

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

Matej Firm

VISOKOZMOGLJIVA 30W LED POTAPLJAŠKA SVETILKA

DIPLOMSKO DELO VISOKOŠOLSKEGA STROKOVNEGA ŠTUDIJA

Ljubljana, 2012

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

Matej Firm

VISOKOZMOGLJIVA 30W LED POTAPLJAŠKA SVETILKA

DIPLOMSKO DELO VISOKOŠOLSKEGA STROKOVNEGA ŠTUDIJA

MENTOR: izr. prof. dr. Dejan Križaj

Ljubljana, 2012

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil svojemu mentorju izr. prof. dr. Dejanu Križaj za strokovno svetovanje, potrpežljivost in spodbudo pri nastajanju diplomskega dela.

Zahvalil bi se tudi vsem, ki so mi na kakršen koli način pomagali pri izdelavi svetilke in diplomskega dela med vsemi bi se še posebej rad zahvalil Gregorju Maček za pomoč in svetovanje na področju litijevih akumulatorjev.

Seveda pa gre zahvala tudi mojemu dekletu Mateji Lukan in celotni družini za vso podporo in pomoč, ki so mi jo nudili v času študija in pisanja diplomskega dela.

POVZETEK

V diplomskem delu opisujem razvoj visokozmogljive LED potapljaške svetilke. Diplomsko delo sem razdelil na 5 glavnih delov, ki si sledijo v ustreznem vrstnem redu od izbire ustreznih svetlečih diod do testiranja svetilke in optimizacije.

V prvem delu sem opisal praktično uporabo svetlečih diod in pojasnil razloge za izbiro LED diode XLamp® XM-L proizvajalca Cree. Opisal sem tudi problem izbire števila LED diod in ustrezne optike ter rešitev z uporabo podatkov o priporočeni svetilnosti.

V drugem delu sem predstavil stikalne napajalnike in opisal vezje napajalnika LED diod z uporabo integriranega vezja LT3755. Analiziral sem izkoristek napajalnika in izhodni tok v odvisnosti od temperature. V tretjem delu pa opisujem krmilni modul svetilke z uporabo mikrokrmilnika in vse uporabljene senzorje.

Ker sem sklopu diplome razvil celotno svetilko, sem moral rešiti tudi problem izbire primerne napajalne vira. Zato v predzadnjem delu opisujem Li-ionske akumulatorje. Ker pa tovrstne celice akumulirajo veliko energije, sem moral rešiti tudi problem varnega polnjenja in praznjenja. Ker na tržišču nisem našel ustreznega polnilnika za enostavno uporabo, sem ga moral razviti svojega.

Delo sem zaključil v celoto v zadnjem delu. Opravil sem meritve avtonomije svetilke in opisal optimizacijo s prilagoditvijo svetilnosti glede na napetost celic, opisal pa sem tudi rešitev problema pri previsoki temperaturi svetilke.

V svetilko sem vgradil LED diode s svetlobnim tokom 3000lm krmiljene s tokovno stabiliziranim stikalnim napajalnikom. Za nadzor svetilke sem izdelal krmilno vezje z uporabo AVR mikrokrmilnika, svetilnost svetilke pa se spreminja glede na pozicijo obroča, napetostjo baterije in temperaturo svetilke. Izdelal sem tudi inteligentni polnilnik litijevih celic katere sem uporabil za napajanje svetilke.

SUMMARY

In the diploma I described high-performance LED diving torch. I divided the diploma into 5 main sections which follows in order from selection of appropriate LEDs to testing and optimization of the torch.

In first section I described practice use of LEDs and explained why I chose XLamp® XM-L LEDs from Cree Company. I also described problem with choosing correct number of LEDs and appropriate optics. I found solution using data about recommended brightness.

In second section I introduced switching power supplies and described LED power supply consist of integrated circuit LT3755. I analyzed power supply efficiency and output current in dependence of temperature. In third part I describe torch control module with AVR microcontroller and all used sensors.

Because I developed torch as whole part I had to solve problem with choosing the right power source for it. That's why in penultimate section I described lithium-ion accumulators. And because these kinds of accumulators accumulate a lot of energy, I also had to solve problems with safe charging and discharging. On market I didn't found any easy to use li-ion battery charger so I decided to develop one by myself.

I finished the diploma with the last section in which I measured torch battery life and described optimizations I made to longer battery life with brightness compensation according to battery cell voltage. I also described how I solved problem with torch overheating.

In torch I installed LEDs with luminous flux 3000lm and appropriate constant current switching power supply. I made control circuit with AVR microcontroller for controlling torch. Output brightness is set by control ring position, battery cell voltage and torch temperature. I also made intelligent lithium-ion battery charger.

KAZALO

1. UVOD	1
2. LED DIODA	2
2.1. Bela LED dioda	4
2.2. Izbira LED diod	6
2.2.1. Cree® XLamp® XM-L.....	6
2.2.2. Število uporabljenih LED diod.....	7
3. NAPAVALNIK	8
3.1. Stikalni napajalniki	9
3.2. »Buck« pretvornik	10
3.3. Napajalnik LED diod z LT3755.....	12
3.3.1. Integrirano vezje LT3755	12
3.3.2. Električna shema LED napajalnika	13
3.3.3. Meritve.....	14
4. KRMILNI MODUL.....	16
4.1. Električna shema in tiskano vezje.....	16
4.2. Atmel AVR mikrokrmilniki	18
4.2.1. Družina mega AVR	18
4.2.2. Atmel Atmega8.....	18
4.3. Magnetni senzorji	19
4.3.1. Hall magnetni senzor	19
4.3.2. Reed kontakt.....	20
4.4. Temperaturni senzor TMP431.....	21
4.5. Delovanje in program	21
5. BATERIJA IN POLNILNIK.....	22
5.1. Li-ion akumulatorji.....	22
5.1.1. Polnjenje in praznjenje.....	23
5.1.2. Baterija	24
5.2. Polnilnik.....	25
5.2.1. Električna shema in vezje	26
5.2.2. Delovanje in program.....	27

6. OPTIMIZIRANJE IN TESTIRANJE	29
6.1. Napetostna prilagoditev svetilnosti.....	29
6.2. Prilagoditev svetilnosti temperaturi svetilke	31
6.3. Izhodna svetilnost.....	32
6.4. Avtonomija svetilke	32
ZAKLJUČEK	34
VIRI	35

KAZALO SLIK

Slika 1: Energijski nivoji.....	2
Slika 2: Plast fosforja na modri LED diodi	5
Slika 3: Svetlobni spekter bele LED diode	5
Slika 4: Cree XM-L	6
Slika 5: Osvetljenost na razdalji od svetila	8
Slika 6: Shema "buck" pretvornika.....	10
Slika 7: LT3755	13
Slika 8: Električna shema LED napajalnika.....	13
Slika 9: Tiskano vezje LED napajalnika	14
Slika 10: Električna shema krmilnega modula	17
Slika 11: Vezje krmilnega modula.....	17
Slika 12: Atmega8 TQFP32	19
Slika 13: Hall-ov senzor.....	20
Slika 14: Reed kontakt	20
Slika 15: Princip balansiranja celic.....	25
Slika 16: Shema polnilnika.....	26
Slika 17: Vezje polnilnika	27
Slika 18: Polnilec, baterija, svetilka.....	33
Slika 19: Test svetilke pod vodo.....	33

KAZALO TABEL

Tabela 1: Polprevodniški materiali	3
Tabela 2: Pozicija obroča	21
Tabela 3: Seznam napak polnilnika	28

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Vhodna napetost in izkoristek	15
Graf 2: Temperatura in tok s časom.....	16
Graf 8: Gostota energije	22
Graf 9: Polnilni cikel litijevih akumulatorjev.....	24
Graf 10: Polnjenje baterije	28
Graf 3: Funkcija prilagoditve svetilnosti.....	29
Graf 4: Povprečna napetost celic s prilagajanjem svetilnosti in brez	30

Graf 5: Prilagoditev svetilnosti.....	30
Graf 6: Prilagajanje svetilnosti temperaturi.....	31
Graf 7: Svetilnost in avtonomija svetilke	32

KAZALO ENAČB

Enačba 1: Valovna dolžina LED diode.....	3
Enačba 2: Svetlobni tok	7
Enačba 3: Osvetljena površina	7
Enačba 4: Izhodna napetost "buck" pretvornika.....	11

1. UVOD

Svetleče diode oziroma LED (ang. Light Emitting Diode) diode kot jih bom v nadaljevanju imenoval na kratko, so postale del našega življenja. Uporabljamo jih povsod od osvetlitve zaslonov mobilnih telefonov, avtomobilskih žarometov do komunikacijskih modulov. Vse večja uporaba visoko svetlečih LED diod, masovna proizvodnja in novi načini izdelave so močno znižali ceno. Izkoristek LED diod (lm/W) se konstantno povečuje, vse bolj pa je pomemben podatek o svetilnosti na denarno enoto (lm/€). Prednosti LED diod pred ostalimi svetili so velika svetilnost na majhnem sevalnem področju, velik izkoristek, dolga življenjska doba, majhna občutljivost na tresljaje, možnost zatemnjevanja s spreminjanjem pulzne širine signala (PWM) in velik spekter barv. Slabosti pa so na prvem mestu visoka cena, ker mora biti LED tokovno krmiljena potrebuje dodatno krmilno vezje, občutljivost na previsoko temperaturo in previsoko napetost (statična napetost). Odvisno od aplikacije pa je ozek sevalni kot LED diod lahko prednost pri uporabi usmerjenih svetil (ročne svetilke, avtomobilski žarometi,...), lahko pa je slabost ko želimo enakomerno osvetliti nek prostor.

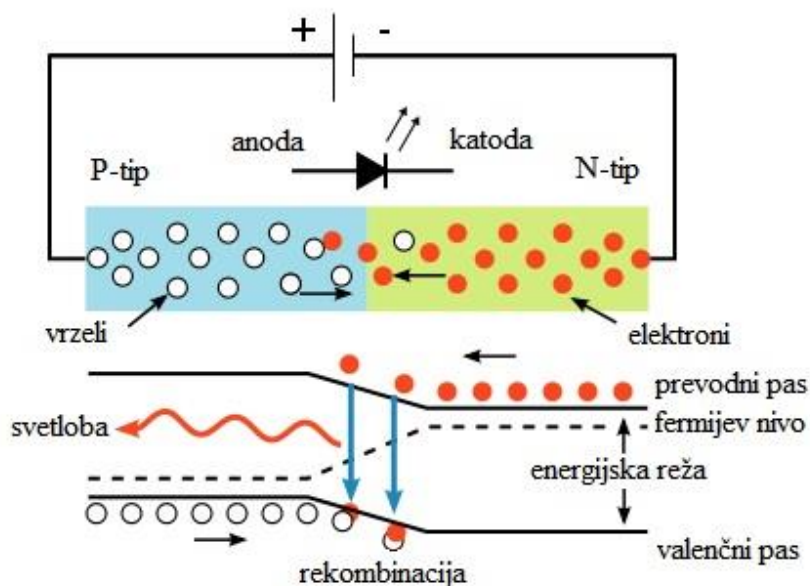
Prav zaradi vseh teh prednosti sem se odločil, da uporabim LED diode v svoji potapljaški svetilki, slabosti pa bom poskusil reševati skozi diplomsko delo. Prvi problem je izbira ustreznih LED diod. Proizvajalcev LED diod je veliko (Seoul, Osram, Philips, Cree, Luminus, Nichia, ...) vsak proizvajalec pa ponuja desetine različnih LED diod. Od vseh proizvajalcev najbolj izstopa Cree. Na začetku leta 2012 so predstavili prototip LED diode z izjemnim izkoristkom 254 lm/W .

Drugi večji problem pa je izbira ustreznega napajalnega vira. Ker na trgu ni ustreznih modulov za tako visoke moči 30W ali več, sem se odločil, da vezje izdelam sam. Zaradi velikega izkoristka sem se odločil za uporabo tokovno stabiliziranega stikalnega napajalnika. Odločil sem se, da uporabim integrirano vezje LT3755 proizvajalca Linear Technology. Izmed vseh integriranih vezij ki so na tržišču sem se za tega odločil, ker za delovanje zahteva malo izhodnih elementov, uporablja zunanji tranzistor kot stikalo in lahko deluje v različnih topologijah.

V nadaljevanju pa bom opisal še druge probleme katere sem srečeval pri izdelavi potapljaške svetilke.

2. LED DIODA

LED dioda je polprevodniški element ki oddaja svetlobo. Sestavljena je iz polprevodnika katerega se dopira (dodaja različne primesi) in se ustvari področja z različnimi koncentracijami donorjev in akceptorjev. Mesto kjer je koncentracija primesi različna imenujemo PN-spoj. Zaradi električnega polja v PN spoju sta P in N plast na različnih električnih potencialih. Razliki potencialov preko zaporne pravimo tudi difuzijska napetost.



Slika 1: Energijski nivoji

LED dioda ima dva priključka anodo (P-tip polprevodnika) in katodo (N-tip polprevodnika). Ko na obeh priključkih ni priključene napetosti, je le malo prostih nosilcev in tok ne teče. Ko pa na anodo priključimo pozitivni del vira, na katodo pa negativni del, pa se pod vplivom dovolj velikega električnega polja (napetost vira mora biti večja od difuzijske napetosti) od atoma odtrgajo vezani elektroni in za seboj pustijo vrzeli katere zapolnijo elektroni sosednjih atomov, temu pojavu pravimo rekombinacija [1, stran 101-103]. Generacijo in rekombinacijo najboljše opišejo energijski pasovi. Energijski nivo prostih nosilcev elektrine imenujemo prevodni pas, energijski nivo kjer so elektroni vezani na atome imenujemo valenčni pas ločuje pa ju prepovedani pas oziroma energijska reža. Pri neposredni rekombinaciji se elektron iz prevodnega pasu rekombinira z vrzeljo v valenčnem pasu, razlika energije pa se odda kot foton [2, stran 62].

Barva emitirane svetlobe je odvisna od velikosti energijske reže oziroma od materiala polprevodnika. Valovna dolžina oddane energije je določena z enačbo [3, stran 187]:

$$\lambda = \frac{h \cdot c_0}{E_g}$$

Enačba 1: Valovna dolžina LED diode

(h - Planckova konstanta, c_0 - hitrost svetlobe v vakuumu, E_g - energijska reža)

Komercialno uporabne LED diode so sestavljene iz elementov III, IV in V skupine v periodnem sistemu najpogosteje galija, arzena, indija in fosforja. Če je LED sestavljena iz enega materiala polprevodnika se imenuje homospojna, če pa je sestavljena iz različnih materialov z različnimi energijskimi režami pa jo imenujemo heterospojna (primer je AlGaAs GaAs) [4]. Heterospojne diode oddajajo več svetlobe kot homospojne. V spodnji tabeli je nekaj najpogosteje uporabljenih materialov polprevodnika.

Material	Barva	Valovna dolžina [nm]
GaAs	Infra rdeča	850-940
AlGaAs	Rdeča	630-660
GaAsP	Oranžna	605-620
GaP	Rumena	585-595
AlGaInP	Zelena	550-570
InGaN	Modra	430-505
AlGaIn	Ultra vijolična	250-400

Tabela 1: Polprevodniški materiali

UI karakteristika LED diode je podobna polprevodniški diodi. V zaporni smeri teče le majhen tok (tok nasičenja), ki je posledica generiranja prostih nosilcev in difudiranja elektronov skozi PN spoj. Tok nasičenja eksponentno narašča s poviševanjem temperature. Če napetost v zaporni smeri še povečujemo pride do plazovite ionizacije kjer steče velik tok ki lahko LED diodo uniči. V prevodni smeri pred kolensko napetostjo teče majhen tok, pri povečevanju napetosti pa se začne tok strmo naraščati in če toka ne omejimo jo lahko trajno uničimo.

Velikost energijske reže se spreminja s temperaturo kar pomeni, da pri konstantnem toku skozi LED diodo napetost na njej pada oziroma pri priključenih konstantni napetosti tok s poviševanjem temperature strmo raste, zato moramo LED diode krmiliti tokovno. Ker je

valovna dolžina izsevane svetlobe obratno sorazmerna z energijsko režo, se prav tako spreminja s temperaturo. [5]

Struktura LED diode je podobna polprevodniški diodi le, da pri LED se večina rekombinacij dogaja na površini in ne v notranjosti PN spoja. To je narejeno tako, da se pri dopiranju poveča koncentracijo primesi in postavi P-tip polprevodnika na površino, N-tip pa služi kot substrat. Večina LED diod ima kupolasto obliko polprevodnika, tako se zmanjša notranje odboje v polprevodniku. Polprevodnik se zaščiti z zalivanjem v epoksidne in silikonske smole, hkrati pa se oblikuje lečo ki razpršeno svetlobo usmeri [4].

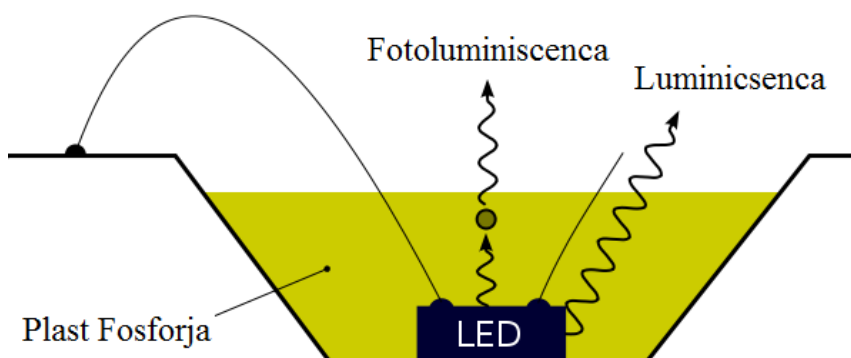
2.1. Bela LED dioda

Vidna svetloba je le del elektromagnetnega spektra in zavzema področje med 340nm in 830nm. V tem vidnem spektru so osnovne barve (rdeča, zelena in modra), prostor kjer se prekrivajo pa zavzemajo druge barve oziroma kombinacije različnih valovnih dolžin (rumena, turkizna, vijolična, ...). Osnovne barve in njihove mešanice bolj podrobno opisujejo barvni sistemi na primer Munsellov sistem. Bela svetloba nima le ene valovne dolžine pač pa je kombinacija vseh valovnih dolžin vidnega spektra. Bela barva ni le ena ampak jo ločimo glede barvno temperaturo. Barvno temperaturo razumemo kot temperaturo črnega telesa ki seva svetlobo in je okoli 2000K ob sončnem zahodu do okoli 6500K ko je sonce najvišje na nebu. Bele barve nad 5000K imenujemo hladne bele, barve okoli 3000K pa so tople bele.

Belo LED diodo ne moremo proizvesti, lahko pa jo sestavimo na dva načina. Prvi način je kombinacija LED diod različnih valovnih dolžin (rdeča, zelena in modra). Ta način je zelo primeren za razsvetljavo saj je mogoče ustvariti vse barvne temperature, s primerno kombinacijo LED diod pa lahko dobimo zelo visok CRI indeks (Color Rendering Index). CRI indeks je primerjava svetila z naravno belo svetlobo enake barvne temperature. Visok CRI (največ 100) pomeni, da je barvni spekter zvezen skozi določeno območje in odgovarja naravni beli svetlobi. Ta način generiranja bele svetlobe se uporablja pri velikih LED prikazovalnikih [6].

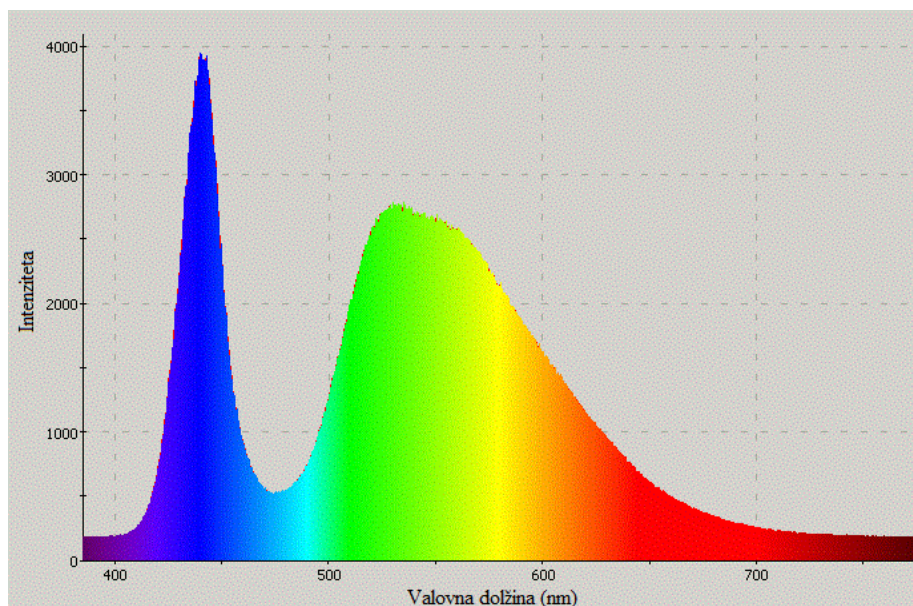
Drug način generiranja bele svetlobe pa je uporaba modre ali ultravijolične LED diode, ki je prevlečena s posebnim fosfornim filtrom, ki pretvori del modre barve z visoko energijo v barve z nižjo energijo (zelena, rumena, rdeča,...), skupaj pa tvorijo belo svetlobo. Pojavu pravimo fotoluminiscenca. Z debelino plasti fosforja vplivamo na barvno temperaturo

svetlobe, saj se pri debelejši plasti absorbira več modre svetlobe hkrati pa se proizvede več rumene kar pomeni da bo bela svetloba nižje barvne temperature tako imenovana »topla bela«.



Slika 2: Plast fosforja na modri LED diodi

Na spodnji sliki je prikazan svetlobni spekter bele LED diode oziroma modre LED diode s plastjo fosforja. Ker je uporabljena modra LED dioda je na grafu viden ozek pas pri 440nm, kar je izsevana svetloba luminiscence, preostali del pa je posledica fotoluminiscence. Najvišjo intenziteto ima modra barva, rdeča pa najnižjo in zato je izsevana barva take bele LED diode modrikasta.



Slika 3: Svetlobni spekter bele LED diode

2.2. Izbira LED diod

Pri izdelavi svetilke sem naletel na problem izbire ustreznih LED diod. Na tržišču je veliko proizvajalcev, najbolj pa izstopa ameriški proizvajalec Cree. Glede na specifikacije njihovih produktov sem se odločil, da uporabim LED diode XM-L.

2.2.1. Cree® XLamp® XM-L

Cree izdeluje svoje LED čipe, ponuja pa tudi sestavljene LED module in LED svetilke. Njihova ponudba LED diod se deli na dve družini, visoko svetleče LED diode in XLamp družino, ki je razdeljena na 4 podskupine (usmerjene in neusmerjene LED diode z enim čipom in usmerjeni in neusmerjeni LED moduli z več čipi). Povečevanje števila čipov v eni LED diodi pomeni večji svetlobni tok, posledica večjih čipov na enaki površini pa je povečano segrevanje.



Slika 4: Cree XM-L

XM-L LED dioda je najbolj zmogljiva usmerjena (sevalni kot 125°) LED dioda z enim čipom v družini XLamp. Pri največjem svetlobnem toku 1000 lm ima svetlobni izkoristek 100 lm/W. Glede na debelino fosforjeve plasti obstajajo v šestih različnih barvnih temperaturah bele barve (od 2600K do 8300K). LED diode v proizvodnji testirajo in določijo v kateri razred spadajo, razredi pa so določeni s svetlobnim izkoristkom. XM-L LED diode se delijo na sedem razredov od S5 z najnižjim izkoristkom do U2 s svetlobnim izkoristkom 160 lm/W pri toku 350mA.

Pri največjem toku skozi LED diodo (3A) je padec napetosti 3,3V kar pomeni, da se troši 10W električne moči. Del te energije se pretvori v svetlobo, preostali del pa v toploto. Zato je pomembno, da se toploto odvaja stran od LED diode, saj je maksimalna temperatura polprevodnika 150°C. Ustrezno odvajanje toplote je pomembno tudi zato, ker svetilnost z višanjem temperature skoraj linearno upada in je pri 150°C nižja za 30% [7].

2.2.2. Število uporabljenih LED diod

Število LED diod ki sem jih uporabil sem določil na podlagi izračuna ter ustrezne optike, ki sem jo lahko dobil na tržišču. Ker nisem dobil podatka priporočeni osvetljenosti potrebni pri potapljanju sem predvideval, da potrebujem podobno osvetljenost kot jo potrebujem pri branju in finem mehaničnem delu kar znaša od 500 do 750 luksov [8].

$$\Phi_v = E_v \cdot A$$

Enačba 2: Svetlobni tok

(Φ_v - svetlobni tok [lm], E_v - osvetljenost [lx], A – površina [m^2])

Ker ima izsevana svetloba iz LED diode obliko stožca, je osvetljena površina določena z enačbo:

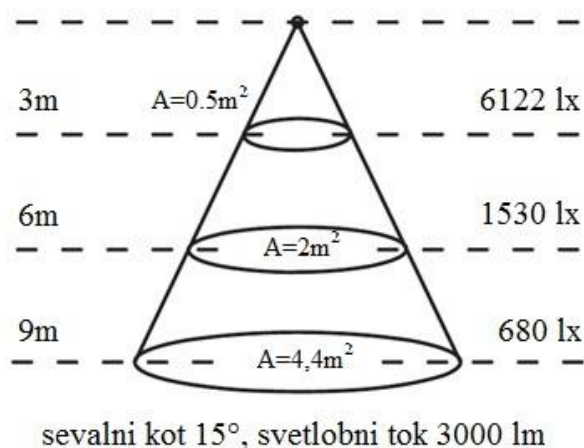
$$A = \pi \cdot \left(\tan \frac{\varphi}{2} \cdot l \right)^2$$

Enačba 3: Osvetljena površina

(A - površina [m^2], φ – sevalni kot [°], l – razdalja svetlobnega vira [m])

Iz zgornjih enačb sem izračunal, da je za priporočeno osvetljenost 500 - 750 luksov efektivna razdalja ene XM-L LED diode ki proizvede do 1000 lm s sevalnim kotom 125° le 34 - 42 cm. Ker pa je ta razdalja praktično neuporabna, sem moral uporabiti parabolo, ki usmeri izsevano svetlobo v snop. Parabola, ki sem jo uporabil je trojna in ima 15° kot. To pa pomeni, da se razdalja za priporočeno osvetljenost pri uporabi treh XM-L LED diod poveča na 8,5 - 10,5m, področje osvetljenosti pa je 4 - 6 m^2 .

Proizvajalci svetilk podajajo podatek o dometu svetilke v metrih. To je podatek o razdalji do točke kjer je osvetljenost enaka 0,25 luksov kar naj bi predstavljalo osvetljenost v temi zaradi mesečine. Iz zgornjih dveh enačb je enostavno izračunati, da je v mojem primeru razdalja do točke kjer je osvetljenost 0,25lx enaka 470m.



Slika 5: Osvetljenost na razdalji od svetila

Izbral sem tri XM-L LED diode, ki sem jih vezal zaporedno. Da sem dosegel največjo svetilnost sem potreboval napajalnik s tokovno stabilizacijo pri 3A in napetostnim izhodom 9 - 10V ki ga bom opisal v naslednjem poglavju.

3. NAPAVALNIK

Glede na izbrane LED diode in določeno močjo 30W pri najvišji svetilnosti sem določil tudi avtonomijo. Priporočljiva avtonomija potapljaške svetilke je čas ki je 2x daljši od trajanja potopa (od 1 – 2 ure). Iz danih podatkov sem izračunal, da potrebujem 30 - 60Wh električne energije. Ker mora biti potapljaška svetilka prenosna in je uporaba akumulatorske baterije nujna, sem moral napajalnik izbrati tudi glede na uporabljeno baterijo. Izbral sem Li-ion akumulatorske baterije »18650« katere so uporabljene pri prenosnih računalnikih. Nazivna napetost ene celice »18650« je 3,6V, kapaciteta pa do 2800mAh (do 10Wh električne energije). Zaradi končnih dimenzij baterijskega paketa sem uporabil 4 celice, ki sem jih vezal zaporedno. Razpon napetosti na paketu je med 12V in 16,8V, ker pa so celice vezane zaporedno pa je največji izhodni tok določen z največjim tokom skozi eno celico kar znaša 2,8A.

Ko sem dobil vse podatke o izhodnem toku (3A), izhodni napetosti (9 – 10V) in razponu vhodne napetosti (12 – 16,8V) in vhodni tok ki ga lahko zagotavljajo akumulatorske baterije (2,8A), sem določil kateri napajalnik bom uporabil. Izbira primerne napajalnika je zelo pomembna saj so LED diode zelo občutljive na nihanje napajalne napetosti, saj se že pri nekaj 100mV višji napetosti tok skozi LED diodo podvoji hkrati pa se pri konstantni napajalni

napetosti z višanjem temperature tok povečuje. Očitno je, da direktna vezava baterije na LED diode ni mogoča in da je edini varni način krmiljenja LED diod krmiljenje s konstantnim tokom.

Zadnji problem je izbira vrste napajalnika. Uporaba linearnega napajalnika s tokovno stabilizacijo ne bi ustrezala izbranim zahtevam, saj je največji tok ki ga lahko zagotovi baterija 2,8A, tok na LED diodah pa 3A. Če bi spremenil zahteve in bi prilagodil izhodni tok skozi LED diode na 2,8A bi bile izgube prevelike, saj se vsa odvečna energija pretvori v toploto. Tako bi bile toplotne izgube 8 – 22W pri izhodnem toku 2,8A. Druga možnost pa je uporaba stikalnega napajalnika s tokovno stabilizacijo. Stikalni napajalnik pretvori vhodno energijo v izhodno napetost z malo izgubami tipično okoli 10%.

3.1. Stikalni napajalniki

Prednost stikalnih napajalnikov pred linearnimi je predvsem v njihovem izkoristku okoli 90%, veliki fleksibilnosti vhodne in izhodne napetosti in fizični velikosti in teži saj za enako moč je manjša za več kot 60%.

Stikalni napajalnik v principu deluje tako, da tranzistor ki je uporabljen kot stikalo pulzno dovaja vhodno energijo na dušilko kjer se akumulira in nato idealno brez izgub sprosti na izhodni kondenzator in izhodno breme. Krmilno vezje določa koliko časa prevaja tranzistor in koliko časa je zaprt in s tem posledično izhodno napetost. Frekvenca preklapljanja tranzistorja je odvisna od krmilnega vezja in je nekje od 50kHz vse do 1MHz ali več, kar pa je tudi velika slabost stikalnih napajalnikov, saj visoke frekvence pravokotnih impulzov in njihove višje harmonične frekvence oddajajo elektromagnetne motnje. Zato so potrebni razni filtri in unikatna zasnova tiskanega vezja.

K vse večji uporabi stikalnih napajalnikov pa prispevajo tudi proizvajalci krmilnih čipov. Zaradi vse bolj zmogljivih čipov, vse višjih izkoristkov, malo uporabljenih zunanjih elementov in raznih orodij za pomoč pri zasnovi vezja vedno več elektronikov uporablja stikalne napajalnike v svojih napravah.

Stikalne napajalnike delimo na dve večji skupini glede na galvansko izolirani in neizolirani izhod od vhoda. Prednost galvansko ločenih pretvornikov je seveda v galvanski ločitvi vhoda in izhoda s transformatorjem, z več odcepi v transformatorju pa omogočajo več različnih izhodnih napetosti hkrati, pretvornik s polnim mostičem lahko generira nekaj kW moči na

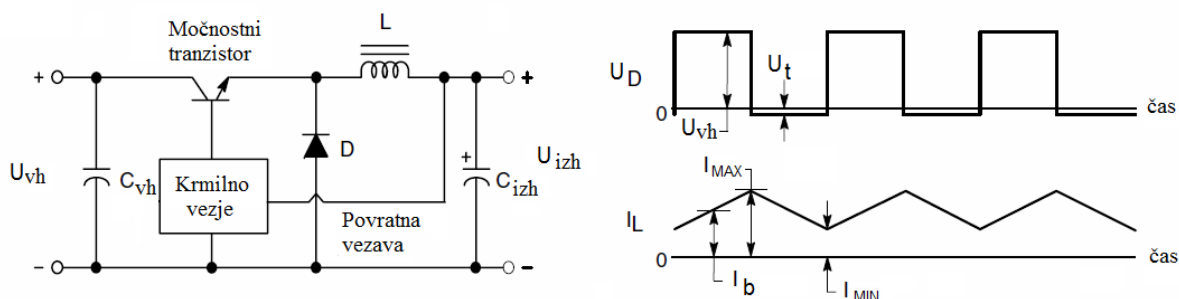
izhodu. Najbolj uporabljeni izolirani pretvorniki so zaporni »flyback«, enotaktni pretočni »forward converter«, protitaktni »push-pull«, pretvornik s polovičnim in polnim mostičem, ... Prednosti galvansko neizoliranih pretvornikov pa so predvsem v enostavni strukturi, velikem izkoristku ter velikosti končnega vezja. Glede na različno postavitev elementov (tuljave, diode in tranzistorja) ločimo tri različne pretvornike:

- »buck« - izhodna napetost je nižja od vhodne,
- »boost« - izhodna napetost je višja od vhodne,
- »buck-boost« izhodna napetost je višja ali nižja od vhodne napetosti.

Ker je v mojem primeru izhodna napetost nižja od vhodne napetosti sem uporabil »buck« pretvornik.

3.2. »Buck« pretvornik

Če imamo vhodno napetost višjo od izhodne napetosti uporabimo pretvornik z zaporedno dušilko oziroma »buck« pretvornik. Najosnovnejša shema pretvornika je na spodnji sliki [9, stran 8-11] .



Slika 6: Shema "buck" pretvornika

Pretvornik deluje v stalnem načinu kar pomeni da tok skozi diodo med delovanjem nikoli ne pade na 0. Ko tranzistor prevaja je napetost na tuljavi enaka $U_L = U_{vh} - U_{izh}$, tok skozi tuljavo linearno narašča s časom, dioda je zaporno polarizirana napetost na njej pa je enaka vhodni napetosti U_{vh} . V trenutku ko izklopimo tranzistor tok skozi tuljavo doseže vrh I_{MAX} , inducirana napetost v tuljavi $U_L = -U_{izh}$ se obrne in tok skozi tuljavo linearno odteka čez diodo, ki je prevodno polarizirana kar povzroči padec napetosti na diodi U_t , tok skozi tuljavo pade do vrednosti I_{MIN} . Tok skozi priključeno breme I_b je enak srednji vrednosti toka I_L .

Napetost na tuljavi v določenem času t je podana z enačbo $U_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$ in enaka $U_L = U_{vh} - U_{izh}$ v času ko tranzistor prevaja t_{ON} , in $U_L = -U_{izh}$ ko je tranzistor zaprt za čas t_{OFF} . Z integriranjem lahko izračunamo tok skozi tuljavo v času t_{ON} $\Delta I_{L ON} = \int_0^{t_{ON}} \frac{U_L}{L} dt = \frac{(U_{vh} - U_{izh})}{L} \cdot t_{ON}$ in v času t_{OFF} $\Delta I_{L OFF} = \int_{t_{ON}}^T \frac{U_L}{L} dt = -\frac{U_{izh}}{L} \cdot t_{OFF}$ ($T = t_{ON} - t_{OFF} = \frac{1}{f}$) in če predvidevamo, da se energija ohranja in je tok I_L ob času $t = 0$ enak toku I_L ob času $t = T$ lahko zapišemo $\frac{(U_{vh} - U_{izh})}{L} \cdot t_{ON} - \frac{U_{izh}}{L} \cdot t_{OFF} = 0$ in če je $t_{ON} = DT$ in $t_{OFF} = (1 - D)T$ izrazimo enačbo za izračun izhodne napetosti »buck« pretvornika:

$$(U_{vh} - U_{izh}) \cdot DT - U_{izh}(1 - D)T = 0$$

$$U_{izh} = D \cdot U_{vh}$$

Enačba 4: Izhodna napetost "buck" pretvornika

Kjer je D razmerje imenovan tudi »duty cycle« med časom ko tranzistor prevaja t_{ON} in časom T oz $\frac{1}{f}$. Takemu načinu spreminjanja širine pulza pravimo modulacija pulzne širine oziroma PWM signal (Pulse Width Modulation).

Zgornja enačba za izračun izhodne napetosti velja le pri uporabi idealnih elementov. V idealiziranem modelu vezja se vsa energija na vhodni strani se pretvori v energijo na izhodni strani to pa pomeni 100% izkoristek. V realnem vezju z realnimi elementi pa seveda ni tako. Statične izgube so posledica izgube moči in se pretvorijo večinoma v toploto nastanejo pa zaradi upornosti povezav na tiskanem vezju in elementih in se povečujejo s kvadratom toka $P = I^2 \cdot R$. Velik del energije se potroši tudi na diodi $P_D = P_{T_{ON}} + P_{T_{OFF}}$. Moč na diodi ko tranzistor prevaja $P_{T_{ON}}$ je produkt vhodne napetosti U_{vh} in zapornega toka I_s , ki je posledica manjšinskih nosilcev naboja v PN spoju, moč na diodi ko je tranzistor zaprt $P_{T_{OFF}}$ pa je produkt padca napetosti na diodi ko prevaja U_T in toka I . Prav tako nastanejo izgube v samem tranzistorju zaradi padca napetosti na njem ko je odprt. Poleg statičnih izgub pa nastanejo tudi dinamične izgube, ki so posledica zakasnenih preklonov v tranzistorju. Z višanjem frekvence preklonov se te izgube povečujejo. Poleg izgub zaradi preklonov pa nastanejo izgube ki so posledica moči potrebne za odpiranje in zapiranje tranzistorja in se linearno povečuje z višanjem frekvence preklonov $P_G = Q_G \cdot U_{GS} \cdot f$ (Q_G - minimalni naboj na vratih za vklop tranzistorja).

Prednosti »buck« pretvornika so enostavnost vezja, velik izkoristek, izhodne moči so lahko do nekaj kW, vhodna napetost je lahko do 10x višja pri stalnem načinu, za večje razlike pa se lahko uporabi nestalni način kjer tok v tuljavi med delovanjem doseže 0A. Slabost pa je velika valovitost vhodne napetosti, to odpravimo z velikimi vhodnimi kondenzatorji, največja slabost pa je, da je v primeru kratkega stika na tranzistorju izhodna napetost enaka vhodni kar pa ima lahko katastrofalne posledice na priključeno breme [10].

3.3. Napajalnik LED diod z LT3755

Ker pretvornik potrebuje posebno krmilno vezje ki proizvaja PWM signal in krmili tranzistor ter tako nastavlja izhodno napetost oziroma tok, sem moral poiskati ustrezno integrirano vezje. Proizvajalcev integriranih vezij za stikalne napajalnike je vedno več, vedno več pa je tudi namenskih integriranih vezij za specifične aplikacije, med njimi tudi krmilniki za LED diode. Pri iskanju ustreznega integriranega vezja sem si pomagal s kriteriji ki sem jih določil v prejšnjih poglavjih. Proizvajalec Linear Technology je eden izmed boljših ponudnikov tovrstnih čipov. Ponuja čipe za vse vrste topologij v ponudbi pa imajo tudi paleto integriranih vezij namenjenim LED aplikacijam. Za svojo aplikacijo sem potreboval »buck« pretvornik s tokovno stabilizacijo pri 3A, z vhodno napetostjo 12-16,8V in zunanjim krmilnim tranzistorjem ter z možnostjo regulacije svetilnosti. S pomočjo iskalnika na spletni strani sem izpolnil zahtevane parametre in iz tabele izbral čip LT3755.

3.3.1. Integrirano vezje LT3755

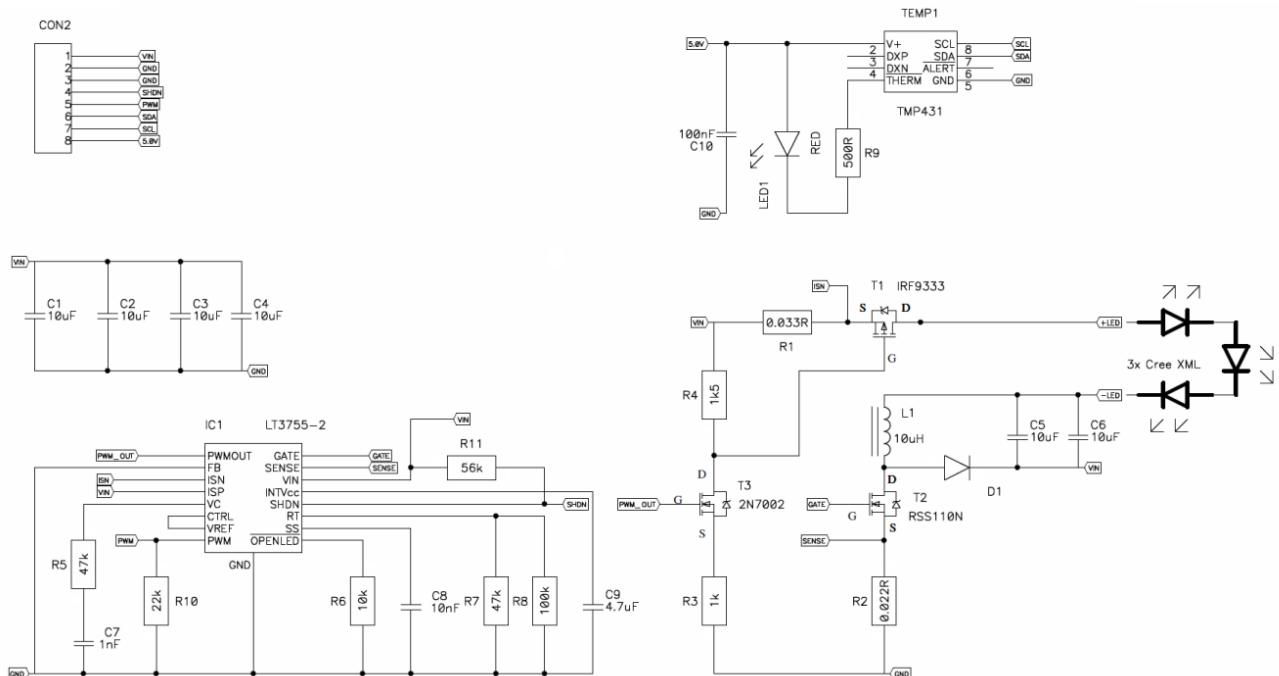
Integrirano vezje LT3755 je krmilno vezje za stikalni napajalnik z možnostjo konstantnega izhodnega toka ali konstantne napetosti. Integrirano vezje je zelo fleksibilno saj podpira 5 vrst topologij vključno z »buck« ki jo potrebujem v svoji aplikaciji. Frekvenca PWM signala za krmiljenje tranzistorja je nastavljiva od 100kHz do 1MHz kar pomeni da lahko uporabnik izbere ustrezne elemente in poveča izkoristek. Ker nima vgrajenega močnostnega tranzistorja je lahko z uporabo ustreznega tranzistorja izhodni tok zelo velik (do 10A). Tokovna stabilizacija je narejena z merjenjem napetosti na »shunt« upor. Z analognim signalom na pinu »CTRL« ima možnost zatemnjevanja LED diod z regulacijo izhodnega toka, ima pa tudi možnost digitalnega zatemnjevanja z zunanjim PWM signalom na pinu »PWM«.



Slika 7: LT3755

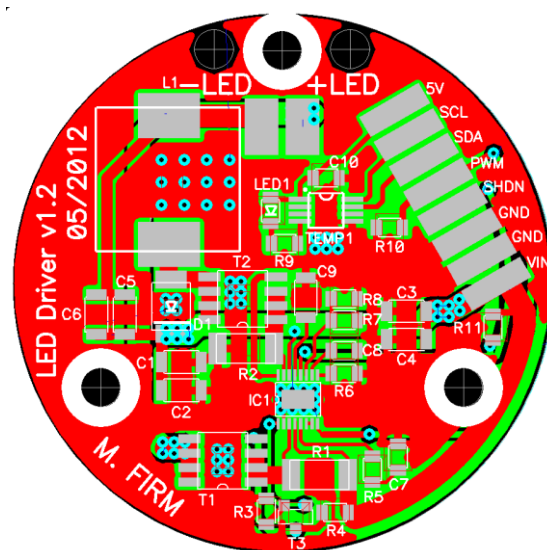
3.3.2. Električna shema LED napajalnika

Celotni krmilnik LED diod je sestavljen modularno iz LED napajalnika in mikrokrmilniškega modula. Na LED napajalniku se nahaja integrirano vezje LT3755 z ustreznimi elementi na tiskano vezje pa sem vključil tudi digitalni temperaturni senzor TMP431 za merjenje temperature svetilke.



Slika 8: Električna shema LED napajalnika

Osnovni elementi »buck« pretvornika so tuljava L1 (10 μ H), schottky dioda D1 (PMEG3050) in N-kanalni tranzistor T2 (RSS110N). Frekvenco preklopov napajalnika pa sem nastavljal z vzporedno vezanima uporoma R7 in R8 (32k Ω) na 350kHz. Kondenzator C8 10nF služi za mehki zagon napajalnika saj ob zagonu pride do velike vhodne tokovne špice ter napetostne na izhodu. Merjenja toka skozi LED diode poteka preko merjenja padca napetosti na »shunt« upor R1, R2 pa služi za merjenje toka skozi tranzistor T2. Tranzistorja T1 in T3 pa služita za regulacijo svetilnosti LED diod z zunanjim PWM signalom. Valovitost izhodne napetosti »buck« pretvornika zato sem uporabil le 2 izhodna kondenzatorja C5 in C6 (20 μ F), medtem pa je vhodna napetost bolj valovita zato sem uporabil 4 vhodne kondenzatorje C1, C2, C3 in C4 (40 μ F). Digitalni temperaturni senzor TMP431 je uporabljen za merjenje temperature vezja in posledično temperaturo svetilke saj je vezje pritrjeno na ohišje zaradi odvajanja odvečne toplote.



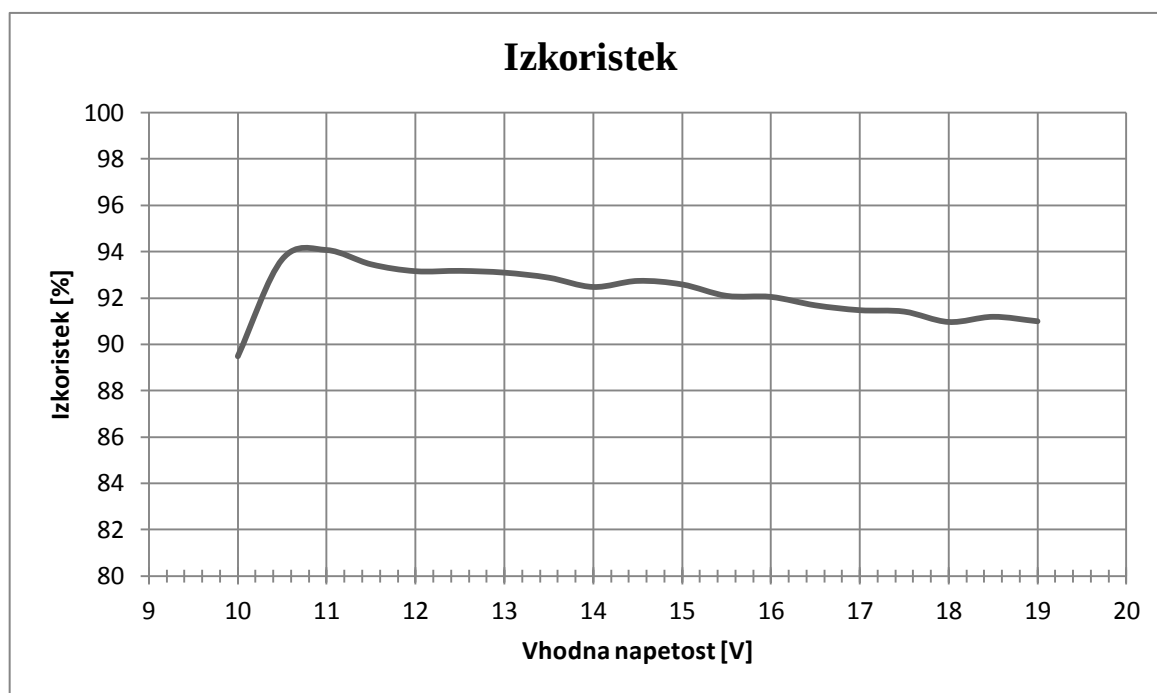
Slika 9: Tiskano vezje LED napajalnika

3.3.3. Meritve

Meritve sem izvajal z digitalnima multimetroma Fluke 287 in Fluke 175 pri temperaturi LED diod 45°C in temperaturi LED napajalnika 25°C. Najprej sem izmeril izhodni tok in izhodno napetost in kljub temu, da je napajalnik tokovno stabiliziran pri določeni vrednosti, sem izmeril tok skozi celotno merilno območje 10 - 19V. Opazil sem, da se je pri vhodni napetosti nižji od 10,3V izhodni tok močno znižal. Vzrok temu je padec napetosti (izgubna napetost) na vseh LED diodam zaporedno vezanih elementih in znaša 0.9V. Izhodni tok upade ker je

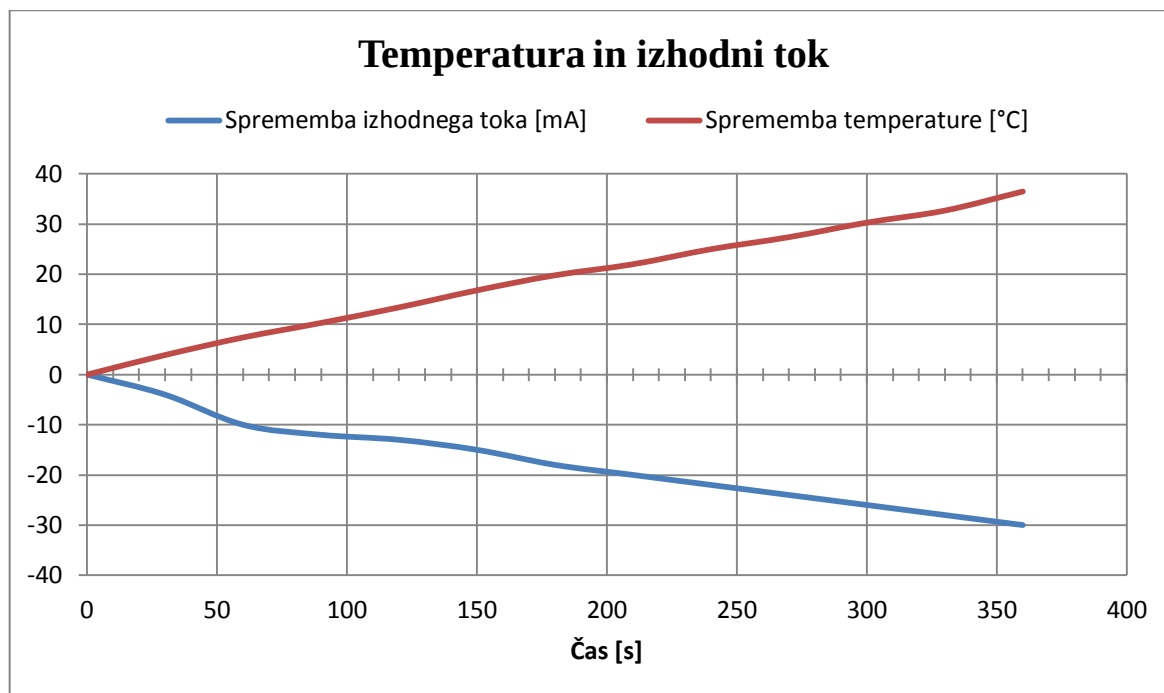
razlika vhodne napetosti in izgubne napetosti večja od nazivne napetosti LED diod pri maksimalnem toku. Izgubna napetost s produktom izhodnega toka pa je tudi glavni del izgub LED napajalnika.

Izmeril sem vhodni tok pri 19-ih vrednostih vhodne napetosti in izračunal izkoristek napajalnika z izmerjenimi vrednostmi z enačbo $\mu = \frac{U_{izh} \cdot I_{izh}}{U_{vh} \cdot I_{vh}} \cdot 100\%$. Iz grafa je razvidno da izkoristek napajalnika pada z večanjem vhodne razlike vhodne in izhodne napetosti. Napetost baterije je med 12V in 16,8V to pa pomeni, da je izkoristek v tem območju 91,5 – 93% kar pomeni da se približno 8% energije oziroma 2,2W pretvori v toploto. Vhodni tok pri vhodni napetosti 12V je 2,49A kar pa je ravno na meji najvišjega dovoljenega izhodnega toka baterije 2,5A. Meritve so pokazale, da je napajalnik napetostno in tokovno ustrezen izbrani bateriji in LED diodam.



Graf 1: Vhodna napetost in izkoristek

Izvedel sem tudi meritve temperature in izhodnega toka. LED diode sem imel pritrjene na blok aluminija na prednji strani, na zadnji strani pa sem imel pritrjen napajalnik. Temperaturo v sredini bloka sem meril z multimetrom Fluke 287 s termočlenom K-tipa, izhodni tok pa z multimetrom Fluke 175. Temperatura se je višala linearno s faktorjem 7°C/min, z višanjem temperature pa se je izhodni tok konstantno nižal in je pri temperaturi 60°C je padel za 30mA.



Graf 2: Temperatura in tok s časom

4. KRMILNI MODUL

Krmilni modul je vezje namenjeno krmiljenju LED napajalnika. Glavne naloge modula so vklop, izklop in spreminjanje svetilnosti LED diod, merjenje temperature svetilke in baterije ter merjenje napetosti posameznih celic v bateriji. Glavni del modula je AVR mikrokrmilnik Atmel Atmega8 na katerega so priključeni senzorji in uporovni delilniki. Temperaturo svetilke in baterije merita digitalna temperaturna senzorja TMP431, za vklop svetilke je uporabljen reed kontakt za spreminjanje svetilnosti in izklop pa dva hall senzorja A3144EU.

4.1. Električna shema in tiskano vezje

Vezje krmilnega modula je enostavno in je sestavljeno iz štirih glavnih delov napajalnega dela, uporovnega delilnika, vhodno izhodnega dela ter mikrokrmilniškega dela.

Vhodni napajalni del sestavlja reed kontakt kateri ob prisotnosti magnetnega polja vklopi tranzistor T1, ki deluje kot stikalo in vklopi napajanje mikrokrmilniku in LED napajalniku. Mikrokrmilnik nato s tranzistorjem T6 zadrži tranzistor T1 odprt poleg tega pa odpre tranzistorje T2, T3, in T4 in sklenejo tokokrog skozi uporovni delilnik za merjenje napetosti. Linearni napetostni regulator AS2954B zagotovi 5V na napajanje mikrokrmilnika.

Vhodni napajalni del

Uporovni delilniki s tranzistorji

Vhodno izhodni del

Mikrokrmilniski del

17

4.2. Atmel AVR mikrokrmilniki

AVR mikrokrmilniki so zelo priljubljeni tako pri hobi uporabnikih kot tudi v industriji zaradi enostavnosti uporabe, nizke cene in velikega izbora različnih čipov. Mikroprocesor je 8-bitni RISC arhitekture. Mikrokrmilnik ima integrirano poleg aritmetično-logično enoto (ALU) tudi vhodno-izhodne pine, pomnilnike (FLASH, EEPROM in SRAM pomnilnik) ter periferne enote (analogno-digitalni pretvorniki, časovniki, serijski vmesniki, RC oscilator, ...). Napajalna napetost je lahko od 1,8V – 5,5V, frekvenca delovanja pa do 20MHz. AVR mikrokrmilniki se delijo v več družin med katerimi so najbolj uporabljeni iz družine mega AVR in tiny AVR, vse bolj pa se razširjajo mikrokrmilniki družine Xmega saj omogočajo višje hitrosti in širša vodila 16-bitna.

4.2.1. Družina mega AVR

Mikrokrmilniki družine mega AVR so zmogljivejši mikrokrmilniki in so največja družina (preko 400 različnih čipov) in zato tudi najbolj razširjena. Število vhodno izhodnih pinov sega od 20 do 100, velikost FLASH pomnilnika od 4kB do 256kB, EEPROM pa od 256B do 4kB. Na voljo imajo popularnejše USB, CAN, UART in druge serijske vmesnike, vgrajeni AD pretvornik, napetostne reference, časovniki in druge periferne enote pa zmanjšajo potrebo po uporabi zunanjih modulov. Za aplikacije ki zahtevajo majhno porabo energije pa je na voljo tudi posebna »picoPower« izvedba z uporabo načinov spanja pa se poraba zmanjša na manj kot 1 μ A. V družini mega AVR je atmega8 eden izmed najbolj uporabljenih čipov.

4.2.2. Atmel Atmega8

Atmega8 ima 8 kilobajtov FLASH, 512 bajtov EEPROM in 1 kilobajt SRAM pomnilnika. Na voljo ima 23 vhodno izhodnih pinov med katerimi je 8 analognih vhodov (10-bitni AD pretvornik). Napajalna napetost je lahko med 2,7V in 5,5V, najvišja frekvenca delovanja pa 16MHz. Vgrajene ima tri časovnike (dva 8-bitna ter enega 16-bitnega), poseben »watchdog« časovnik in tri PWM kanale. Za komunikacijo z zunanjimi napravami pa uporablja fizične serijske vmesnike UART, SPI in I2C. Poraba toka v aktivnem načinu pri 3V in 4Mhz je 3,6mA, v varčevalnem načinu pa do 0,5 μ A. Na voljo je v treh različnih ohišjih, klasičnem PDIP 28 in dveh SMD ohišjih (TQFP32 in MLF32).



Slika 12: Atmega8 TQFP32

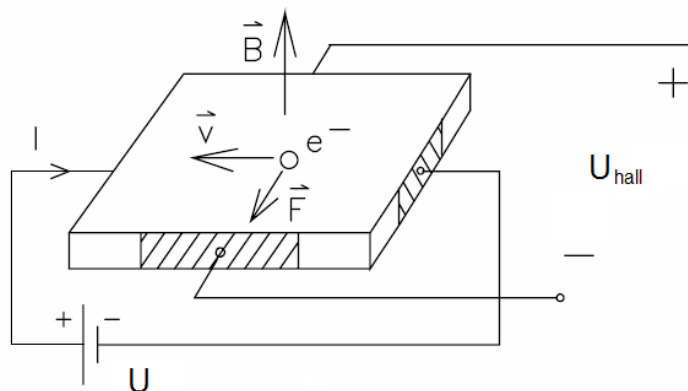
4.3. Magnetni senzorji

Magnetni senzorji so elementi ki zaznavajo prisotnost magnetnega polja ali gostoto magnetnega pretoka. Glede na način zaznavanja magnetnega polja ločimo dve vrsti senzorjev, reed kontakti in hall senzorji. Reed kontakt je magnetno stikalo ki se sklene oziroma razklene pri dovolj velikem magnetnem polju za delovanje pa ne potrebuje zunanjega napajanja. Hall magnetni senzorji pa potrebujejo zunanje napajanje za delovanje, za razliko od reed kontaktov pa lahko izmerijo gostoto magnetnega pretoka.

4.3.1. Hall magnetni senzor

Hall magnetni senzorji izkoriščajo Hall-ov efekt, pri katerem se zaradi vpliva zunanjega magnetnega polja na vodnik po katerem teče električni tok na straneh pojavi električna napetost. Osnova Hall-ovega efekta je Lorentz-ova sila. To je sila ki deluje na električni naboj v magnetnem polju. Poenostavljen primer Hall-ovega senzorja je trakasti vodnik na katerega je priključen napetostni vir. Zaradi vpliva električnega polja se v vodniku gibljejo nosilci nabojev. Če pravokotno na vodnik deluje magnetna sila se nosilci naboja kopičijo na stranicah vodnika. Zaradi presežka elektronov na eni strani vodnika in pomanjkanja na drugi se pojavi napetost, ki jo imenujemo Hall-ova napetost.

Hall senzor je sestavljen iz ploščice polprevodniškega kristala (InAs, GaAs) nameščenega na aluminijastem substratu. Na straneh ploščice so naparjene štiri elektrode nasprotni dve uporabljeni za napajanje, drugi dve pa za merjenje Hall-ove napetosti.



Slika 13: Hall-ov senzor

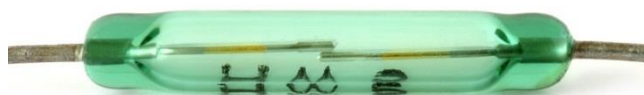
Na zgornji sliki je element na katerega je priključena napetost U ki povzroči tok I . Gibanje elektronov e^- je v nasprotni smeri toka na sliki označeno z $\vec{v}$. Zaradi magnetnega polja oziroma gostote magnetnega pretoka $\vec{B}$ se elektroni odmikajo v smeri vektorja $\vec{F}$ kar povzroči potencialno razliko in s tem Hall-ovo napetost, ki je na določenem področju linearna z gostoto magnetnega pretoka.

Največji slabosti Hall-ovih senzorjev sta velik napajalni tok (od nekaj mA do nekaj 100mA) in velika temperaturna odvisnost izhodne napetosti.

4.3.2. Reed kontakt

Reed kontakt je magnetno stikalo, ki je pri prisotnosti magnetnega polja sklenjeno oziroma razklenjeno odvisno od konfiguracije kontakta. Sestavljen je iz steklene cevke v kateri sta hermetično zaprti dve ali več feromagnetnih elektrod. Pri normalno odprtih kontaktih je med njima majhna reža, ko pa kontakt postavimo v magnetno polje pa se elektrodi deformirata kar povzroči stik. Pri normalno zaprtih kontaktih se elektrodi razkleneta.

Tak senzor je primeren za indikacijo prisotnosti magnetnega polja ker pa ne potrebuje napajanja pa je zelo uporaben pri baterijsko napajanih aplikacijah.



Slika 14: Reed kontakt

4.4. Temperaturni senzor TMP431

TMP431 je dvo-kanalni digitalni temperaturni senzor proizvajalca Texas Instruments z možnostjo priklopa zunanega tranzistorja na katerem meri temperaturo PN spoja. Območje merjenja temperature je $-40 - 125^{\circ}\text{C}$, točnost na tem območju pa je $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Za komunikacijo uporablja serijsko vodilo I²C. Odčitavanje temperature na lokalnem in zunanjem senzorju se izvaja 8x na sekundo, temperatura pa je shranjena v registru. Vse nastavitve senzorja je možno nastavljati z vpisovanjem podatkov v registre. Senzor ima na voljo tudi dva izhoda katerih stanje je odvisno od izmerjene temperature in nastavljenih parametrov minimalne in maksimalne temperature ter histereze. Podatek o temperaturi zunaj določenih meja pa je shranjen tudi v statusnem registru.

4.5. Delovanje in program

Zaradi potrebe po brez kontaktnem vklopu svetilke sem namesto stikala uporabil obroč s katerim se z vrtenjem nastavlja svetilnost. V obroč sem vgradil 5 magnetov zamaknjenih za 29° , obrnil pa sem jih tako, da je pri vsakem obratu obroča za 29° v dveh točkah obrnjenost magnetov drugačna (tabela 2), kar pa določa 5 pozicij.

	Stanje	Hall 1	Hall 2
Pozicija 1	Izklop	J	/
Pozicija 2	25%	S	J
Pozicija 3	50%	S	S
Pozicija 4	75%	J	S
Pozicija 5	100%	J	J

Tabela 2: Pozicija obroča

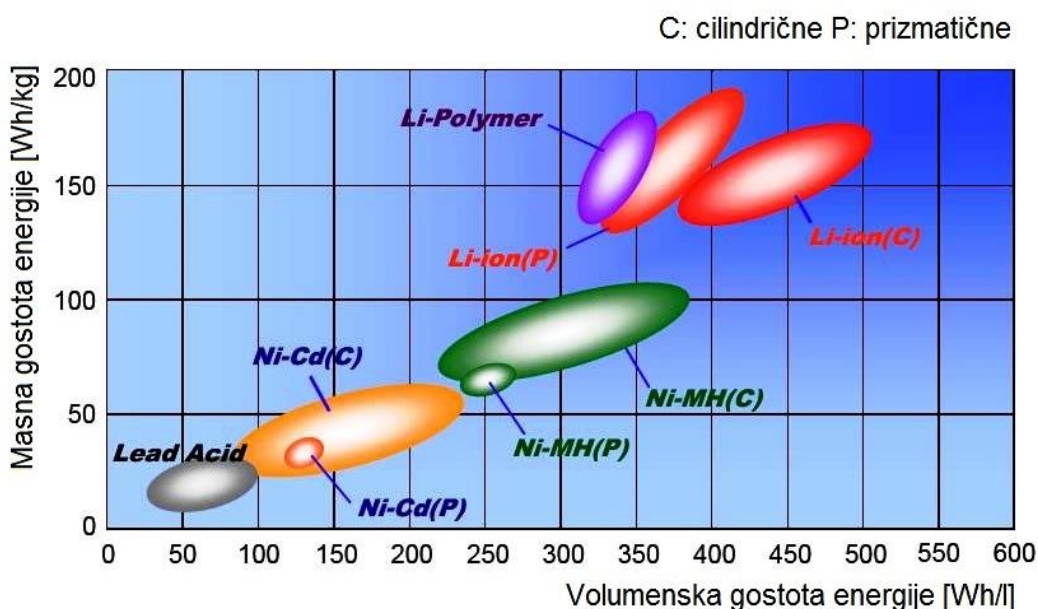
V prvi poziciji prvi magnet (J) sklene reed kontakt in vklopi napajanje mikrokrmilniku in zažene program. V glavni zanki se vsakih 1,4ms odčita vrednost na hall senzorjih in povpreči zadnje tri vzorce. Izmerjena in povprečena vrednost se primerja s konstanto, ki je zapisana v EEPROM-u in določa obrnjenost magneta in posledično pozicijo obroča. Glede na pozicijo obroča se določi svetilnost 25%, 50%, 75% ali 100% ali izklop.

Program vsako sekundo meri napetosti na vseh štirih celicah v bateriji in temperaturo svetilke.

Ko je napetost na celici manjša od 3V svetilka izklopi glavni tranzistor T1, ki odklopi napajanje in izklopi svetilko z izklopom tranzistorjev T2, T3 in T4 pa se od uporovnega delilnika odklopijo tudi vse celice in tako je tok izklopljene svetilke 0A.

5. BATERIJA IN POLNILNIK

Zaradi relativno velike moči prenosne svetilke in velike avtonomije sem moral uporabiti baterijo velike kapacitete, majhnega volumna in mase. Na spodnjem grafu je primerjava različnih akumulatorjev glede na gostoto energije iz katerega je razvidno, da imajo Li-ion in Li-polymer največjo gostoto energije.



Graf 3: Gostota energije

5.1. Li-ion akumulatorji

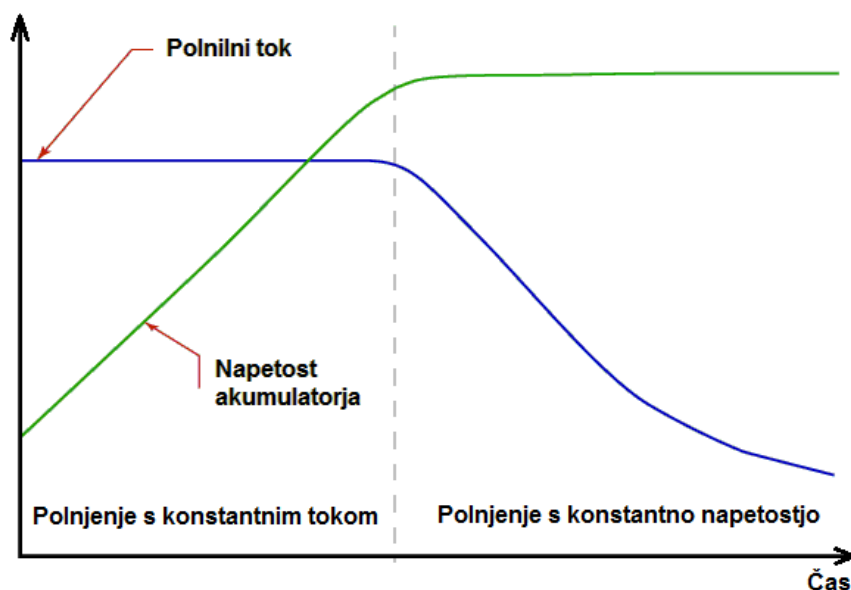
Akumulatorji na osnovi litija so vedno bolj priljubljeni in se kljub relativno visoki ceni danes uporabljajo v večini napravah od prenosnih naprav (računalniki, telefoni, ...) do električnih vozil, zato je na voljo velik spekter oblik in kapacitet. Litijevi akumulatorji imajo pred ostalimi poznanimi tehnologijami daleč največjo zmogljivost akumuliranja električne energije, ne kažejo znakov spominskega efekta, imajo nizko lastno praznjenje ter zagotavljajo zadosten tok zaradi relativno nizke notranje upornosti. Glede na kemijsko sestavo delimo

litijeve celice na litij ionske, litij polimerne in litij železo fosfatne, oblika celic pa je lahko prizmatična ali cilindrična. Litij ionski akumulator je sestavljen iz anode (navadno ogljikova) in katode (kovinski oksidi), kateri ločuje elektrolit litijeve soli v organskem topilu. Nazivna napetost je odvisna od kemije akumulatorja in je pri litij ionskih 3,6V, litij polimernih 3,7V, litij železo fosfatne pa imajo nazivno napetost pri 3,3V. Velika slabost litijevih celic je občutljivost na pregloboko izpraznitev in preveliko napolnitev, zato so potrebna dodatna vezja oziroma zaščite. Pri mehanskih poškodbah celic ali pri preveliki napetosti na celicah lahko vnetljiv elektrolit izpari iz celice in se vname ali celo eksplodira, zato je potrebna velika pazljivost pri uporabi.

Za svojo aplikacijo sem izbral litij-ionske akumulatorje cilindrične oblike velikosti 18650 (premer 18mm, dolžina 65mm), katere se uporablja tudi v baterijah prenosnih računalnikov. Napetost na eni celici mora biti med 3,0V in 4,2V. V primeru, da je napetost na celici izven določenih meja lahko pride do trajnih poškodb ali celo do eksplozije celice. Najvišja kapaciteta akumulatorjev te velikosti je med 2000 in 3000mAh.

5.1.1. Polnjenje in praznjenje

Litijeve celice polnimo najprej s konstantnim tokom, ko pa je dosežena najvišja napetost celice (pri li-ion $4,2V \pm 50mV$), pa nadaljujemo s konstantno napetostjo, pri čemer tok počasi pada proti nič. Polnjenje prekinemo ko tok skozi celico pade na 10% konstantnega toka na začetku polnjenja. Tako delimo polnjenje na dva dela pri čemer se v prvem delu (polnjenje s konstantnim tokom) celica napolni na 80%, preostalih 20% pa se napolni v drugem delu (polnjenje s konstantno napetostjo). Oba dela sta časovno približno enako dolga. To pomeni, da lahko v polovici polnilnega časa celico napolnimo na 80%, polnjenje preostalih 20% pa traja še enkrat toliko [11].

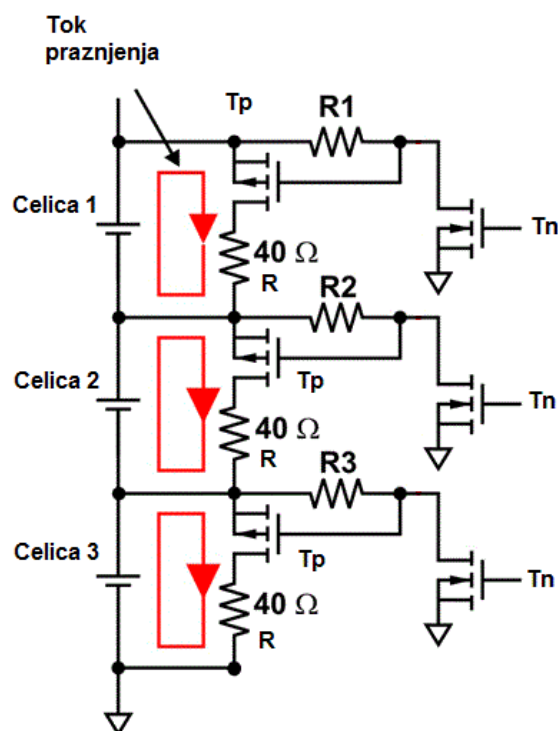


Graf 4: Polnilni cikel litijevih akumulatorjev

Polnilni tok litijevih akumulatorjev je odvisen od kapacitete in notranje upornosti, navadno pa ta tok znaša do 80% kapacitete za 18650 akumulatorje kar pomeni, da lahko celico s kapaciteto 2500mAh polnimo z najvišjim tokom 2A, akumulator pa je 100% napolnjen v približno treh urah. Litijevih akumulatorjev za razliko od svinčevih ni potrebno napolniti na 100% kapacitete oziroma je priporočljivo polnjenje na le okoli 80% kapacitete, saj se življenjska doba akumulatorja tako podaljša čas polnjenja pa se razpolovi.

5.1.2. Baterija

Baterijo sem sestavil iz štirih zaporedno vezanih li-ion akumulatorjev velikosti 18650. Kapaciteta baterije je 2500mAh, nazivna napetost pa 14,4V. Najvišja napetost baterije je 16,8V najnižja pa 12V. Ker se karakteristike akumulatorjev med seboj razlikujejo, se pojavi problem pri polnjenju baterije. Ker so akumulatorji vezani zaporedno je tok polnjenja skozi vse celice enak, ker pa se notranje upornosti razlikujejo pa je padec napetosti na celicah lahko različen kar pa pomeni, da lahko v primeru previsoke napetosti na eni ali večih celicah baterijo trajno poškodujemo. Prav tako se baterija lahko poškoduje, če napetost na akumulatorjih pade pod varno mejo 3V. V izogib temu problemu pri praznjenju kontrolni modul meri napetost posamezne celice, pri polnjenju pa sem uporabil pasivno balansirno vezje, ki s praznjenjem določene celice uravnava napetosti celic v bateriji.



Slika 15: Princip balansiranja celic

Pri vklopu tranzistorja T_n se odpre tranzistor T_p , ki sklene tokokrog med celico in uporom R (40Ω). Tok celico prazni napetost na njej pada. Na tak način balansirna enota uravna napetost vseh celic.

5.2. Polnilnik

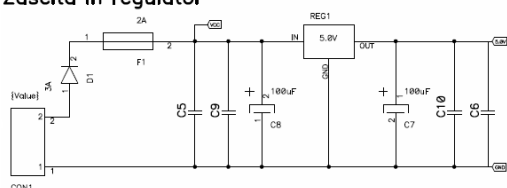
Na tržišču je veliko že izdelanih polnilnikov litijevih akumulatorjev, malo pa je enostavnih za uporabo in namenskih za mojo aplikacijo. Zato sem se odločil da izdelam polnilnik, ki bo akumulator ustrezno polnil in bil enostaven za uporabo.

Zahteve za enostaven polnilnik sem določil s testiranjem raznih modelarskih polnilnikov. Polnjenje baterije pri modelarskih polnilnikih zahteva priklop močnostnega dela baterije in posameznih celic. Pred polnjenjem je potrebno nastaviti vrsto celic in tok polnjenja, samo polnjenje pa se prične šele s pritiskom na tipko. Ker se mi je zdel tak način polnjenja prezahteven sem razvil svoj polnilnik enostaven za uporabo.

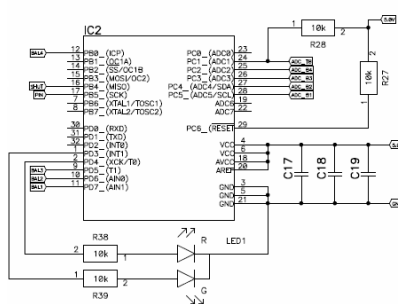
Ker je polnilnik namenjen samo enemu tipu baterije sem lahko odstranil vse tipke in določil parametre polnjenja uporabljeni bateriji. Polnilnik po priklopu baterije samodejno prične polnjenje in se samodejno izklopi. Stanje polnjenja in morebitne napake pa se signalizirajo preko ene dvobarvne LED diode.

5.2.1. Električna shema in vezje

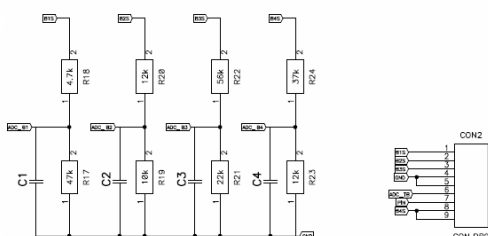
Zaščita in regulator



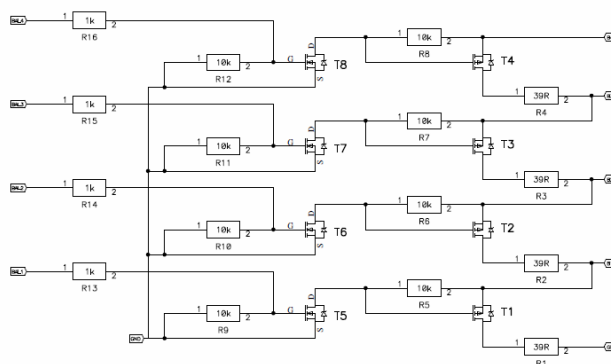
Mikrokrmilnik



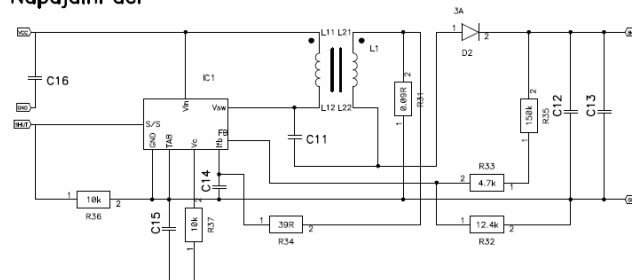
Uporovni delilnik



Balansirni del



Napajalni del



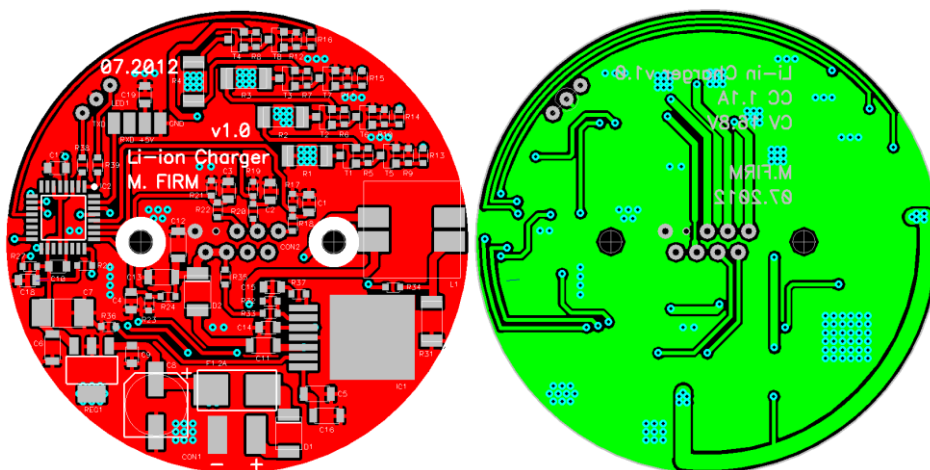
Slika 16: Shema polnilnika

Vezje polnilnika je sestavljeno iz vhodnega dela, napajalnega dela, uporovnih delilnikov, balansirnega dela in mikrokrmilnika.

Na vhodnem delu je zaščitna dioda in varovalka ter 5V linearni napetostni regulator AS2954B. Napajalni del pa sestavlja integrirano vezje LT1513, kateri je uporabljen kot stikalni napajalnik v SEPIC topologiji. Napajalni del je namenjen polnjenju baterije s konstantnim tokom in konstantno napetostjo. Z merjenjem napetosti na zaporednem uporju je določen konstantni tok napajalnika, izhodna napetost pa je določena z merjenjem napetosti na uporovnem delilniku.

Uporovni delilnik je uporabljen za merjenje napetosti posameznih celic, balansirni del pa izenačevanju napetosti na celicah.

AVR mikrokrmilnik Atmega8 meri napetosti celic in temperaturo baterije, ustrezno vključuje balansirni del in prične oziroma zaključi polnjenje. Ker sem hotel enostaven dizajn in uporabo sem uporabil le eno dvobarvno LED diodo za signalizacijo polnjenja oziroma napak, polnjenje pa se prične po priklopu baterije na polnilnik.



Slika 17: Vezje polnilnika

5.2.2. Delovanje in program

Po priklopu napajanja mikrokrmilnik vsako sekundo pomeri napetost na izhodnem priključku in v primeru, da baterija ni priključena sekundno utripa zelena LED dioda in signalizira stanje pripravljenosti. Takoj po priklopu baterije sekundno utripa rdeča LED dioda kar signalizira preverjanje baterije. V primeru, da je razlika med najvišjo in najnižjo napetostjo celice višja od 0,2V mikrokrmilnik najprej vklopi balansirni del in pred polnjenjem sprazni vse celice na napetost celice z najnižjo napetostjo in tako izenači napetosti na celicah.

Če so napetosti na celicah višje od 2,5V in nižje od 4,2V, se ne razlikujejo za več kot 0,2V in je temperatura baterije manjša od 40°C se polnjenje prične, rdeča LED dioda sveti, frekvenca merjenja napetosti se poveča na 10Hz, zaradi nihanja napetosti pa se povpreči zadnjih 10 izmerjenih vrednosti.

Baterija se polni najprej s konstantnim tokom 0,5A, ko pa napetost baterije doseže 16,75V pa se polni s konstantno napetostjo zaradi višanja notranje upornosti celic pa tok pada.

Balansirni del je sestavljen iz celicam zaporedno vezanih 39 ohmskih uporov in tranzistorjev, ki jih povezujejo. Če je napetost na celici višja od 4,17V, mikrokrmilnik odpre tranzistor in celico prazni skozi zaporedni upor ter tako izenačuje napetost celic. Celice se do napetosti 4,2V balansirajo posamično. Če napetost na celici doseže 4,2V se ta celica sprazni na najnižjo napetost na celicah. V primeru, da napetost na katerikoli celici preseže 4,2V pa se napajalni del začasno izklopi, celice pa se praznijo toliko časa, da se izenačijo napetosti na njih.

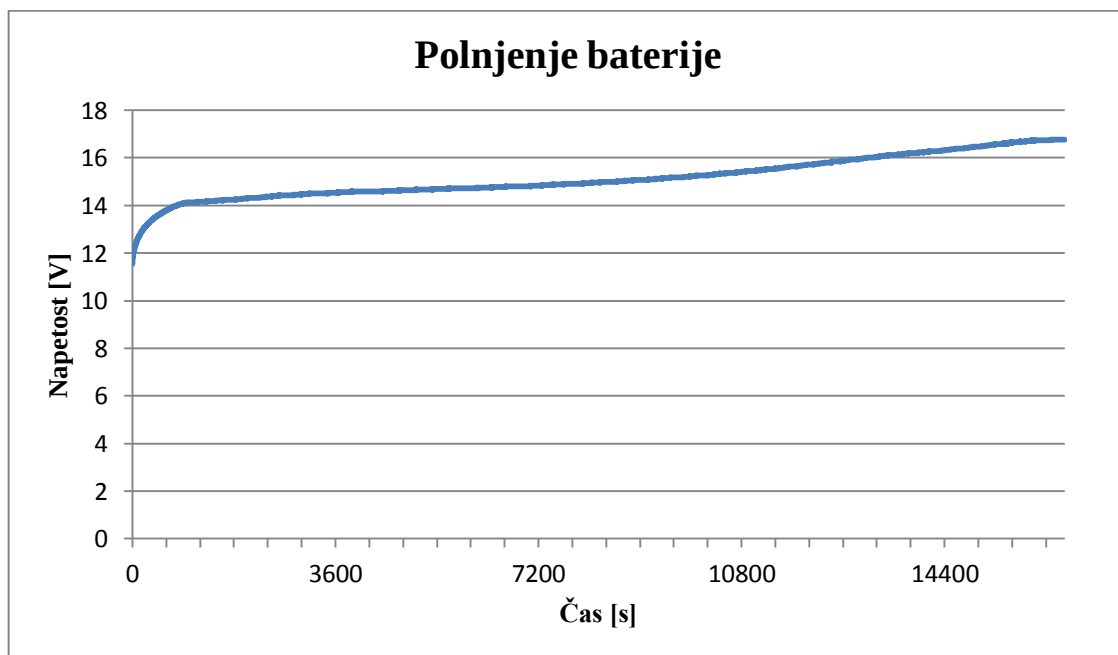
Polnjenje se konča, ko je razlika med najvišjo in najnižjo napetostjo manjša od 0,05V in je napetost baterije enaka 16,75V kar pomeni 4,19V na celico. Po končanem polnjenju sveti zelena LED in signalizira uspešno končano polnjenje.

Polnjenje se prekine v primeru, da je napetost na celici več kot 10s višja od 4,2V ali je temperatura baterije preseže 40°C oziroma je nižja od 0°C, prekine pa se tudi v primeru, da je čas polnjenja daljši od 7 ur. Če pride do prekinitve polnjenja oranžna LED dioda utripne X-krat, kjer je »X« pomeni številka napake.

Št. napake	Napaka
1	Napetost prve celice izven meja
2	Napetost druge celice izven meja
3	Napetost tretje celice izven meja
4	Napetost četrte celice izven meja
5	Prevelika razlika v napetosti celic
6	Temperatura izven meja
10	Polnjenje traja več kot 7 ur

Tabela 3: Seznam napak polnilnika

Ko se napetost na celicah ustali in je enaka 16,75V se polnjenje konča. To pomeni, da se je polnjenje končalo ravno na začetku druge faze polnjenja, polnjenja s konstantno napetostjo. To pomeni, da je baterija napolnjena na približno 80%. Za tak način polnjenja sem se odločil, ker se tako podaljša življenjska doba celic, polnilni čas pa se skrajša skoraj na polovico.



Graf 5: Polnjenje baterije

6. OPTIMIZIRANJE IN TESTIRANJE

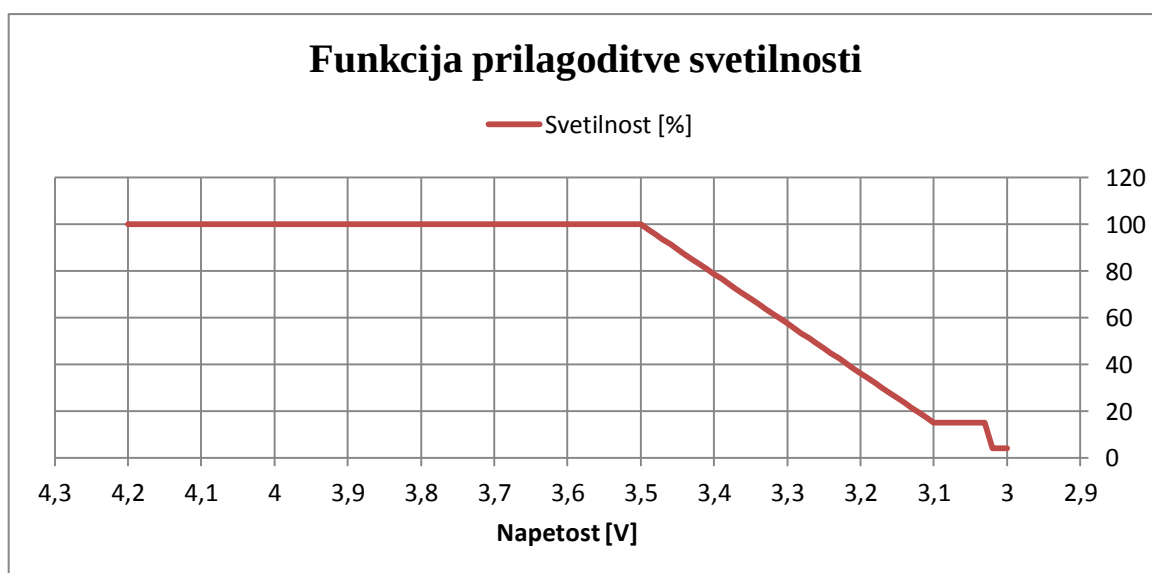
V tem poglavju bom opisal rešitve, katere sem uvedel za podaljševanje avtonomije svetilke ter temperaturno prilagoditev. Primerjal bom avtonomijo svetilke s prilagoditvijo in brez. Pomeril pa bom tudi avtonomijo svetilke na različnih nastavljenih svetilnostih.

6.1. Napetostna prilagoditev svetilnosti

Izhodna moč baterije je pogojena z napetostjo celic ter izhodno močjo svetilke. Ker je izhodna moč napajalnika skozi celotno dovoljeno napetostno območje baterije (12V – 16,8V) skoraj enaka, je izhodni tok baterije pri nižanju njene napetosti sorazmerno višji.

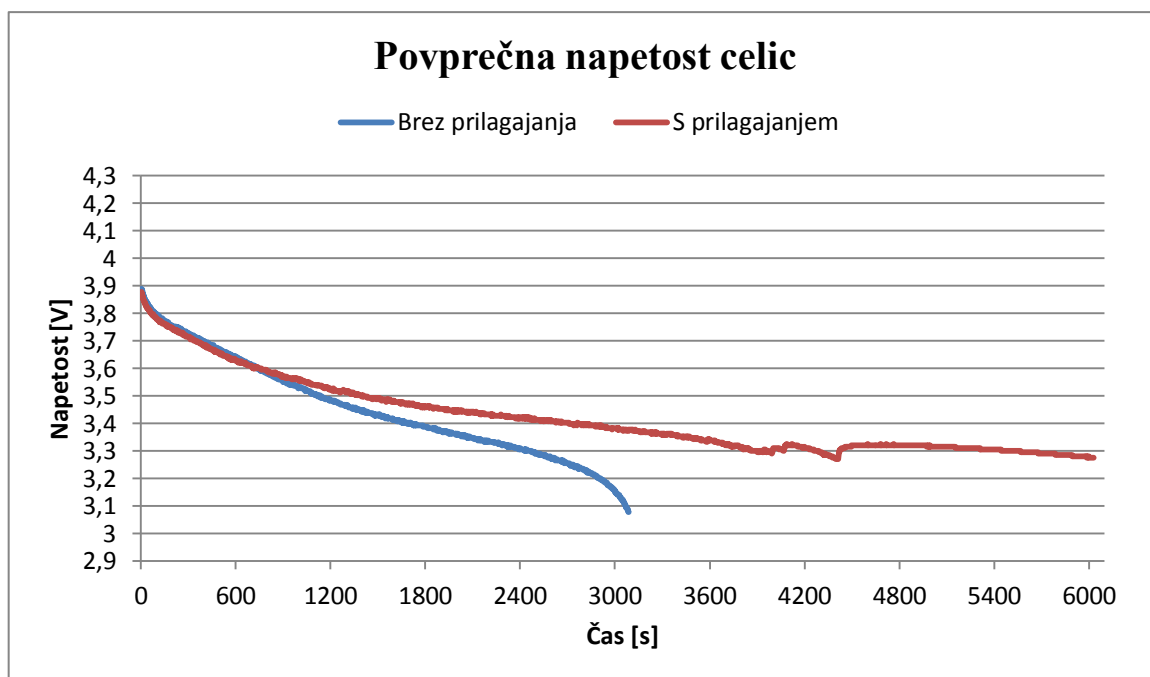
Z povečevanjem toka skozi baterijo pa se baterija vse hitreje prazni, ker pa imajo litijeve celice pri praznjenju značilno koleno (ko napetost pri konstantnem toku praznjenja hitro upade) bi to privedlo hitrega izklopa svetilke.

Da bi se izognil takojšnjemu izklopu svetilke, sem dodal prilagajanje svetilnosti v določenem napetostnem območju. Svetilnost se v določenem območju spreminja linearno s spreminjanjem napetosti na celici z najnižjo napetostjo. Z nižanjem svetilnosti se posledično prilagaja tudi izhodna moč svetilke kar pa pomeni nižje izhodne tokove baterije ter tako večjo avtonomijo in manjšo obremenitev baterije.

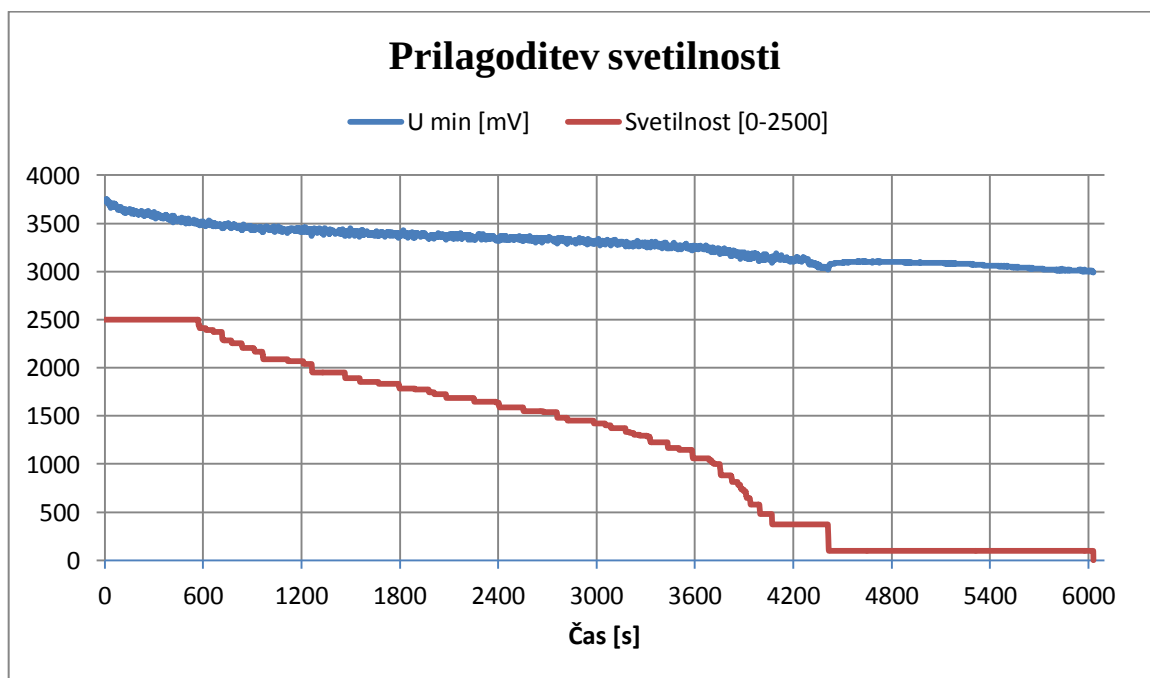


Graf 6: Funkcija prilagoditve svetilnosti

Spodnji graf (graf 4) prikazuje napetost na bateriji pri uporabi podaljševanja avtonomije in brez pri nastavljeni svetilnosti 100%. Ko je najnižja napetost celice med 3,1V in 3,03V je izhodna svetilnost 15%, pod 3,03V pa 4% nastavljene svetilnosti.



Graf 7: Povprečna napetost celic s prilagajanjem svetilnosti in brez



Graf 8: Prilagoditev svetilnosti

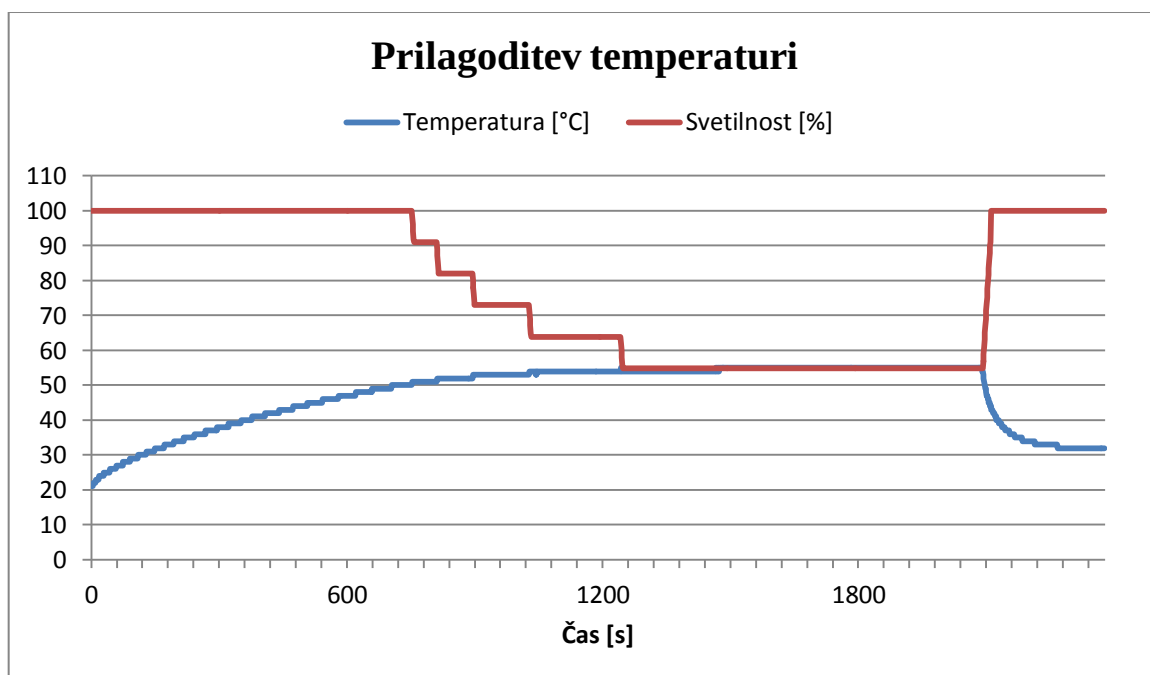
Iz grafa je razvidno, da svetilnost upada ko napetost na celici pade pod 3,5V in sicer do 3,1V kjer je konstantnih 380 oziroma 15%. Ko napetost pade pod 3,03V se vklopi varčevalni način, kjer je svetilnost konstantnih 4%. Pri napetosti pod 3V se svetilka izklopi.

Na grafu se ne vidi tipičnega kolena li-ionskih baterij saj se zaradi prilagajanja svetilnosti prilagaja izhodna moč s tem pa se koleno izravna in je karakteristika skoraj linearna.

6.2. Prilagoditev svetilnosti temperaturi svetilke

Zaradi velike moči svetilke se generira veliko toplote katera se odvaža preko ohišja v okolico. V vodi je zaradi dobrega stika odvajanje toplote veliko, drugače pa je z odvajanjem toplote v zraku. Ker ima zrak nizko toplotno prevodnost večina generirane toplote ostane na ohišju kar lahko povzroči pregrevanje LED diod, vezja in baterije. Zato sem v program dodal linearno prilagajanje svetilnosti glede na temperaturo svetilke v določenih območjih.

Spodnji graf (graf 6) prikazuje prilagajanje svetilnosti zaradi temperature svetilke in sicer v območju med 50°C in 60°C se svetilnost znižuje za 9% / °C.



Graf 9: Prilagajanje svetilnosti temperaturi

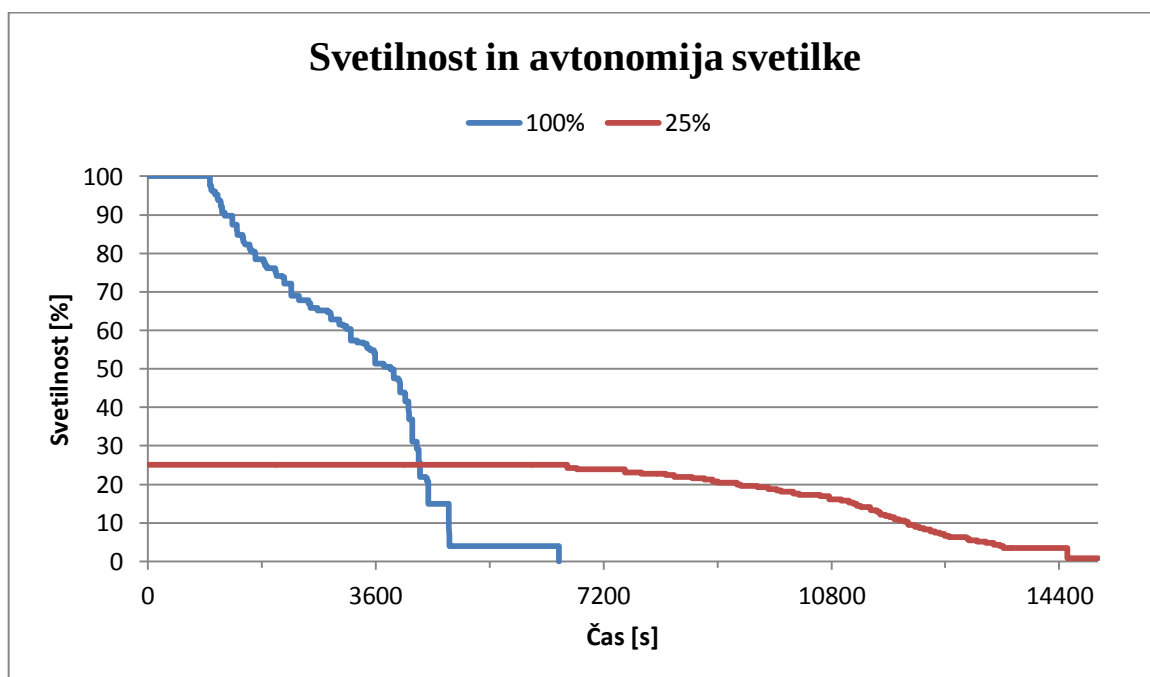
Začetna temperatura svetilke je 21°C, temperatura okolice pa 22,5°C. Po vklopu svetilke se temperatura 750 sekund dviguje in doseže 50°C. Ko preseže 50°C se svetilnost začne linearno

zniževati s temperaturo. Pri 55°C se temperatura ustali saj je generirana toplota enaka toploti, ki se oddaja v okolico. Ko se je temperatura ustalila sem svetilko potopil v vodo s temperaturo 24,2°C. Temperatura svetilke je naglo upadla svetilnost pa se je dvignila na 100%.

6.3. Izhodna svetilnost

Izhodna svetilnost svetilke je določena s pozicijo obroča (0, 25%, 50%, 75%, 100%), temperaturno prilagoditvijo pri temperaturi višji od 50°C in napetostno prilagoditvijo. Zaradi mehkejših prehodov pri obračanju obroča, sem dodal zakasnitev, ki vsakih 7,65ms spremeni svetilnost za 1%, pri napetostnem ali temperaturnem prilagajanju svetilnosti pa za spremembo enega procenta potrebuje 0,383s oziroma se spremeni 2,61% / s. Tako počasno prilagajanje je potrebno saj se preprečijo napetostna nihanja na bateriji, poleg tega pa človeško oko ne zazna tako počasnih sprememb.

6.4. Avtonomija svetilke



Graf 10: Svetilnost in avtonomija svetilke

Iz grafa 7 je razvidno, da je avtonomija svetilke z vključenim prilagajanjem pri nastavljeni najvišji svetilnosti (obroč na 100%) 1 uro in 20 minut in 30 minut v varčevalnem načinu. Pri nastavljeni najnižji svetilnosti 25% pa je avtonomija preko 4 ure. Vse meritve so bile izvedene pri manj kot 80% napolnjenosti baterije.



Slika 18: Polnilec, baterija, svetilka



Slika 19: Test svetilke pod vodo

ZAKLJUČEK

Cilj diplomskega dela je bil opis izdelave LED svetilke in iskanje ustreznih rešitev, kateri so se pojavili pri razvoju. Za razvoj lastne svetilke sem se odločil, ker je tržišče kljub vse večji uporabi LED diod še vedno omejeno s ponudbo potapljaških svetilk z visoko svetilnostjo cene primerih pa so zelo visoke.

Pri razvoju napajalnika LED diod sem moral najprej spoznati stikalne napajalnike in težave, katere se pojavijo pri izdelavi. Pri izdelavi vezja sem prihranil veliko časa, z izbiro integriranega vezja LT3755 saj z nekaj ustrezno izbranimi zunanji elementi že lahko pravilno napaja LED diode.

Največ težav sem imel pri izdelavi krmilnega modula in izbiro primerne načina brezkontaktnega vklopa in spreminjanje svetilnosti svetilke. Idejo o vrtljivem obroču za spreminjanje svetilnosti sem si izposodil pri svetilkah, ki že obstajajo na tržišču katere pa uporabljajo samo magnetne senzorje zaradi katerih imajo velik tok pri izklopljeni svetilki. Rešitev problema zahteva fizično ločitev baterije od svetilk. Ta problem sem rešil z uporabo reed kontakta in štirih tranzistorjev.

Pri prvih testiranjih sem opazil, da je avtonomija svetilke pri 100% svetilnosti okoli ene ure svetilka pa se je zaradi prenizke napetosti takoj izklopila. Kar pa bi bilo neprijetno ali celo nevarno v primeru, da bi potop trajal dalj časa oziroma baterija ne bi bila dovolj napolnjena. Zato sem v program vpisal prilagajanje svetilnosti glede na napetost na celicah s čimer sem podaljšal avtonomijo na skoraj dve uri namesto takojšnjega izklopa svetilke pa svetilka še vedno sveti na najmanjši svetilnosti.

Za izdelavo polnilnika sem porabil največ časa. Potreboval sem enostaven polnilnik za uporabo z ustrezno zaščito celic. Dolgo časa sem iskal tudi ustrezno rešitev za stabilizacijo toka polnjenja in napetosti. Rešitev sem našel v integriranem vezju LT1513 podjetja Linear Technology, katerega slabost pa je slab izkoristek in nizki tok polnjenja.

V diplomskem delu sem opisoval sestavne dele svetilke, ki sem jih izdelal iz novejših komponent. Zaradi vse večje uporabe LED diod za namene razsvetljave in litijevih baterij v prenosnih napravah pa se na trgu dnevno pojavljajo vse boljše in novejšie komponente, ki omogočajo vse boljše izkoristke in s tem višje svetilnosti in avtonomijo. Prepričan pa sem, da sem z izdelavo svetilke in s pisanjem diplomskega dela pridobil veliko novega znanja in da se moja pot razvijanja svetilke ne bo končala tukaj.

VIRI

- [1] J. FURLAN, Elektronski elementi, Tehniška založba Slovenije, 1992
- [2] R. Lorencon, Elektronski elementi in vezja, Narodna in univerzitetna knjižnica, 1996
- [3] V. Kumar Peddinti, Light Emitting Diodes. Prevezeto julij 2012 iz
<http://www.ele.uri.edu/courses/ele432/spring08/LEDs.pdf>
- [4] J. FURLAN, Osnove nelinearnih elementov, Fakulteta za elektrotehniko Ljubljana, 1988
- [5] Wikipedia, LED (2012), Prevezeto julij 2012 iz http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
- [6] D. Erdmann, Color Rendering Index (CRI), Prevezeto julij 2012 iz
[http://www.pioneerlighting.com/new/pdfs/Color Rendering Index \(CRI\).pdf](http://www.pioneerlighting.com/new/pdfs/Color%20Rendering%20Index%20(CRI).pdf)
- [7] Cree, Inc. (2012). Prevezeto avgust 2012 iz [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED Components and Modules/XLamp/Data and Binning/XLampXML.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXML.pdf)
- [8] LEDRISE.LTD (2008). Prevezeto avgust 2012 iz
http://www.ledrise.com/shop_content.php?coID=19
- [9] ON Semiconductors, SWITCHMODE™ Power Supply Reference Manual 2002. Prevezeto avgust 2012 iz http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/SMPSRM-D.PDF
- [10] Wikipedia, Buck converter (2012). Prevezeto avgust 2012 iz
http://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter
- [11] Battery university (2012). Prevezeto september 2012 iz
http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries

Izjava o avtorstvu

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja izr.prof. dr. Dejana Križaja. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Matej Firm