potrošnik energije je dioda. Diodo nadomestimo še z enim stikalom, tako kot kaže slika 7. Kot drugo stikalo bomo prav tako uporabili tranzistor MOSFET.



Slika 7: Zamenjava diode s tranzistorjem MOSFET

Drugi tranzistor MOSFET krmilimo s PWM signalom, ki je komplementaren signalu, s katerim krmilimo prvo tranzistor MOSFET.



Slika 8: Komplementarna PWM signala

Poraba moči na drugem tranzistorju MOSFET je popolnoma enaka porabi moči na prvem tranzistorju MOSFET $P_{mosfet} = 0.1W$.

$$P_{skupaj} = 2 * P_{mosfet} + P_{tuljava} + P_{upor} = 2 * 0.1W + 0.35W + 0.09W = 0.64W \quad (37)$$

Izkoristek je sedaj enak

$$Izkoristek = 94\%$$

2.3.2. Tuljava

Drugi največji porabnik energije je tuljava. Tuljavo lahko zmanjšamo, če povečamo frekvenco in, če povečamo valovitost toka. Valovitost toka ΔI povečamo na 0.1A, kar je največja priporočena vrednost proizvajalca. S povečanjem frekvence preklapljanja tranzistorja MOSFET se povečajo tudi izgube na tranzistorju v času preklapljanja. Ker so izgube na tranzistorju v času preklapljanja večje od izgub na tuljavi, se povečanje frekvence ne bi izplačalo.

Z uporabo enačbe (22) lahko izračunamo, da je najmanjša potrebna induktivnost sedaj $L = 43\mu\text{H}$. Zavedati se moramo, da smo v enačbi (22) zanemarili padec napetosti preko tranzistorja MOSFET in diode. Dejanska tuljava je torej lahko nekoliko manjša, saj je napetost preko tuljave U_L manjša od predvidene. Uporabimo tuljavo z induktivnostjo $L = 33\mu\text{H}$ in notranjo upornostjo $R_{DS} = 0.006\Omega$. Izkoristek se tako poveča na 97%.

2.4. Izračuni za različne stopnje svetilnosti

V prejšnjem poglavju smo naredili izračun za komponente pri predpostavki, da želimo LED diode krmiliti z najvišjim dovoljenim tokom. Če pa hočemo, da ima svetilka različne stopnje svetilnosti, moramo z enakim vezjem LED diodo krmiliti tudi z nižjim tokom.

Iz enačbe za velikost tuljave (22) je jasno razvidno, da le-ta ni odvisna od toka temveč le od vhodne in izhodne napetosti. Če želimo manjši tok na diodi, moramo zmanjšati tudi napetost, vendar le za majhno vrednost. Iz slike 1 lahko razberemo, da je najnižja napetost, pri kateri dioda še sveti, okrog 2.5V. Če to napetost vstavimo v enačbo (22) in izračunamo velikost tuljave, dobimo najmanjšo potrebno induktivnost $L = 120\mu\text{H}$.

Ker se je razlika med vhodno in izhodno napetostjo zmanjšala za približno trikrat, bi bilo torej treba velikost tuljave povečati za približno trikrat ali pa se nam bi povečala valovitost toka na izhodu. Drugi način, da ohranimo valovitost toka, pa je, da povečamo frekvenco za enak faktor.

V primeru, da ne povečamo frekvence ali velikosti tuljave, pretvornik navzdol preide v prekinjen način delovanja, kot kaže slika 9. Čeprav je frekvenca preklapljanja dovolj velika in človeško oko ne bi opazilo utripanja LED diode, pa se ji v tem primeru življenjska doba krajša občutno hitreje.

Pri zelo nizki svetilnosti, kjer bi bila velikost tuljave premajhna, bomo povečali frekvenco preklapljanja tranzistorja MOSFET. Izgube v tranzistorju v času preklopa se posledično povečajo. Pri najnižji svetilnosti povečamo frekvenco na 500kHz. Izkoristek je v tem primeru 82%.



Slika 9: Potek napetosti in toka pri zelo majhnem bremenu

2.5. Izračuni za različne napetosti na bateriji

V vseh izračunih do sedaj smo predpostavljali, da je vhodna napetost 3.7V. LiION baterija ima napetost 3.7V-3.8V, ko je polna. Ko se baterija prazni, se ji napetost postopoma zmanjšuje. Najnižja napetost, pri kateri je baterijo še varno uporabljati, je okrog 3V.

Iz enačbe za velikost tuljave (22) lahko razberemo, da bolj kot bo vhodna napetost blizu izhodne, bolj optimalno bo deloval pretvornik. Torej lahko ugotovimo, da se s praznjenjem baterije izkoristek vezja povečuje.

Do problema pride, ko je napetost na bateriji nižja kot bi bila potrebna za krmiljenje LED diode pri določeni svetilnosti. Ko se napetost baterije spusti pod 3.2V, ne moremo več krmiliti LED diode pri polni svetilnosti.

Ko se baterija prekomerno izprazni, lahko pride do poškodbe le-te. Zato je pomembno, da s programom omejimo najmanjšo dovoljeno napetost na bateriji. Ko se napetost spusti prenizko, svetilko ugasnemo, da preprečimo poškodbe.

2.6. Presluh zaradi preklapljanja tranzistorja

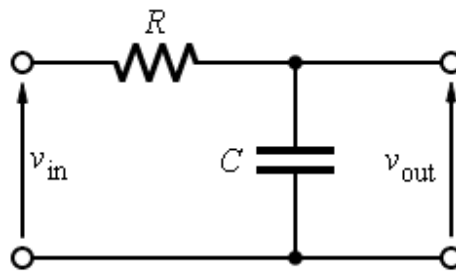
Tranzistor preklapljam s frekvenco do 500kHz. Pri tako visokih frekvencah lahko presluh igra pomembno vlogo.

Najbolj občutljiva je povezava od upora za merjenje toka pa do mikrokrmilnikovega vhoda ADC. Na vhodu mikrokrmilnika pričakujemo napetost od 0 do 35mV. Ta napetost se nato 32x ojača, da pridemo do napetosti 1.1V. Krmilnik nam poda vrednost od 0 do 1023, ki predstavlja vrednost na vhodu v ADC. To pomeni, da krmilnik zazna razlike v vhodni napetosti, ki niso manjše od 33uV. Presluh je torej zaradi sosednjih linij zelo pomemben, saj bo že zelo majhna preslušna napetost povzročila napačne meritve.

$$U_p(0, t) = K_b * [u(t) - u(t - 2\tau)] \quad (38)$$

Bližnji presluh (38) je odvisen od razlike napetosti pred preklopom in po preklopu ter od bližnje preslušne konstante. Na razliko napetosti ne moremo vplivati, lahko pa vplivamo na preslušno konstanto. Kritične povezave naj bodo čim bolj oddaljene od povezav z visoko frekvenco preklapljanja. Dolžina segmenta, ko povezavi tečeta vzporedno naj bo čim krajša.

Da se izognemo nepravilnim meritvam zaradi presluha, dodamo na povezavo v vhod ADC mikrokrmilnika še nizkoprepustnostni filter. Filter bo iz signala odstranil vse frekvence, višje od 20Hz. Šum, ki nastane zaradi presluha, ima veliko višjo frekvenco, saj je njegov izvor 500kHz signal.



Slika 10: Nizkoprepustnostni filter

Nizkoprepustnostni filter je realiziran kot je prikazano na sliki 10. Potrebujemo en upor in en kondenzator. Vrednosti določimo tako, da ustrezajo enačbi nizkoprepustnostnega filtra (39).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (39)$$

Izbrana sta bila upor z upornostjo $R = 2\text{k}\Omega$ in kondenzator z kapacitivnostjo $C = 4.7\mu\text{F}$. Mejna frekvenca nizkoprepustnostnega filtra je v tem primeru 16.9Hz, kar dobro ustreza zahtevam.

2.7. Mikrokrmilnik

Zgoraj opisano vezje za krmiljenje LED diode potrebuje zunanji izvor krmiljenja. Tranzistor MOSFET je potrebno odpirati in zapirati s frekvenco od 125kHz do 500kHz. Za to poskrbi mikrokrmilnik. Za vsako vezje za krmiljenje LED diode potrebujemo izhodni signal PWM, njegov komplement ter vhodni signal ADC, torej skupaj 4 izhode PWM in 2 vhoda ADC.

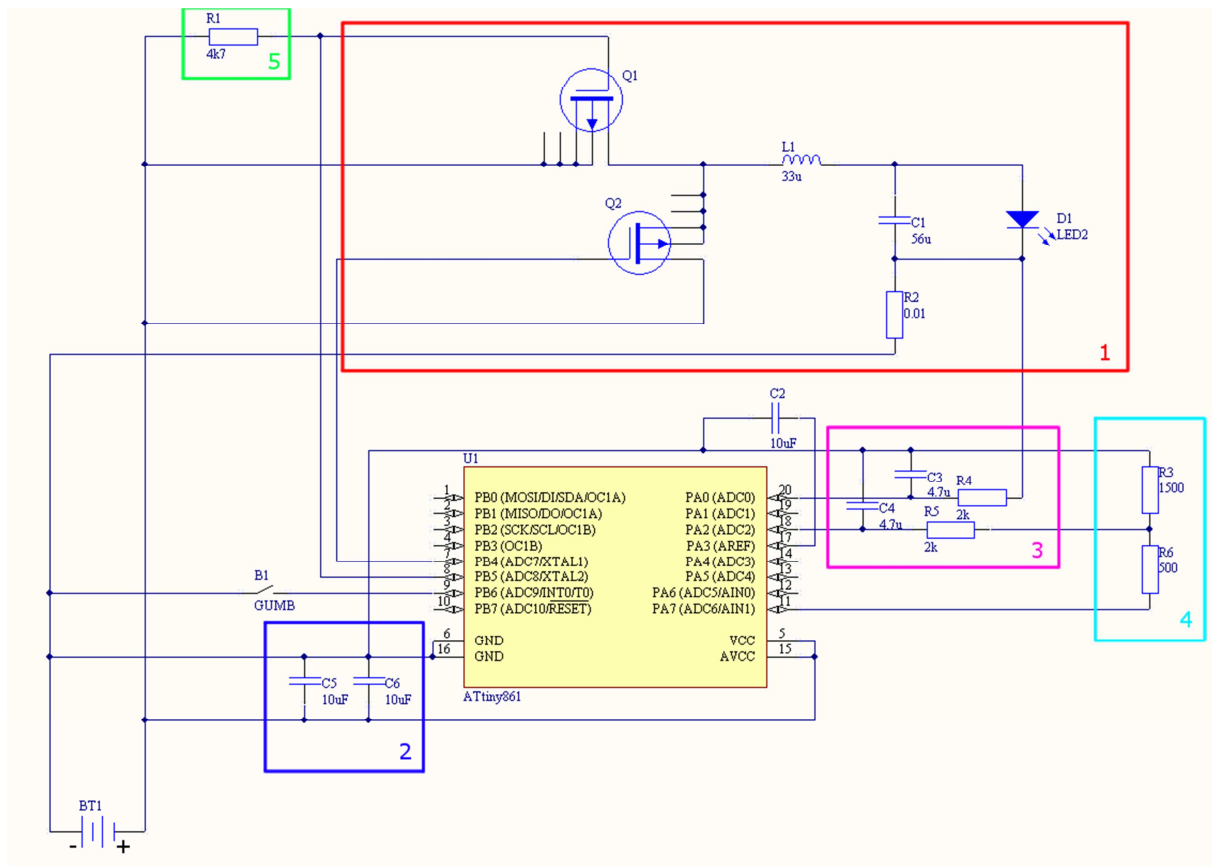
Mikrokrmilnik s signalom PWM krmili vrata tranzistorja MOSFET. S podaljševanjem oziroma krajšanjem dolžine impulza nadziramo, kakšna napetost in tok se bosta pojavila na izhodu.

Povratno informacijo dobi mikrokrmilnik z merjenjem toka preko 0.01Ω upora. Pred upor za merjenje toka prikjučimo še eno povezavo, ki gre preko nizkoprepustnostnega filtra, ki ga prikazuje slika 10, na vhod ADC mikrokrmilnika. Ker je napetost v vseh vejah enaka, je napetost, ki jo merimo, enaka napetosti preko upora za merjenje toka. Natančnost analogno digitalnega pretvornika v mikrokrmilniku naj bo čimvečja.

Poleg funkcij, ki jih mikrokrmilnik potrebuje za upravljanje z vezjem za krmiljenje LED diode, potrebujemo še nekatere dodatne funkcije. Priklopiti želimo gumb, s katerim bomo upravljali delovanje. Priklopiti želimo tudi temperaturni senzor, ki bo zagotavljal, da se ob prekomernem povišanju temperature LED diode izklopijo. Izmeriti bo potrebno tudi napetost na bateriji, za kar potrebujemo še en vhod ADC ter konstantno napetost, s katero bomo primerjali napetost baterije.

Vsem zgornjim zahtevam ustreza mikrokrmilnik ATTiny861. Mikrokrmilnik ima 11-kanalni analogno digitalni pretvornik z 10 bitno natančnostjo. Vsebuje tudi notranji ojačevalnik vhodov, ki lahko napetost na vhodu ojača do 32 krat. Mikrokrmilnik ima konstantno notranjo referenčno napetost $1.1V$, kar nam omogoča natančno merjenje toka, prav tako pa nam konstantna notranja napetost omogoča, da merimo tudi napetost baterije. Vsebuje tudi notranji temperaturni senzor. Mikrokrmilnik ima 3 izhode PWM ter dovolj digitalnih vhodov in izhodov za priklop gumba in, po potrebi, še kakšne dodatne stvari. Pri $3.7V$ napajalne napetosti lahko mikrokrmilnik z notranjim oscilatorjem deluje pri frekvenci $8MHz$.

2.8. Shema



Slika 11: Poenostavljena shema vezja

Slika 11 prikazuje poenostavljeno shemo vezja. Prikazan je le en od pretvornikov navzdol z LED diodo (okvir 1). Manjka tudi priključek za programator.

Da odpravimo vplive motenj na napajanju, je med priključka VCC in GND mikrokrmilnika dodan kondenzator z vrednostjo 10uF. Ko vklopimo LED diodo, pride do nihanj na napajalni liniji. LED dioda naenkrat zahteva velik tok. Ker napetostni vir ni idealen, tega toka ne more zagotoviti v trenutku, zato pride do nihanja v napetosti (napetost pade). Te motnje kondenzator odpravi. Ker ima mikrokrmilnik dva para priključkov VCC in GND, sta na sliki 11 narisana dva kondenzatorja, ki ju prikazuje okvir 2. Ko izdelujemo realno vezje, je potrebno ta dva kondenzatorja namestiti čim bližje posameznemu paru priključkov VCC in GND.

V okviru 3 sta na sliki 11 prikazana dva nizkoprepustnostna filtra. Na vsak vhod ADC dodamo po en tak filter, ki iz signala odstrani visoke frekvence. Filtra je potrebno namestiti čim bližje mikrokrmilniku.

V okviru 4 je napetostni delilnik, ki je uporabljen za merjene stanja baterije. Mikrokrmilnik ATTiny861 vsebuje interno referenčno napetost 1.1V. Ta napetost je konstantna, ne glede na vir,

iz katerega je mikrokrmilnik napajan. Vendar to pomeni, da lahko merimo le napetosti, ki so manjše ali enake 1.1V. Da bi lahko merili napetost na bateriji, je uporabljen napetostni delilnik.

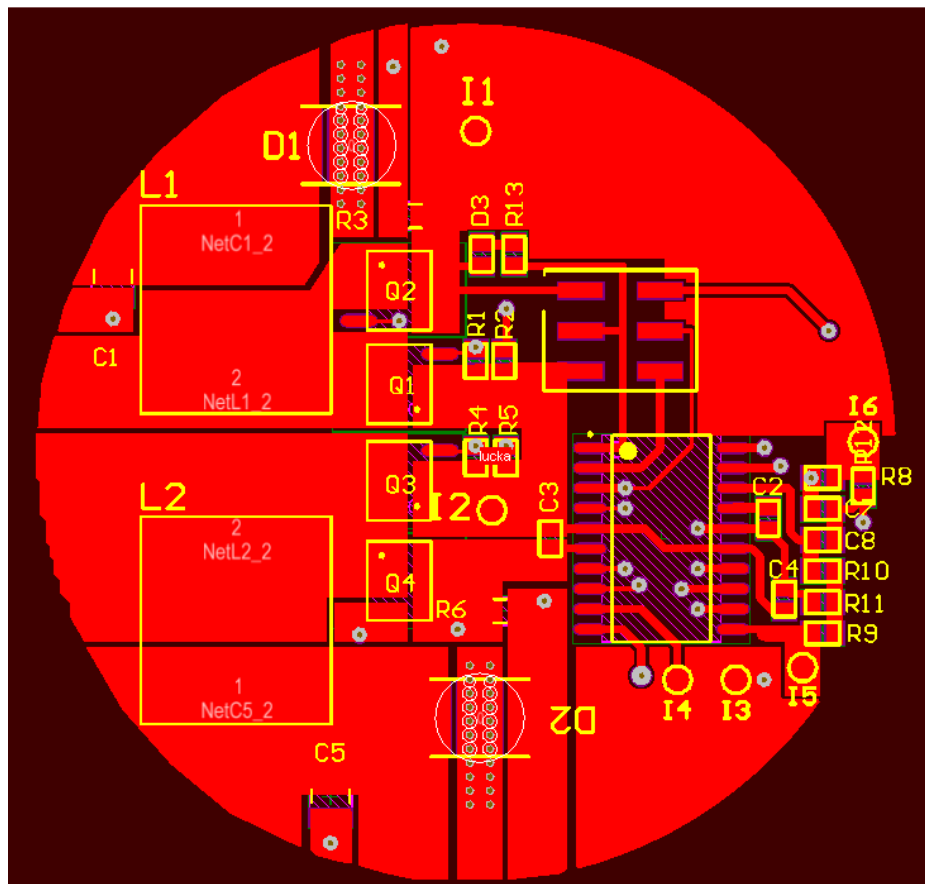
$$U_o = \frac{R_1}{R_1+R_2} * U_i \quad (40)$$

Z enačbo napetostnega delilnika (40) določimo ustrezni velikosti za potrebna upora. V tem primeru gre za upora R3 in R6. Če uporabimo vrednosti $R_3 = 1500\Omega$ in $R_6 = 500\Omega$, dobimo $V_o = 0.25 * V_i$. Napetostni delilnik bo vhodno napetost delil s 4. Pri največji napetosti na bateriji 3.7V dobimo na izhodu 0.925V, kar ustreza zahtevam za analogni digitalni vhod.

Na okvirju 5 na sliki 11 je „pullup“ upor, ki zagotavlja, da v primeru, ko mikrokrmilnik ne deluje, LED diode ne svetijo. P tip tranzistorja MOSFET zahteva, da je na vratih prisotna visoka napetost, če želimo, da tranzistor MOSFET ne prevaja toka.

10uF kondenzator dodamo tudi na signal AREF mikrokrmilnika, da zagotovimo stabilnejše pretvorbe ADC.

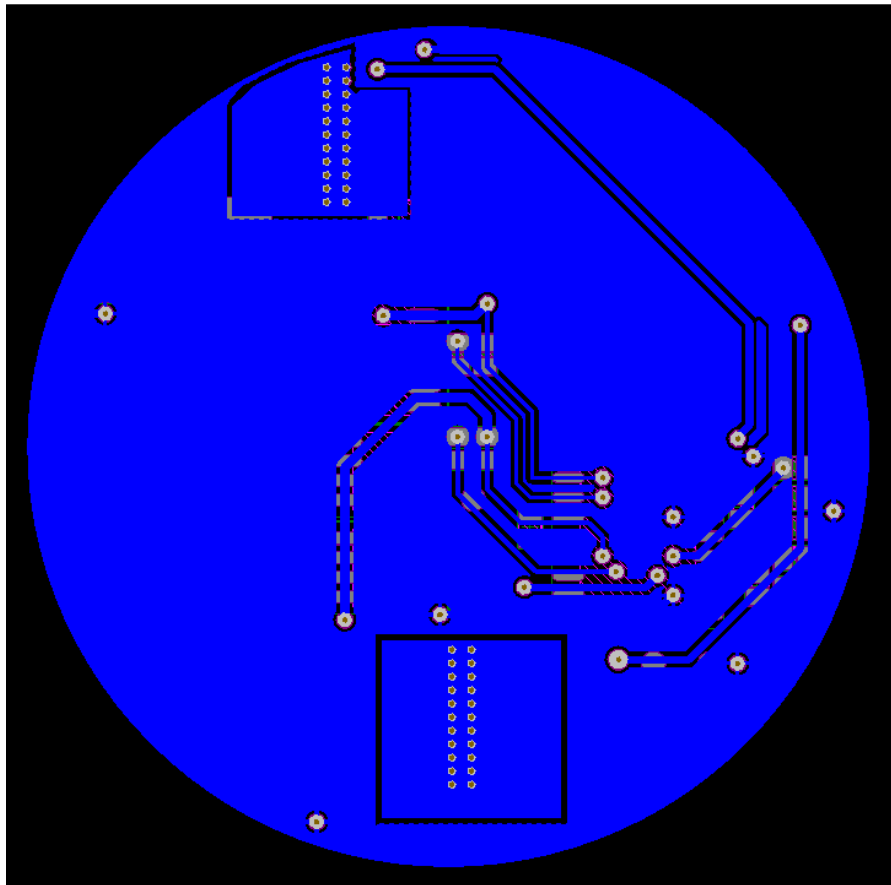
2.9. Tiskano vezje



Slika 12: Zgornja plast tiskanega vezja

Ploščica je izdelana dvostransko vendar so vse komponente na prednji strani, da lahko drugo stran prislonimo na hladilnik. LED diodi bi se brez hladilnika zelo hitro pregreli. Pri načrtovanju tiskanega vezja se držimo naslednjih dobrih praks:

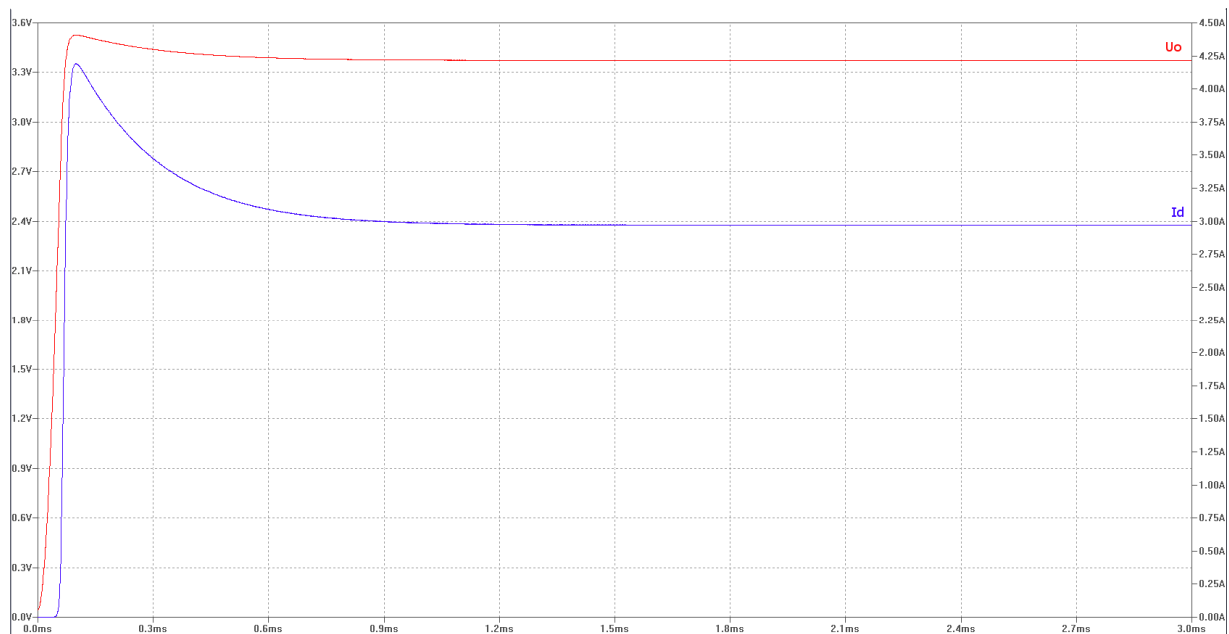
- Čimvečje območje naj prekriva ozemljitev. S povečanjem območja ozemljitve zmanjšamo njegovo induktivnost.
- Vse povezave naj bodo čim krajše, da zmanjšamo presluh med njimi. Kratka pot signalov do ozemljitve učinkovito zmanjša vse parazitske efekte.
- Komponente naj bodo ločene po njihovi funkcionalnosti. Še posebno pozornost posvetimo temu, da so deli vezja, ki prevajajo velike tokove, čimbolj oddaljeni od delov vezja, kjer so tokovi majhni.



Slika 13: Spodnja stran tiskanega vezja

3. Simulacija z orodjem SPICE

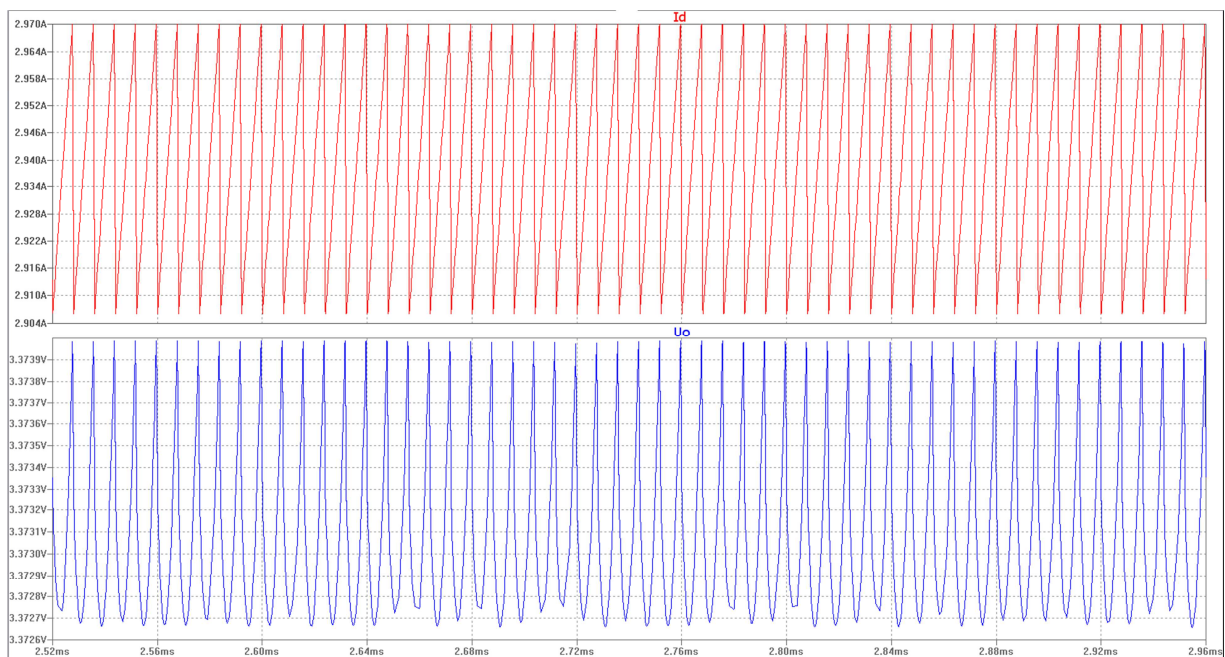
Pred realizacijo vezja je dobro izvesti simulacije in se prepričati o njegovem delovanju. Simulacija je bila narejena z orodjem SPICE. SPICE je splošno namenski odprtokodni program za analizo in simulacijo analognih elektronskih vezji. Najprej je potrebno vezje in vse komponente ustrezno opisati. Nato so bile izdelane različne simulacije, ki so predstavljene na sledečih slikah.



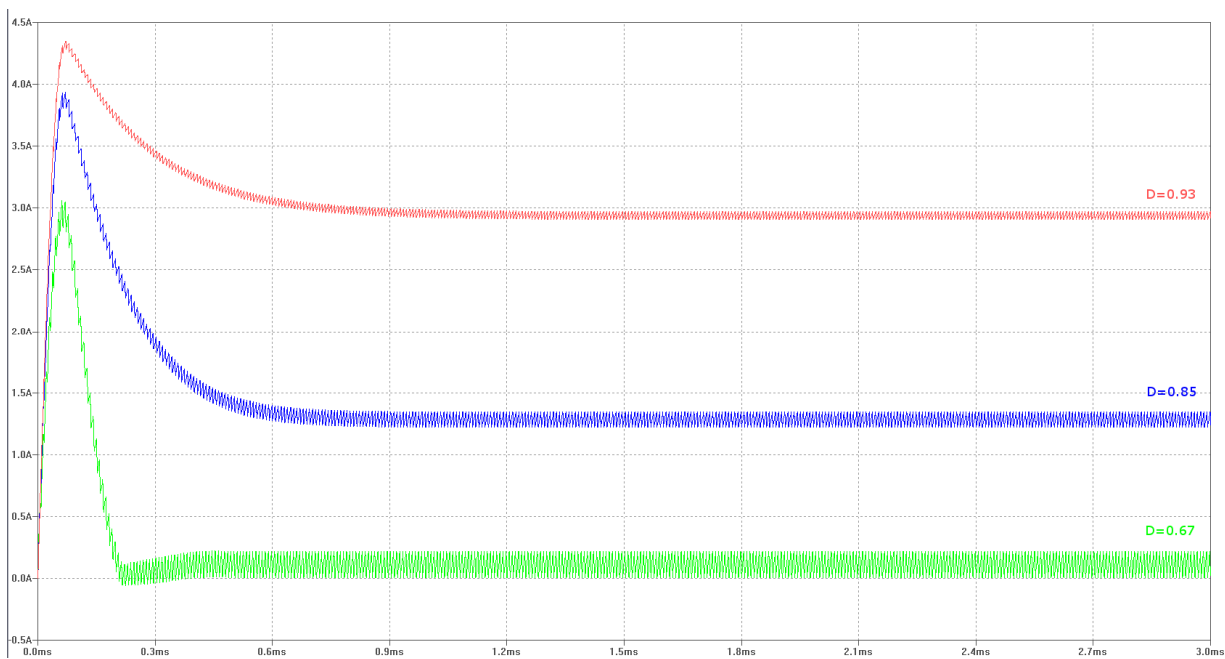
Slika 14: Tok in napetost na izhodu pretvornika navzdol

Slika 14 prikazuje tok in napetost na izhodu pretvornika navzdol pri vhodni napetosti $U_i = 3.7V$ in delovnem ciklu $D = 0.93$. Rdeča črta prikazuje napetost, modra pa tok. Vidimo, da je delovni cikel nekoliko višji kot pa izračunani. To se zgodi zato, ker smo v izračunih delovnega cikla (14) predpostavili idealne elemente. Simulacija v orodju SPICE uporablja modele elementov, ki so bolj natančni kot naši izračuni. Opazimo tudi, da takoj po preklopu tok naraste preko dovoljene vrednosti. Da se izognemo temu, moramo v programu zagotoviti, da se delovni cikel povečuje postopoma.

Na sliki 15 lahko odčitamo valovitost toka in valovitost napetosti. Valovanje toka je približno 70mA. To je sicer nekoliko več kot valovitost toka, ki smo jo uporabili v izračunih in je posledica izbora tuljave. Uporabili smo tuljavo, ki je nekoliko manjša od izračunane vrednosti. Valovitost napetosti je le 1mV. To se kar precej razlikuje od izračunov, vendar smo uporabili kondenzator s precej večjo kapacitivnostjo kot pa je bila minimalna potrebna kapacitivnost, ki smo jo izračunali.

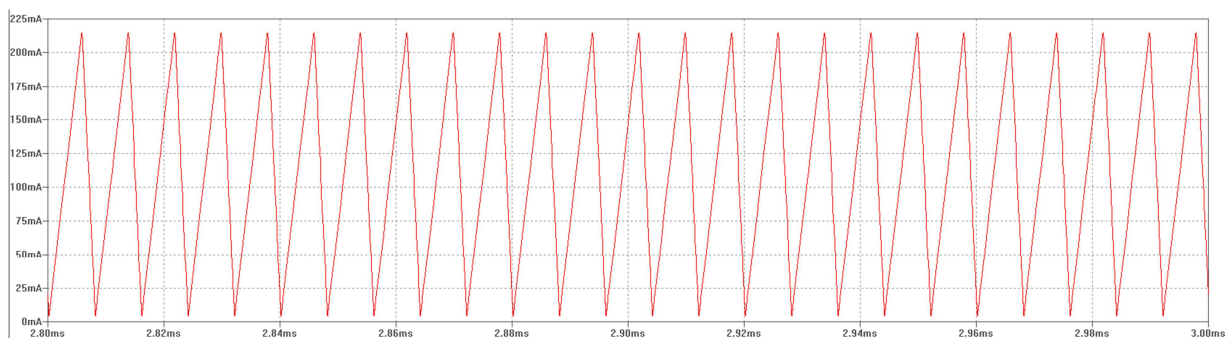


Slika 15: Valovanje napetosti in toka na izhodu pretvornika navzdol

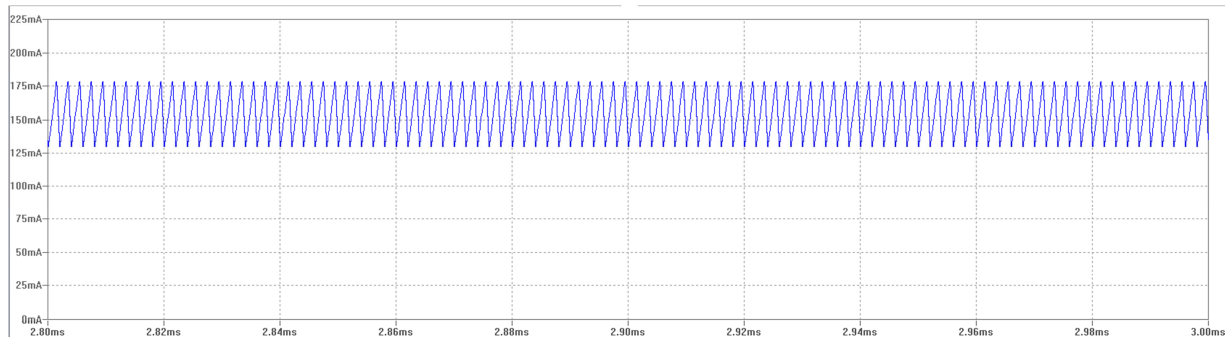


Slika 16: Tok na izhodu pretvornika navzdol v odvisnosti od delovnega cikla

Na sliki 16 je predstavljen potek toka pri treh različnih delovnih ciklih. Zelena barva predstavlja delovni cikel 0.67. Modra barva predstavlja delovni cikel 0.85, rdeča pa delovni cikel 0.93. Že iz te slike je razvidno, da je valovitost toka pri nižjem delovnem ciklu večja. Podrobneje si pogledjmo si valovitost toka pri delovnem ciklu 0.67. Slika 17 nam prikazuje kratek odsek. Odčitamo lahko, da je valovanje toka kar 220mA. Da valovanje toka zmanjšamo, povečamo frekvenco delovanja. Slika 18 prikazuje potek valovanja toka pri frekvenci 500kHz. Opazimo, da je valovanje toka ponovno v zelenih mejah, in sicer okrog 50mA.



Slika 17: Valovanje toka na izhodu pri delovnem ciklu $D = 0.67$ in frekvenci $F = 125\text{kHz}$



Slika 18: Valovanje toka na izhodu pri delovnem ciklu $D = 0.67$ in frekvenci $F = 500\text{kHz}$

Frekvenca (kHz)	Delovni cikel	Izkoristek (%)	Valovanje toka (mA)
50	0.67	78	500
50	0.85	92	320
50	0.93	94	160
125	0.67	72	220
125	0.85	91	120
125	0.93	94	60
250	0.67	70	110
250	0.85	90	60
250	0.93	93	30
500	0.67	68	50
500	0.85	89	30
500	0.93	92	15
1000	0.67	65	25
1000	0.85	86	15
1000	0.93	90	8

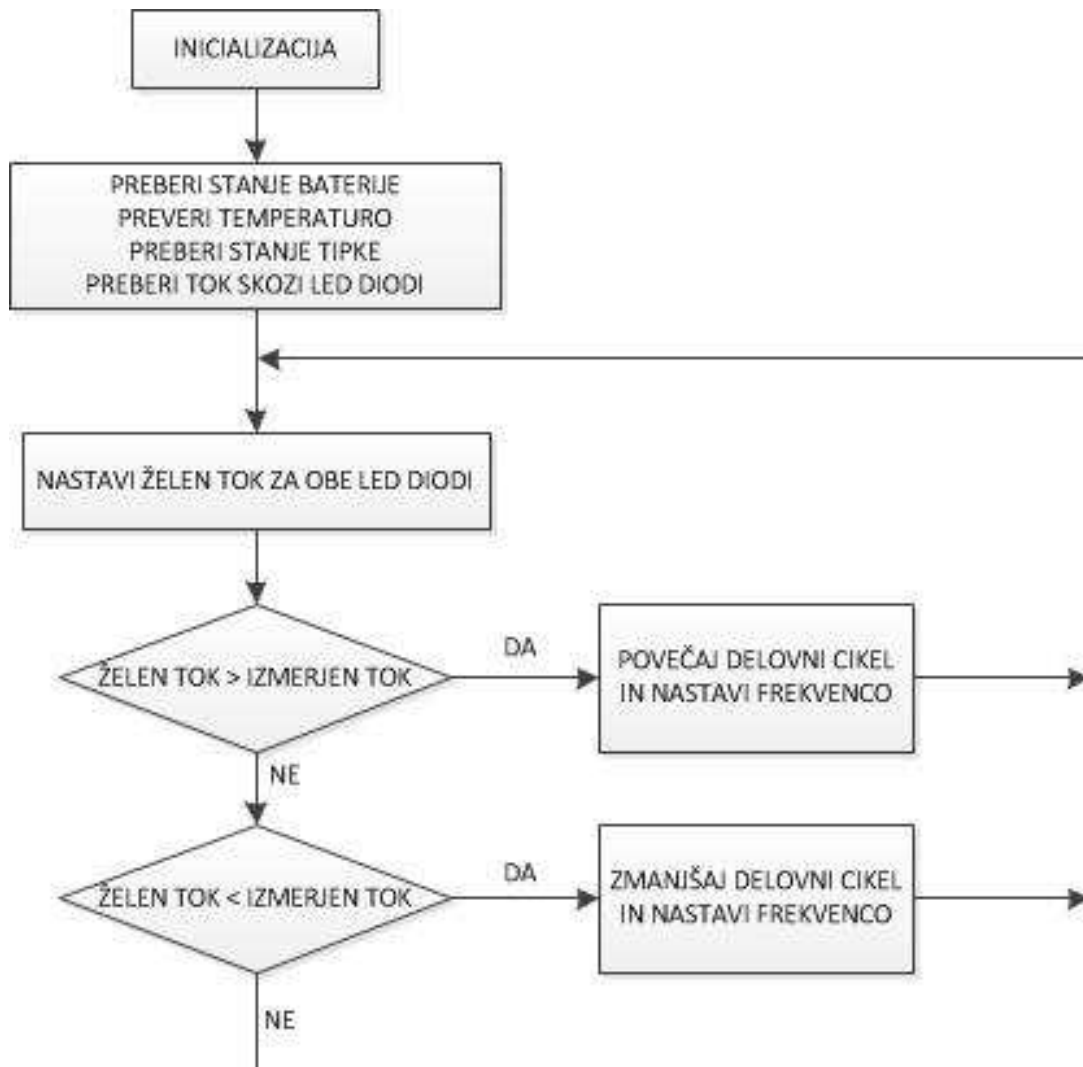
Tabela 2: Izkoristek in valovitost toka glede na frekvenco in delovni cikel

V tabeli 2 vidimo, kako se spreminjata izkoristek in valovitost toka v odvisnosti od frekvenca in delovnega cikla. Kot smo že ugotovili, se izkoristek z večanjem frekvenca manjša, prav tako tudi valovitost toka. Vendar se valovitost toka zmanjšuje precej hitreje. S podvojitvijo frekvenca preklapljanja se izkoristek zmanjša le za 1%, valovitost toka pa kar za polovico. Na podlagi tabele 2 lahko izdelamo še tabelo 3, ki opisuje, kako se frekvenca spreminja z delovnim ciklom v izdelanem programu.

Delovni cikel	Frekvenca	Izkoristek	Valovanje toka
0 – 0.70	500kHz	<70%	<50mA
0.70-0.90	250kHz	≈90%	≈60mA
0.90-1	125kHz	≈95%	≈60mA

Tabela 3: Frekvenca v odvisnosti od delovnega cikla v programu

4. Izdelava programa



Slika 19: Blokovni diagram programa mikrokrmilnika

Osnovni blokovni diagram programa je prikazan na sliki 19. Najprej krmilnik izvede inicializacijo vseh potrebnih naprav, nato pa stalno izvaja glavno zanko. V tej zanki najprej preveri stanje vseh vhodov. Tako najprej preveri stanje baterije, nato preveri temperaturo. Za tem preveri, če je gumb za preklop med stanji pritisnjen. Na koncu preveri še tok na obeh LED diodah. Ko je program pridobil vse potrebne informacije, lahko izvede odločitveno logiko in nastavi parametra TOK0 in TOK2, ki določata želen tok na LED diodah. Ko sta parametra določena, mikrokrmilnik glede na trenutni in želeni tok, poveča oziroma zmanjša parametra OCR0 in OCR2, ki določata dolžino impulza signala PWM.

4.1. Inicializacija

Pri inicializaciji je potrebno vse naprave pripraviti za delovanje. Nastavijo se vsi potrebni registri za delovanje treh vhodov ADC. ADC1 meri napetost na bateriji, ADC2 in ADC3 merita napetost na uporih za merjenje toka prek posamezne LED diode. Prav tako bomo stanje notranjega temperaturnega senzorja brali z analogno digitalnim pretvornikom.

Za inicializacijo in nastavitve analogno digitalnega pretvornika je potrebno nastaviti delilnik (prescaler) analogno digitalnega pretvornika. Delilnik je potrebno nastaviti tako, da bo frekvenca vzorčenja med 50kHz in 200kHz. Frekvenca naj bo čim višja, vendar še vedno v predpisanemu območju. Ker je frekvenca ure mikroprocesorja 8MHz, dobimo z delilnikom 64 frekvenco analogno digitalnega pretvornika 125kHz. Za eno vzorčenje je potrebnih 13 ciklov ADC, tako da je dejansko število meritev, ki jih lahko opravimo v sekundi, 9600. Nastaviti je potrebno še referenčno napetost, ki jo analogno digitalni pretvornik uporablja. V našem primeru je to 1.1V.

Nastavijo se tudi registri, ki jih potrebujemo za delovanje izhodov PWM. Mikrokrmilnik ima dva časovnika, oba lahko generirata tudi PWM signal. Uporabljen je bil časovnik 1, saj njegove funkcionalnosti bolje ustrezajo našim zahtevam. Tudi tu je potrebno nastaviti delilnik urinega signala. Delilnik nastavimo tako, da bo frekvenca časovnika kar najbližje želeni izračunani frekvenci preklapljanja tranzistorja MOSFET. Vrednost delilnika nastavimo na 64 in tako dosežemo frekvenco preklapljanja 125kHz. Frekvenco preklapljanja moramo ob nižjih vrednostih želenega toka ustrezno povečati.

Pin A6, na katerega je priključen gumb, je potrebno nastaviti kot vhod ter vklopiti interni "pullup" upor.

4.2. Branje vhodov

Za branje vseh vhodov ADC sem napisal funkcijo `getStableADC(int channel)`, ki kot parameter sprejme število kanala ADC. Funkcija najprej počaka, da se vhod umiri. V zanki čaka, dokler se zadnje 3 prebrane vrednosti ne razlikujejo za več kot 2. Ko se vhod umiri, funkcija prebere 10 vrednosti ter izračuna povprečno vrednost. V primeru, ko se vhod ne umiri v določenem času, funkcija vrne -1. V primeru, da je vhod miren, se torej za vsako branje analognega vhoda potrebuje 10 meritev. Prebrati moramo 4 analogne vhode: napetost baterije, temperaturni senzor in napetosti preko uporov za merjenje toka v vsakem izmed pretvornikov navzdol. Tako lahko v eni sekundi opravimo 240 meritev. Ker mikrokrmilnik izvaja tudi kodo, ki ni povezana z analognimi vhodi, je dejanska vrednost meritev, ki jo lahko izvedemo okrog 150.

4.2.1. Preverjanje baterije

Preverjanje stanja baterije je preprosto. Pokličemo funkcijo `getStableADC(1)` in vrnjeno vrednost shranimo za poznejšo obravnavo. Vrednost moramo še ustrezno pretvoriti. Mikrokrmilnik nam vrača vrednosti od 0 do 1024. Vrednost baterije se giblje nekje med 3V in 4V. Ker smo uporabili uporovni delilnik 1:4 vemo, da je vrednost na vhodu ADC nekje med 0.75V in 1V. Ker smo za

pretvornik ADC uporabili interno referenčno napetost 1.1V, in ker je natančnost 10bit (1024 vrednosti), je vrednost, ki jo vrne mikrokrmilnik kar vrednost v mV. Da dobimo dejansko napetost na bateriji, je potrebno to vrednost pomnožiti s 4, da izničimo efekt uporovnega delilnika.

$$U_{min} = 1.1V / 1024$$

$$= 1mV$$

4.2.2. Preverjanje temperature

Vrednost temperaturnega senzorja preberemo kot vrednost vhoda ADC11. Vrednost moramo še ustrezno skalirati in premakniti. Da določimo koeficienta x in m, potrebujemo dve točki. Ti dve točki dobimo tako, da določimo vrednosti pri dveh znanih temperaturah.

4.2.3. Preverjanje toka skozi LED diodi

Za preverjanje toka skozi LED diodi prav tako uporabimo funkcijo getStableADC.

Mikrokrmilnik ima ADC z 10 bitno natančnostjo. Za referenčno napetost sem uporabil interno napetost 1.1V. Najmanjša napetost na vhodu, ki jo lahko izmerimo, je torej:

$$U_{min} = 1.1V / 1024$$

$$= 1mV$$

Preden signal vstopi v ADC gre še skozi dvestokratni ojačevalnik. Najmanjša napetost na vhodu v ojačevalnik je torej 5uV.

Ker je to tok preko 0.0015ohm upora, lahko izračunamo najmanjšo izmerjeno napetost:

$$I_{min} = 0.0000005V / 0.0015ohm$$

$$= 3.3mA$$

Največja izmerjena napetost pa je:

$$I_{max} = I_{min} * 1024$$

$$= 3.4A$$

Vrednost, ki jo preberemo iz ADC, moramo torej še pomnožiti s 3.3, da iz napetosti dobimo tok.

4.2.4. Preverjanje tipke

Trenutno stanje enostavno preberemo kot vrednost digitalnega vhoda. Če je vrednost 1, tipka ni pritisnjena, če pa je vrednost 0, je tipka pritisnjena. Vendar to še ni dovolj. Ugotoviti moramo

tudi, koliko časa je bila tipka pritisnjena. Program shrani zadnjo vrednost tipke. Če je trenutna vrednost različna od zadnje, program ustrezno ukrepa.

```
Temp = INPUT(2);
if (Temp != last_input)
    if (Temp == 0) {
        btn_down = CURRENT_TIME;
    }
Else {
    time_pressed = CURRENT_TIME - btn_down;
    if (time_pressed > 0.5s & time_pressed < 1.5s)
        mode0 = (mode0++)%4;
    if (time_pressed > 1.5s & time_pressed < 2.5s)
        mode1 = (mode1++)%3;
    if (time_pressed > 2.5s)
        mode0 = 0;
}
last_input = Temp;
```

Če je uporabnik gumb pritisnil, si program zapomni čas, ko se je to zgodilo. Ko uporabnik gumb izpusti, program preveri, koliko časa je bil gumb pritisnjen. Če je bil gumb pritisnjen manj kot pol sekunde, se ne zgodi nič. Če je bil gumb pritisnjen eno sekundo, program nastavi spremenljivko mode0. Mode0 predstavlja stopnjo svetjenja. Njena vrednost je lahko od 0 (ugasnjeno) pa do 3 (največja moč). Če je bil gumb pritisnjen dve sekundi, program nastavi spremenljivko mode1. Mode1 ima lahko vrednost 0 (leva LED), 1 (desna LED) ali 2 (obe LED). Če je bil gumb pritisnjen več časa, program svetilko izklopi.

4.3. Nastavljanje parametrov TOK0 in TOK2

Tu program nastavi parametra TOK0 in TOK2, ki določata želen tok na posamezni LED diodi. Na to, kakšen je želen tok, vplivata spremenljivki mode0 in mode1. Poleg tega pa tudi trenutna temperatura ter stanje baterije.

```
MAX_CURRENT = 3000mA;

If (TEMP > 50°C) MAX_CURRENT = 50mA;
If (Ubat < 3.4V) MAX_CURRENT = 50mA;
If (Ubat < 3.2V) MAX_CURRENT = 0;

If (mode1 == 0 | mode1 == 2)
    TOK0 = min(MAX_CURRENT, mode0*700mA);
Else TOK0 = 0;
```

```
If (mode1 == 1 | mode1 == 2)
    TOK2 = min(MAX_CURRENT, mode0*700mA);
Else TOK2 = 0;
```

V primeru, ko temperatura preseže 50°C, se nastavi maksimalen tok 50mA. Tudi s preklapljanjem med različnimi stopnjami svetilnosti, tega ne moremo spremeniti, dokler temperatura ne pade. Ko napetost baterije pade pod 3.4V, se nastavi maksimalen tok 50mA. To se zgodi, ko ima baterija še približno 10% energije. Ko napetost baterije pade pod 3.2V, se prepreči nadaljnje praznjenje, da ne bi prišlo do poškodbe baterije.

4.4. Nastavljanje izhodov OCR0 in OCR2

Na koncu moramo le še nastaviti vrednosti registrov OCR0 in OCR2, ki določata delovni cikel izhodov PWM.

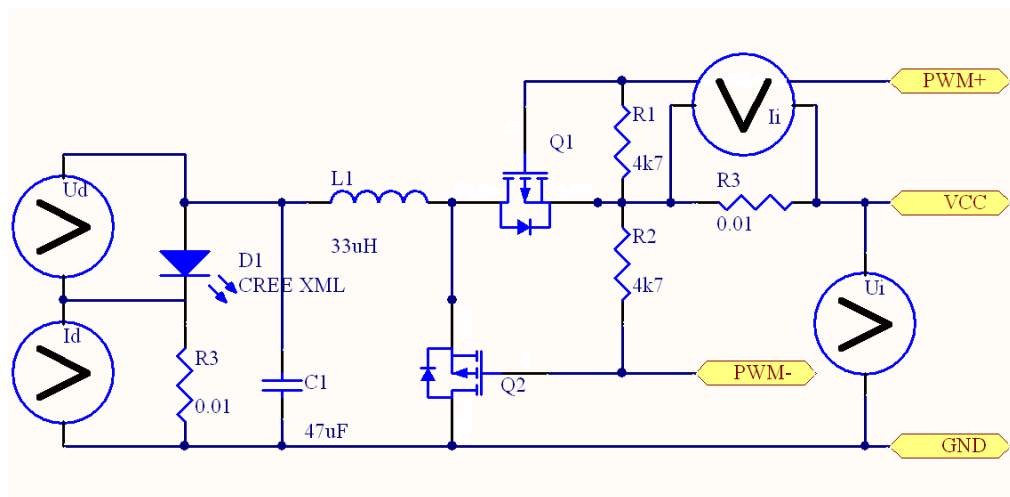
```
If (TOK0 < I0 & OCR0 < 255) OCR0++;
Else if (TOK0 > I0 & OCR0 > 0) OCR0--;

If (TOK2 < I2 & OCR2 < 255) OCR2++;
Else if (TOK2 > I2 & OCR2 > 0) OCR2--;
```

Če je želen tok manjši od dejanskega toka, se vrednost registra OCR poveča. Če je želen tok večji od dejanskega toka, se vrednost registra OCR zmanjša.

5. Meritve

Pravilno delovanje vezja preverimo še z meritvami. Za izvedbo meritev je bilo izdelano vezje, ki vsebuje samo en pretvornik navzdol. V vezje priključimo merilne inštrumente kot prikazuje slika 20.



Slika 20: Vezje z merilnimi inštrumenti

Pred vhod v buck pretvornik je dodan še upor R4, ki nam omogoča merjenje toka na enak način kot R3. Z merjenjem napetosti na uporih R3 in R4 lahko izračunamo tok skozi upora. Meritve izvedemo pri treh stopnjah svetilnosti. Pri najnižji svetilnosti je želen tok skozi LED diodo 100mA, pri srednji svetilnosti 1A, pri najvišji svetilnosti pa 3A. Rezultati so podani v tabeli 4. Izkoristek je izračunan z uporabo enačbe

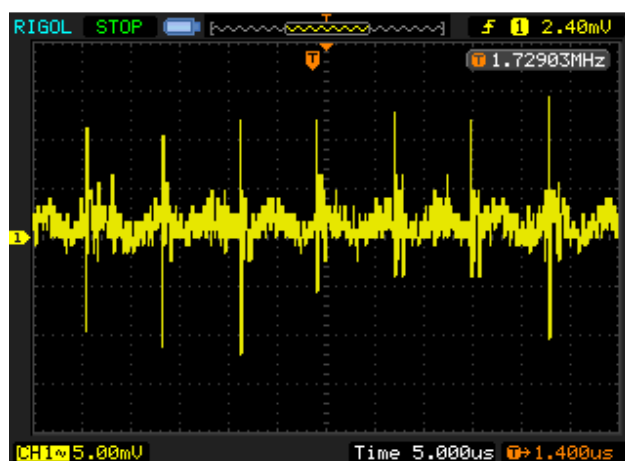
$$Izkoristek = \frac{U_d \cdot I_d}{U_i \cdot I_i} \quad (41)$$

Svetilnost	Ui	Ii	Ud	Id	Frekvenca	D	Izkoristek
nizka	3.82V	110mA	2.7V	100mA	500kHz	50%	64%
srednja	3.67V	960mA	2.95V	1000mA	250kHz	70%	83%
visoka	3.63V	2700mA	3.15V	3000mA	125kHz	90%	96%

Tabela 4: Meritve za tri stopnje svetilnosti

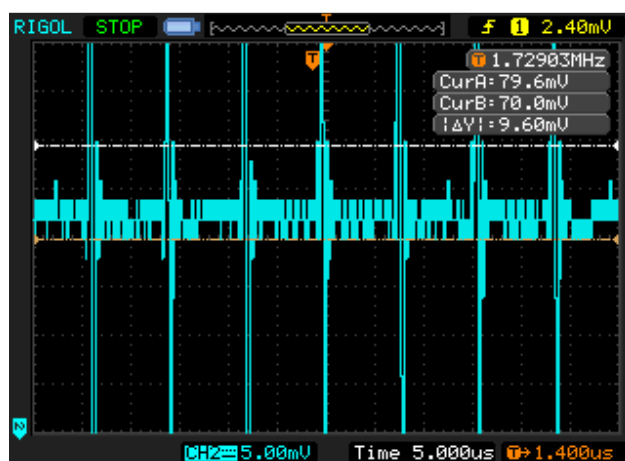
Opazimo lahko, da se vhodna napetost spreminja. To se zgodi zaradi notranje upornosti baterije ter upornosti priklonih žic. Efekt zmanjšamo z vzporedno vezavo večih baterij. Rezultati so podobni vrednostim, ki smo jih izračunali v drugem poglavju.

Z osciloskopom preverimo še valovitost toka ter valovitost napetosti na izhodu pretvornika navzdol. Slika 21 prikazuje valovitost napetosti na izhodu pretvornika navzdol pri visoki svetilnosti. Prikazana je samo izmenična komponenta. En horizontalni razdelek nam predstavlja 5us. Vidimo lahko, da je frekvenca približno 1.5 razdelka oziroma $100000/7.5 = 125\text{kHz}$. Valovitost toka je le okrog 5mV (en vertikalni razdelek na sliki).



Slika 21: Valovitost napetosti pri visoki svetilnosti

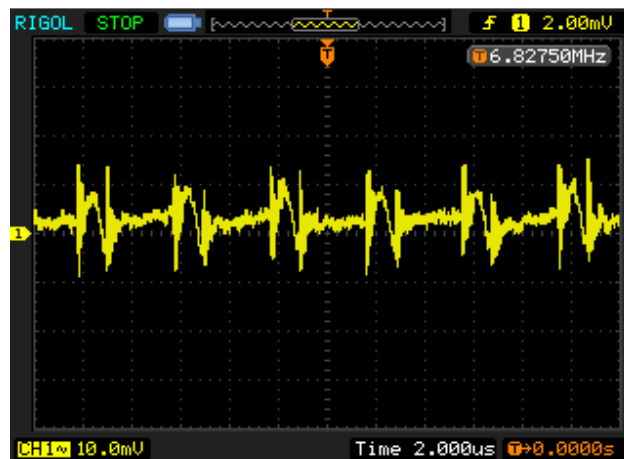
Slika 22 prikazuje valovitost napetosti na izhodu za merjenje toka. Ker poznamo upornost, lahko določimo valovitost toka na izhodu pretvornika navzdol. Čeprav ima predviden upor upornost 0.01Ω , je bila upornost pri izvajanju teh meritev 0.03Ω .



Slika 22: Valovitost napetosti na upor za merjenje toka pri visoki svetilnosti

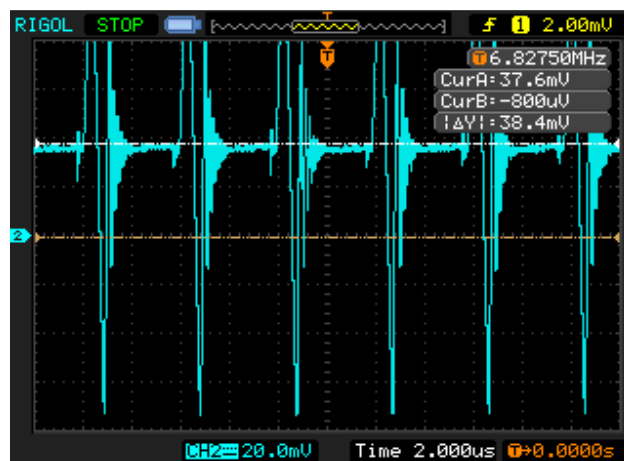
Spodnja oranžna črta na sliki predstavlja napetost 70mV . En vertikalni razdelek predstavlja napetostno razliko 5mV . Če upoštevamo upornost 0.03Ω , lahko izračunamo tok ter valovitost toka. Tok je 2500mA , valovitost toka pa kar 120mA . Izmerjena valovitost toka torej nekoliko presega želeno.

Slika 23 prikazuje valovitost napetosti na izhodu pretvornika navzdol pri srednji svetilnosti. En horizontalni razdelek na sliki predstavlja $2\mu\text{s}$. Frekvenca je približno 2 razdelka = 250kHz . En vertikalni razdelek predstavlja 20mV . Odčitamo lahko, da je valovitost napetosti približno 40mV .



Slika 23: Valovitost napetosti pri srednji svetilnosti

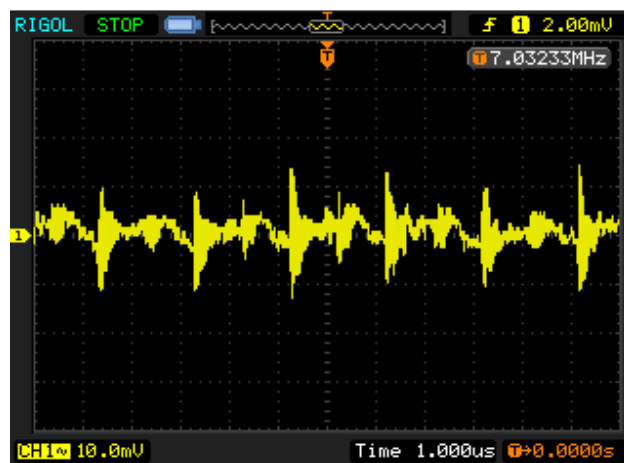
Poglejmo si še valovitost toka pri srednji svetilnosti. Z enakimi predpostavkami kot pri visoki svetilnosti lahko iz slike 24 razberemo tok skozi LED diodo ter valovitost toka. Bela črta na sliki predstavlja napetost 38mV. Tok skozi LED diodo je 1.2A, valovitost toka pa okrog 100mA.



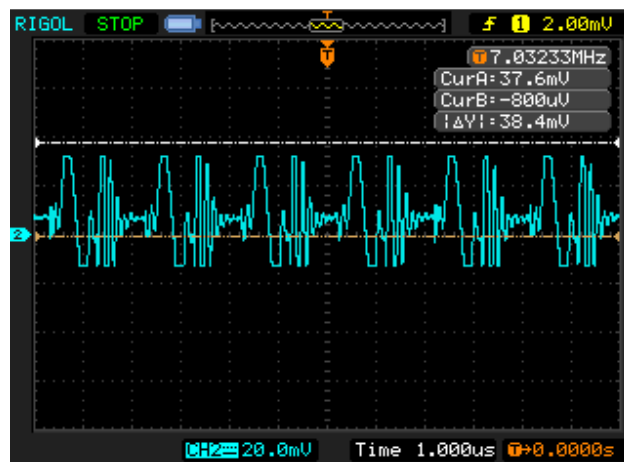
Slika 24: Valovitost napetosti na upor za merjenje toka pri srednji svetilnosti

Na sliki 25 in 26 si lahko ogledamo podobne rezultate še pri nizki svetilnosti. Frekvenca se tokrat poveča na 500kHz, valovitost toka je okrog 20mV, tok skozi LED diodo približno 200mA, valovitost toka pa 100mA.

Na vseh slikah opazimo manjše oscilacije v času prevajanja tranzistorja ter večje oscilacije v času preklopa. Manjše oscilacije so najbrž posledica motenj. Vzrok večjih oscilacij sta induktivnost in kapacitivnost linij. Vezje, na katerem so bile izvedene meritve, je precej veliko, povezave pa dolge.



Slika 25: Valovitost napetosti pri nizki svetilnosti



Slika 26: Valovitost napetosti na upor za merjenje toka pri nizki svetilnosti

6. Sklepne ugotovitve

LED svetilka, ki je bila razvita v okviru diplomske naloge, je namenjena uporabi v jamarstvu, lahko pa bi enako vezje uporabili tudi za druge namene. Meritve so pokazale, da svetilka dejansko deluje tako, kot smo predvideli med načrtovanjem. Dosežen je bila precej visok izkoristek, ki pa ga bi bilo mogoče še izboljšati. Da bi dosegli še višji izkoristek, bi morali uporabiti precej dražje komponente. To v večini primerov ni smiselno, saj se izkoristek ne poveča bistveno.

Pri razvoju LED svetilke sem naletel na kar nekaj novih izzivov. Prvič sem se bolj podrobno ukvarjal z načrtovanjem vezij. Največji problem mi je predstavljalo načrtovanje tiskanega vezja. Poblíž sem se seznanil s samo izdelavo tiskanih vezji doma, kot tudi z izdelavo tiskanih vezji v tovarni. Dodaten izziv mi je predstavljalo spoznavanje tipov svetil, LED diod ter vseh vrst elektrotehniških elementov. Tekom izdelave diplomske naloge se je moje znanje na tem področju znatno povečalo. Prvič sem se srečal tudi z orodjem SPICE.

Čeprav sem med izdelavo diplomske naloge naletel na veliko ovir, sem vse uspešno rešil. LED svetilka, ki je bila izdelana, deluje pravilno in ima visok izkoristek, zato menim, da je bil cilj diplomske naloge dosežen.

7. Kazalo slik

Slika 1: Tok preko LED diode v odvisnosti od napetosti.....	5
Slika 2: Enostavno vezje z LED diodo.....	6
Slika 3: Pretvornik navzdol	7
Slika 4: Delovanje pretvornika navzdol	8
Slika 5: Blok diagram vezja	10
Slika 6: Električna shema pretvornika navzdol	12
Slika 7: Zamenjava diode s tranzistorjem MOSFET.....	17
Slika 8: Komplementarna PWM signala	17
Slika 9: Potek napetosti in toka pri zelo majhnem bremenu	19
Slika 10: Nizkoprepustnostni filter.....	20
Slika 11: Poenostavljena shema vezja	22
Slika 12: Zgornja plast tiskanega vezja	23
Slika 13: Spodnja stran tiskanega vezja	24
Slika 14: Tok in napetost na izhodu pretvornika navzdol	25
Slika 15: Valovanje napetosti in toka na izhodu pretvornika navzdol	26
Slika 16: Tok na izhodu pretvornika navzdol v odvisnosti od delovnega cikla.....	26
Slika 17: Valovanje toka na izhodu pri delovnem ciklu $D = 0.67$ in frekvenci $F = 125\text{kHz}$	27
Slika 18: Valovanje toka na izhodu pri delovnem ciklu $D = 0.67$ in frekvenci $F = 500\text{kHz}$	27
Slika 19: Blokovni diagram programa mikrokrmilnika	29
Slika 20: Vezje z merilnimi inštrumenti.....	34
Slika 21: Valovitost napetosti pri visoki svetilnosti	35
Slika 22: Valovitost napetosti na upor za merjenje toka pri visoki svetilnosti.....	35
Slika 23: Valovitost napetosti pri srednji svetilnosti	36
Slika 24: Valovitost napetosti na upor za merjenje toka pri srednji svetilnosti	36
Slika 25: Valovitost napetosti pri nizki svetilnosti	37
Slika 26: Valovitost napetosti na upor za merjenje toka pri nizki svetilnosti	37

8. Kazalo tabel

Tabela 1: Primerjava svetil	4
Tabela 2: Izkoristek in valovitost toka glede na frekvenco in delovni cikel	28
Tabela 3: Frekvenca v odvisnosti od delovnega cikla v programu	28
Tabela 4: Meritve za tri stopnje svetilnosti	34

9. Literatura

- [1] (2012) Atmel, ATtiny261/461/861 Datasheet
dostopno na: <http://www.atmel.com/Images/doc2588.pdf>
- [2] (2012) Buck converter
dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter
- [3] Florijančič Tadej, Sinhroni pretvornik navzdol, Diplomaska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2009
- [4] Koselj Jure, DC-DC pretvornik z digitalno nastavljivim izhodom za napajanje izhodnih ojačevalnikov elektroporatorja, Diplomaska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2007
- [5] Lenk Ron in Lenk Carol, Practical lightning design with LEDs, IEEE Press, New Jersey, 2011
- [6] Peršič Boštjan, Napajalniki, Laboratorijski praktikum iz elektrotehnike, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1991
- [7] Winder Steve, Power supplies for LED driving, Elsevier Inc., Oxford, 2008, ISBN: 978-0-7506-8341-8